А. И. ДОЛГИНОВ

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР в качестве учебного пособия для высших технических учебных заведений

÷



MOCKRA 1968

Долгинов А. И.

Д 64 Техника высоких напряжений в электроэнергетике, М., «Энергия», 1968. 464 с. с черт.

В книге излагаются материалы об электрических полях в технике высоких напряжений, физике разряда в изоляции, изоляции воздушных и кабельных линий электропередачи, оборудовании высокого напряжения электростанций и трансформаторных подстанций, волновых и перекодных процессах в электрических системах, атмосферных и внутровник перецальзамениях.

и перекодних проскопольствия и порекодних перекодних перекапряженнях. Книга предназначена для студентов энергетических факультетов. Книга может быть полезва инженерво-техническим работникам проектных и эксплуатационных электротехнических организаций.

3-3-9 69-68

6112.1

долгинов александр иосифович

Техника высоких напряжений в электроэнергетике

Редактор В. С. Рашкес Переплет художника П. П. Перевалова Сдано в набор 1/XII 1967 г. Формат 70×108¹/16 Тираж 17 000 экз. Подписано к печати 22/III 1968 г. Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 40,6 Цена I р. 56 к. Издательство", Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

> Московская типография № 10 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

Предислови	e	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	·	•	10
Бведение	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	·	•	•	•	•	٠	•	•	•	12
								\mathbf{y}_{i}	асть	nei	овал	z									

Изоляция в электроэнергетических установках

🗸 Раздел первый

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТАНОВКАХ

Глава первая. Электрические поля в однородной среде	21
1-1. Основные законы электрических полей	21
1-2. Классификация электрических полей	23
1-3. Общие свойства и принципы расчета полей	23
1-4. Поля простейших конденсаторов	29
1-5. Проводящие включения в изоляции	31
1-6. Напряженность поля на поверхности одиночных и расшепленных про-	
водов воздушных линий электропередачи	33
1-7. Расчет зарядов и напряженности поля на проводах по известным фаз-	
ным напряженням	35
1-8. Упрошенный расчет напряженности поля на поверхности проводов	
трехфазной линии	39
1-9. Коэффициент неглалкости проволов	- 39
1-10. Электрическое поле электродов стержень стержень и стержень –	
плоскость	40
Глава вторая. Электрические поля в неоднородной изоляции	42
2-1. Предомление сидовых линий поля на границе двух изоляционных сред	42
2-2. Поле в многослойных конленсаторах Градирование изоляции	43
2-3 Газовые включения в конленсаторах с тверлой и жилкой изоляцией	44
9.4. Распределение напряжения по непонке емостей	45
V 2.5 Распределение изпражения по делак поверчисти тверлых лизлектриков	47
2-6 Выпавцивание закупического полу контексаторыми обидатками	48
9.7 Варионновино электрического поля конденсаториями обладками .	40
2 г. гаспроделение наприменал в неоднородном взоняция при учете про-	40
водамостел на переменном в постоянном вапрямениях	15

Раздел второй

ГАЗОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ В ТЕХНИКЕ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

Глава третья. Возникновение и нейтрализация заряженных частиц.	54
3-1. Физическое состояние газа	54
3-2. Ионизация и возбуждение молекул газа	55
3-3. Поверхностная нонизация	59
3-4 Явление захвата электронов — образование отрудательных ионов	60
	61
3.6 Полвичность в этектински поде и пифизия запячения пасти	69
2.7 Празия	62
	64
јлава четвертах. попизационные процессы в газах	04
4-1. Коэффициент ударной ионизации	04
4-2. Лавина электронов	66
4-3. Самостоятельный разряд	67
4-4. Разрядное напряжение промежутка с равномерным полем. Закон Па-	
шена	68
4-5. Переход от лавинной формы самостоятельного разряда к искровому	
разряду в малых искровых промежутках с равномерным полем. Обра-	
зование стримеров	70
4-6. Самостоятельный разряд в неравномерном поле. Лавинная корона	71
4.7 Стримериая корона	73
A.B. Donevon crowens a scenosof pages a Donewytkay c Henseyouen-	•••
TO. TELEVISION COMMENTE DI ACAPOLON PESPAR DI APOMENYINAN E REPABNOMENT	75
	10

F

• •

4-9. Переход стримера в искровой разряд в длинных воздушных проме-
жутках. Лидерная стадия разряда
4-10. Главнын разряд в длинных промежутках
4-11. Искра
4-12. Длинкая дуга в воздухе
4-13. Последовательность стадий газового разряда
4-14. Влияние атмосферных условий на разрядные напряжения воздушных
промежутков
4-15. Барьерный эффект в искровых промежутках
4-ю. Высокопрочные газы
4-17. 1 азы под оольшим давлением
глава пятая, разрядные напряжения воздушных промежутков при различ-
ных формах воздеиствующих напряжении
b-1. Формы воздеяствующего напряжения
5-2. Статистический разброс разрядных напряжений
5-3. Разрядные напряження воздушных промежутков при атмосферных пе-
ренапряжениях
5-4. Разрядные напряжения воздушных промежутков при напряжении про-
МЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ
. 5-5. Разрядные напряжения воздушных промежутков при постоянном (вы-
прямленном) напряжении
5-6. Разрядные напряжения воздушных промежутков при коммутационных
перенапряжениях
5-7. Разряд в параллельно включенных промежутках
🖌 Глава шестая. Газовый разряд по поверхносты твердого диэлектрика 👘 🚬 👘
6-1. Значение поверхностного газового разряда в ТВН
6-2. Разряд по сухой поверхности изолятора. Сухоразрядное напряжение
6 3. Разряд по увлажненной поверхности изолятора. Мокроразрядное на
пряжение
6-4. Разряд по поверхности изолятора при воздействии коммутационных
импульсов
6-5. Разряд по поверхности изолятора при воздействии атмосферных пере-
напряжений
6-6. Влияние атмосферных условий на разрядные напряжения по поверх-
ности изоляторов
6-7. Разряд по загрязненной поверхности изоляторов
6-8. Меры, предотвращающие перекрытия по поверхности изолятовов вслед-
ствие их загрязнения
6-9. Поверхностный разрял в равномерном поле
6-10 Поверхностный разряд при постоянном напояжении
o to, hopepanoeraan paspag apa noeroannon aanpamenaa

Раздел третий

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ И КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ

Глаза	седьмая. Электрическая прочность твердой, жидкой и комбинирован	17
ной	изоляции	. 111
7-1.	Твердое и жидкое состояние вещества	. 111
7-2.	Электрический пробой твердых диэлектриков	. 113
7-3.	Тепловой пробой твердых диэлектриков	. 11
7-4.	Тепловой пробой в канале высокой проводимости	. 119
· 7-5.	Пробой жидких диэлектриков	. 119
7-6.	Масляно-барьерная изоляция	, 122
7-7.	Бумажно-масляная изоляция	. 123
7-8.	Ионизационный пробой изоляции	. 124
7-9.	Статистические закономерности пробоя изоляции	. 121
7-10.	Старение изоляции	. 12
7-11.	Расчетная зависимость срока службы изоляции от температуры	. 12
7-12.	Обобщенная вольт-временная характеристика изоляции	. 12
Глава	восьмая. Контроль изоляции	. 13
8-1.	Назначение контроля изоляции	. 13
8-2.	Поляризация диэлектриков и схема замещения изоляции	. 13
8-3.	Контроль изоляции по ее сопротивлению или току проводимости	. 13
8-4.	Контроль изоляции по углу диэлектрических потерь	. 13
8-5.	Контроль изоляции по емкостным характеристикам	. 13
8-6.	. Контроль изоляции по распределению напряжения на элементах конс	t-
	рукции	. 13
8-7.	Обнаружение ионизационных процессов в изоляции	. 14
8-8.	Испытание повышенным напряжением	. 14

4

Раздел четвертый

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

5		10
6 4 4 5 A . 0 1	святая. изоляция воздушных линии электропередачи [4	13
	Общая характержетика изоляции линии	-3
9-2.	Анагериал и конструкция линеиных изоляторов	5
9-3.	Тирлянды изоляторов	19
9-4.	Разрядные характеристики линеиной изоляции при напряжении про-	
05	мышленной частоты и при коммутационных импульсах	90
9-5.	Разрядные характеристики линенной изоляции при грозовых импульсах	53
9-6.	учет влияния ветра при определении размеров опоры	4
9-1.	Выоор изоляции на линиях с металлическими опорами	4
9-8.	Разрядные характеристики изоляции на деревянных опорах 15	:8
9-9.	Методы теории вероятности при выборе изоляции на линиях электро-	
	передачи	50
9-10.	Изоляция линий 750 кв и выше	51
9-11.	Изоляция высоких переходных опор	j3
9-12.	Профилактические испытания изоляции линий	53
9-13.	Изоляция линий электропередачи постоянного тока	54
Глава	десятая. Корона на проводах линий электропередачи	55
10-1.	Коронные токи на проводах при переменном напояжении 16	55
10-2.	Начальная напряженность поля коронного разрята. Общая и местная	
	KODOHA	37
10-3.	Расчет потерь на местную корону	8
10-4		3
10-5		Č
10 0.	практика висори проводов на инних электропередачи но условним	74
10.6		77
10-0.		77
10-7.	Порона на проводах при постоянном напряжении	70
10-8.	потери и радиопомехи при коронировании на постоянном напряжении	10 20
10-9.	Оощая корона и ее характеристики	ЯŲ N
10-10.	Импульсная корона на проводах	51
Глава	одиннадцатая. Дуговые замыкания на воздушных линиях элек-	~~
тро	передачи	33
11-1.	Причины замыканий на воздушных линиях электропередачи	53
11-2.	Условия перехода искрового перекрытия в дуговое замыкание на ли-	
	ниях электропередачи	33
11-3.	Самопогасание силовых дуг на линиях электропередачи	34
11-4.	Автоматическое повторное включение и условия самопогасания дуг	
		35
11-5.	Дуговые замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью.	
	Лугогасящие катушки 18	38
Глава	л веналиатая. Изоляция силовых кабелей высокого напряжения	92
12.1	Общие тенденции в применении кабельных диний высокого напряжения	92
19.9	Основные пранияты устройства кабельной изолянии	93
19.3	Кабали с вазхой пропиткой	94
12-0.		97
12-4.		99
12-0.	γ	õõ
12-0.	Кабали ила электроператан рисского изпражения постоящого тока 9	ñĩ
12-7.	Панна в толбот о гозовой изотанной пот тортавиист 10Ка . 9	ñì
12-8.	Vianin в грубах с газовой изоляциен под давлением	ň
12-9.	парели с пластиассовои изоляцией	02 02
12-10.	температурный режим кабеля и его влияние на кабельную изблящию 20	70
12-11.	электрическая прочность изоляции каоелей и испытания каоелей 2	J4
12-12.	Повреждаемость в каоельных сетях 3-10 кв (кабели с вязкой про-	<u>^</u>
	ПИТКОЙ)	JU

Раздел пятый

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ Станций и подстанций

Глава тринадцатая. Уровни изоляции подстанционного оборудовани	ія .	. 20
13-1. Общие принципы координации изоляции		. 20
13-2. Координация изоляции по атмосферным перенапряжениям		. 2 0
13-3. Координация изолящим по виутренним перенапряжениям		. 2
13.4. Координация изолящим по длительным внутренним перенапряжи	ениям	i 2
13-5. Координация изолящия по рабочему напряжению	• •	. 2

Глава четырнадцатая. Станционно-аппаратные изоляторы	213
14-1. Виды станционно-аппаратных изоляторов	213
14-2. Опорные изоляторы	214
14-3. Проходные изоляторы	210
14-4. Профилактические испытания изоляторов	220
14-5. Изоляторы в районах с загрязненной атмосферой	221
Глава пятнадцатая. Изоляция электрических аппаратов и распредели-	001
тельных устройств	221
15-1. Общие сведения	221
15-2. Изоляция выключателей	222
15-3. Изоляция трансформаторов тока	224
15-4. Изоляция конденсаторов	226
15-5. Изоляция распределительных устройств	229
Глава шестнадцатая. Изоляция трансформаторов и переходные процессы	
вобмотках	229
16-1. Схемы соединения и конструкции обмоток	229
16-2. Классификация изоляции трансформаторов	231
16-3. Развитие колебаний в обмотках при воздействии грозовых волн	231
16-4. Градиентные перенапряжения в обмотках трансформаторов	237
16-5. Переход электроматнитных волн с одной обмотки на другую	240
16-6. Особенности переходных процессов в трехфазных трансформаторах	242
16-7. Внутренняя защита в трансформаторах	24 3
16-8 Конструкции внутренней изоляции трансформаторов	246
16-9 Температурный режим работы трансформатора и его влияние на изо-	
	249
16-10 Профилактические измерения характеристик изолящии трансформаторов	250
	251
Глава семинали атада Изоление впашающихся машин высокого напояжения	252
	252
17-1. Commo contrast $(r_{12}, r_{23}, r_{23}$	253
172 Kopinychan (inashan) nouna of other called order in posteriors	255
17-о. Конструктивное оформление обонотки с высоковольтной изолициск	258
17-4. Битковая изоляция элекгрических машин	200
17-э. температурный режим расоты генератора и его влияние на изоляцию	209
17-о. воздеиствие импульсов на генераторы и волновые процессы в оомотках	209
17-7. Испытания изоляции статорных обмоток	ZOZ
17-8. Создание генераторов на очень высокие напряжения	263

Часть вторая

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Раздел шестой

АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Глава в	осемнадцатая. Волновые процессы в линиях и в схемах с ли-
ниямі	4
18-1. 3	Электромагнитная волна на линии без потерь
18-2. I	Іреломление и отражение волн в узловых точках линии
18-3. T	идовые формы волн в расчетах грозозащиты
18-4. A	Нализ некоторых практических схем
18-5. F	асчет предомленных и отраженных волн в уздовых точках, на кото-
	ые набегают волны с нескольких линий 275
18-6 1	
18-7 P	Асчет предомленных воли в уздах с нелинейными соплотивлениями 273
18-8 B	истельной и переходный процессы в схемах с линными сопротявления 974
18-9 P	очновой в перелодный процесси в сельная с дининами ининала
10-5.1	
18.10 0	
10-10. F	асчетные слемы с замещением реактивных элементов участками ли-
1911 D	
10-11. P	асчет напряжения на изоляции, защищенной вентильным разрядни-
10 10 10	л, установленным на расстоянии <i>і</i> от изоляции
10-12. D	олновые процессы в многопроводной системе оез потерь
18-13. 1	скажение волн на линиях с потерями в земле
18-14. M	скажение и затухание грозовых волн под действием импульсной ко-
po po	оны
18-15. B	олновое сопротивление и коэффициент связи для линии с импульс-
H	ойкороной
Глава де	евятнадцатая. Молния и ее воздействия
' 19-1. P	азвитие грозового разряда

Содержание	Соде	ржание
------------	------	--------

19-2. Токи молнии	287
19-3. Эквивалентная схема для молнии	290
19-4. Бозденствия тока молнии	291
	292
	290
201. Samining denting working of pure a working of the	290
	290
	233
	202
	300
	206
20-7. Физическое моделирование заземлителен	300
20-о. Импульсные коэффициенты искусственных заземлителен по опытным	207
данным и высор заземлителен	210
20-9. 1 ЛУОИННЫЕ ЗАЗЕМЛИТЕЛИ	310
20-10. Использование железоветонных фундаментов в качестве естественных	210
заземлителен	010
ілава двадцать первая. Разрядники	010
21-1. Назначение разрядников	313
А. Вентильные разрядники	313
21-2. Основные элементы вентильных разрядников	313
21-3. Основные защитные коэффициенты вентильных разрядников	314
21-4. Нелинейные сопротивления разрядников	315
21-5. Искровые промежутки вентильных разрядников	317
21-6. Конструкции и характеристики вентильных разрядников	320
21-7. Связь характеристик разрядников с рабочим напряжением сети	324
21-8. Грозозащитные разрядники с растягивающейся дугой (щелевые раз-	0.01
рядники)	323
21-9. Профилактические испытания и наблюдения за вентильными разряд-	
никами	320
Б. Трубчатые разрядники	32
21-10. Основные элементы трубчатых разрядников	32
21-11. Схема включения и выбор типа трубчатых разрядников	-33
21-12. Монтаж трубчатых разрядников	33
21-13. Трубчатые разрядники с ограничением сопровождающего тока	33
21-14. Эксплуатация и испытания трубчатых разрядников	33
В. Защитные промежутки	-33
21-15. Защитные искровые промежутки	-33
21-16. Стабилизированные защитные промежутки (СПЗ)	-33
Глава двадцать вторая. Атмосферные перенапряжения на линиях элек-	
тропередачи и грозозащита линий	- 33
22-1. Общая характеристика грозопоражаемости линий	- 33
22-2. Индуктированные напряжения при грозовом разряде вблизи линии	- 33
22-3. Прямой удар молнии в опору линии без тросов	- 33
22-4. Прямой удар молнин в опору линии с тросами	- 34
22-5. Прямой удар молнии в тросы в пролете	- 34
22-6. Расчет удельного числа перекрытий и отключений линий с тросами.	- 34
22-7. Прямой удар молнии в линию без тросов	- 34
22-8 Новая теория грозопоражаемости линий (обратных перекрытий) на	
	- 34
92.9 Общие принципы защиты линии электроперелачи	- 35
22^{-0} . Comparing subject subject to the second	-
22-10. Jaunia manan hanpawennew 110 ko a bume na meralamatekan a mene-	3!
99.11 Solution BLA OROPAN $35-990$ kg us repareduly of 92.5	3
22-11. Samuta manun hanparente $35 ke us Matsuniaku u Matsara 1.3$	0.
22-12. Saunta innen naupzwennem 35 ko na metailingeekka n menesooetonnika	3
	ັຈ
	2
22-14. Заземление грозозащитных тросов через искровые промежутки	ე
і лава двадцать третья. Защита подстанций от грозовых перенапряжений	3
23-1. Основные принципы защиты подстанций	3
23-2. Защита подстанции от прямых ударов молнии	3
23-3. Защита подстанционной изоляции от волн, набегающих с линий	3
23-4. Расчетная крутизна фронта набегающих волн. Показатель грозозащи-	-
ты подстанций	- 3
23-5. Защита линейных подходов к подстанции	3
23-6. Расчет волновых процессов в схемах подстанций	3
23-7. Защита подстанций вентильными разрядниками	
23-8. Защита авготрансформаторов от перехода воли	3
23.9. Защита автотрансформаторов по совмещенной схеме	3

r,

23-10. Защита разземленной нейтрали трансформаторов	9
23-11. Защита свободных обмоток трансформаторов	0
23-12. Защита оборудовання на отключенных линиях	I
23-13. Защита подстанций с трансформаторными кабелями	1
23-14. Защита высокогорных подстанций	2
23-15. Защита распределительных устройств 3—10 кв подстанций напряже-	
нием 35 ка и выше	3
23-16. Защита распределительных сетей 3—10 кв	3
Глава двадцать четвертая. Защита вращающихся машин	4
24-1. Присоединение вращающихся машин к воздушным линиям	4
24-2. Защита изоляции вращающихся машин от воли, набегающих с линий 37	5
24-3. Защита линейных подходов при защите вращающихся машии . 37	ų,
24-4. Защита генераторов от индуктированных перенапряжений	0
24-5. Защита машин малой мощности	1
24-6. Защита генераторов при трансформаторной связи с воздушными ли-	
ниями	2

Раздел седьмой

внутренние перенапряжения в электрических системах

Глава	двадцать пятая. Аналитические и экспериментальные методы ис-
c.ne,	дования внутренних перенапряжений
25-1.	Система относительных единиц в расчетах внутренних перенапряжений 38
25-2.	Переходный процесс в колебательном контуре — прототипе исследуе-
	мых схем
25-3.	Метод симметричных составляющих в расчетах внутренних перенапря-
	жений
25-4.	Параметры схем по каналам прямой и нулевой последовательностей 389
25-5.	Схемы замещения линий электропередачи
25-6.	Повышения напряжения при однофазных коротких замыканиях
25-7.	Основные составляющие внутренних перенапряжений и их расчеткые
	коэффициенты
25-8.	Исследования внутренних перенапряжений в действующих сетях . 39
25-9.	Физические модели для исследования внутренних перенапряжений 39
25-10.	Расчет переходных процессов на цифровых вычислительных машинах
	(HBM)
Глава	двадцать шестая. Коммутационные перенапряжения в электриче-
СКИ	х системах
26-1.	Перенапряжения при включении линии
26-2.	Перенапряжения при отключении холостой линии с повторными про-
	боями
26-3.	Перенапряжения при повторном включении линии (АПВ) 40
26-4.	Восстанавливающиеся напряжения при отключении коротких замыка-
	ний
26-5.	Коммутационные леренапояжения и восстанавливающиеся напояжения
	При разрыве передачи в асинхронном режиме
26-6.	Особенности развития коммутационных перенапряжений при учето
	волновых процессов по линиям 40
26-7.	Перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов и
2011	реакторов 40
26-8	Статистические данные по кратностям коммутационных перенапряжений 41
26-9	Межлуфазные комуутационные перенапряжения 41-
26-10	Огланичение коммутационных перенапляжений шунтирующими сопло-
20 10.	тивлениями в выкутивления переналримения шунтирующими сопро
26-11	Разоялники иля ограницения комуутационных перенапояжений 410
26-12	Влияние реакторов и траниформаторов напряжения приклонениых
20-12.	к линии из развитие коммутационных перенапряжений 49
Глава	\mathbf{A} in the first control to a Dependential Rependential \mathbf{A} is a set of the set
97.1	Наустойнивое горение зазем техника при заявканиях на эсчию за Наустойнивое горение зазем технией лиси и разритие переналожений 493
97.9	Перстончивое горские засемилоден дуги и развитие перенаприжении час
21-2.	Развитие перенапряжении при перемежающемся дуговом замыкачин
07.2	на землю в трехфазной сеги с изомированной неитралью
21-3.	перепапрямения при перемемающемся дуговом замыкании на землю
07 4	и образве провода
21-4.	перенапряжения при перемежающемся дуговом замыкании на землю
F	в сеги с дугогасящен катушкой
глава	двадцать восьмая, гезонансные перенапряжения в электрических
CHC1	
Zð-1.	гезонансные перенапряжения в длинных линиях на рабочей частоте . 425

x

28-2.	Ограничение резонансных перенапряжений на длинных линиях с по-	
00.2	мощью реакторов	l
20-3.	Резонансные перенапряжения на длинных линиях при несимметричных хоротких замыканиях	3
28-4.	Резонансные перенапряжения при несимметричных коммутациях фаз	Č
	линии	4
28-5.	Резонансные явления в цепях с нелинейными индуктивностями 43	6
28-6.	Ограничение напряжений нелинейными индуктивностями и феррорезо-	
	нанс на основной гармонике	7
28-7.	Сопутствующие нечетные гармоники	2
28-8.	Резонанс на высших и низших гармониках	4
28-9.	Парамстрический резонанс и самовозбуждение в электрических цепях 44	7
28-10	Автопараметрическая природа феррорезонансных скачков на основной	
	и высших гармониках 44	9
28-11	Ферлорезонанские перенапряжения в слектропереданах 45	ā
28.12	Сородовопаление перенализителя в селиропередичи.	č
20-12.	пора полачи и вознакловение резонансках излении на длин-	1
00 12		à
20-13.	Феррорезонансные перенапряжения в селях с изолированной неигралью	ž
28-14.	Резонансные перенапряжения в системах с дугогасящими катушками 45	J
28-15.	перенапряжения и восстанавливающиеся напряжения на длинных ли-	0
_	ниях с продольной компенсацией	o.
Заключе	ние	1
Общая л	питература	J

- -

•

.

9

.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Техника высоких напряжений (ТВН) является одной из профилирующих дисциплин специальностей «электрические станции», «электрические сети и системы». Студенты этих специальностей обращаются к ТВН также в своих дипломных и курсовых работах. Специализирующиеся в области ТВН занимаются углубленным изучением курса, расчетами и исследованиями при выполнении специальных разделов дипломных проектов. Кафедра ТВН Московского энергетического института, наряду с выпуском основного учебника по общему курсу ТВН под редакцией проф. Д. В. Разевига, сочла целесообразным издание учебного пособия, в котором за счет большого объема книги можно было подробнее изложить практические приложения ТВН в электроэнергетике, в частности иллюстрировать общие принципы ТВН описанием конкретных изоляционных конструкций, защитных аппаратов методом анализа и эксперимента. В учебном пособии изложение курса сопровождается примерами решения задач, и все главы имеют вопросы и задачи для самопроверки. Понятно, что ввиду различных требований к курсу со стороны разных специальностей и специализаций учебное пособие должно сопровождаться в первую очередь на заочных факультетах краткими методическими указаниями, назначение которых — выделить круг изучаемых вопросов.

Наконец, автор надеется, что данное учебное пособие сможет быть использовано инженерами-электроэнергетиками в их практической работе, особенно в области эксплуатации электрических сетей и при исследованиях новых проблем ТВН. Во всяком случае, автор при написании книги все время ставил перед собой эту задачу.

Учебное пособие названо «Техника высоких напряжений в электроэнергетике». В настоящее время можно говорить о ТВН в радиотехнике, атомной технике и других отраслях. Принятое название должно оттенить отрасль, на которую распространяется учебное пособие.

Построение курса является традиционным для кафедры ТВН МЭИ, отражающим школу создателя кафедры — заслуженного деятеля науки и техники, проф. Л. И. Сиротинского. На кафедре ТВН МЭИ совершенствуются методы преподавания ТВН, и автор стремился следовать этому направлению в своей книге.

В течение ряда лет автор является сотрудником Всесоюзного научно-исследовательского института электроэнергетики (ВНИИЭ). Постоянный контакт с работниками лабораторий высоковольтных сетей и высоковольтных аппаратов помог автору в отражении современных тенденций в ряде практических приложений ТВН.

Автор признателен рецензентам книги, доктору техн. наук В. В. Бургсдорфу и канд. техн. наук А. Н. Шоренцису за ряд весьма ценных советов по улучшению изложения. Редактор книги канд. техн. наук В. С. Рашкес вложил много труда в редактирование текста и оказал автору помощь в составлении ряда параграфов; им, в частности, даны решения большого числа примеров. Содействие Г. Н. Александрова и Н. Н. Тиходеева помогло автору отразить в книге многие результаты исследований лабораторий ТВН ЛПИ и НИИПТ.

Совершенствование данного учебного пособия требует непрестанного отражения научных и практических задач ТВН в быстро развивающейся отечественной и иностранной электроэнергетике. Автор будет признателен читателям за советы по улучшению книги.

Все пожелания и замечания автор просит направлять по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия».

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в современную эпоху измеряется не только достижениями в области космоса и электроники, но и ростом производства электроэнергии. Развитие энергетики опережает развитие всех других отраслей промышленности, и, следовательно, служит показателем общего роста индустриальной мощи страны. В СССР лятилетним планом 1966—1970 гг. намечено повысить производство электроэнергии на 70%. С ростом производства электроэнергии растут потоки мощности в электрических сетях и расстояния, на которые эти мощности передаются. Соответственно растут и напряжения электрических сетей и отдельных электропередач. На рис. В-1 приведены графики роста наивысшего напряжения сетей в Советском Союзе. В начале 20-х годов в стране была только одна передача (от ГЭС имени Классона) напряжением 66 кв. Вскоре вошла в строй первая линия 110 кв (от Каширской ГЭС). В начале 30-х годов были введены в эксплуатацию первые электропередачи 220 кв. Эти электропередачи были выполнены на передовом для того времени техническом уровне и показали высокую надежность.

С ростом мощностей возрастали и напряжения электропередач. Еще в довоенные годы была начата разработка проблем, связанных с проектированием дальней электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва длиной 900 км. Но только в середине 50-х годов эта крупнейшая по тому времени электропередача 400 кв была сооружена и пущена в эксплуатацию. Ее сооружению предшествовали многочисленные исследовательские работы, проводившиеся в основных институтах, проектных и эксплуатационных организациях страны. Эти исследования вскоре показали возможность перевода линий 400 кв на напряжение 500 кв с сохранением их уровня изоляции. Наша электропромышленность в короткий срок разработала технологию и освоила выпуск оборудования на напряжение 500 кв, в то время нанвысшего в мировой практике рабочего напряжения. Начиная с 60-х годов сооружается большое число электропередач 500 кв и сеть 500 кв становится костяком единой электроэнергетической системы европейской и сибирской частей СССР. В это же время внедряется новое напряжение 330 кв.

Но напряжение 500 кв оказывается уже недостаточным для тех огромных потоков энергии, которые предполагается передавать в начале 70-х годов и позже. Поэтому в 1966—1967 гг. вводится в эксплуатацию опытно-промышленная передача 750 кв с той целью, чтобы опыт ее эксплуатации был использован для сооружения промышленных электропередач в начале 70-х годов. Проектные расчеты показывают целесообразность сочетания сетей напряжением 330 и 750 кв. Соответственно на сети 500 кв целесообразно наложение электропередач класса 1 000—1 200 кв. Это наивысшее рабочее напряжение переменного тока, которое в настоящее время изучается с перспективой его использования в середине 70-х годов.

Важной проблемой энергетики является не только повышение мощностей и соответственно напряжения электропередач, но и увеличение их дальности. В частности, важнейшей проблемой современной электроэнергетики является передача мощностей порядка 5—6 Гвт на цепь электростанций Сибири и Казахстана, в центральные районы страны на расстояние 2 500—3 000 км. Технико-экономические расчеты показы-



I -- переменный ток; 2 -- постоянный ток.

вают, что поставленной цели наилучшим образом отвечают электропередачи постоянного тока сверхвысокого напряжения. Задача исследования электропередач постоянного тока была уже поставлена в первые послевоенные годы. В 1949—1950 гг. была сооружена первая опытная кабельная электропередача ±100 кв Каширская ГЭС — Москва. В 60-х годах сооружается опытно-промышленная электропередача ±400 кв Волгоград — Донбасс. К началу 70-х годов намечается сооружение дальних электропередач ±750 кв. График на рис. В-1 указывает на тенденцию быстрого развития электропередач постоянного тока, минуя те промежуточные этапы, по которым развивалась техника напряжений переменного тока.

Таблица В-1

						-			
<i>U</i> _в , <i>кв</i>	6	10	20	35	110	220	330	500	750
	1,15U _R						1,1U _E	1,05U _H	
(наибольшие)	6,9	11,5	23	40,5	126	252	363	525	787,5
$U_{\Phi} = \frac{U_{\text{prf.Nake}}}{\sqrt{3}}, \kappa_{\beta}$	4,0	6,65	13,3	23,4	72,8	146	210	304	455
Нейтраль	Изолированная или компенсировзнная			Эффективно заземленная					

Номинальные и рабочие напряжения электрических сетей

На современном этапе развития электроэнергетики номинальные напряжения сетей переменного тока указаны в табл. В-1.

На напряжении до 35 кв работают местные распределительные сети, воздушные и кабельные. Средние напряжения 110—220 кв используются в районных сетях, по которым передаются мощности на расстояния от нескольких десятков до 100—150 км. Область напряжений 330 кв



Рис. В-2. Ориентировочные экономические диапазоны использования электропередачи 110—330—750 кв и 220—500— 1 000 кв в зависимости от передаваемой мощности и дальности электропередачи. н выше относится к сверхвысоким напряжениям (СВН).

На рис. В-2 показаны ориентировочные экономические диапазоны использования электропередач СВН (переменного тока) в зависимости от передаваемой мощности и дальности электропередачи в сочетаниях 110—330—750 и 220—500—1000 кв.

В табл. В-1 указаны наибольшие рабочие напряжения, допустимые на оборудовании данного номинального напряжения. Ограничение накладывается изоляцией оборудования, а также насыщением магнитопроводов трансформаторов (силовых и измерительных). Допустимые рабочие напряжения на изоляции линий рассчитываются исходя из условия загрязнения воздуха в районе прохождения линии. Допустимые рабочие напряжения на линиях ограничиваются также допустимыми потерями на корону и уровнем радиопомех при коронировании.

В нормальных рабочих режимах на изоляцию воздействует фазное напряжение. В табл. В-1 приведены значения фазных напряжений U_{Φ} , соответствующих наибольшим рабочим напряжениям установки. В переходных режимах, возникающих при включениях и отключениях элементов сети, коротких замыканиях и в некоторых схемах, в основном при одностороннем включении линий, в установившихся режимах возникают так называемые внутренние перенапряжения. При грозовых разрядах в сетях возникают атмосферные перенапряжения. Тер-

мином «перенапряжения» обычно обозначают повышения напряжения, которые могут представлять опасность для изоляции. Так как возможность нарушения изоляции зависит от состояния самой изоляции, то нельзя указать определенной нижней границы, при которой повышение напряжения становится перенапряжением, и следовательно, термин перенапряжение имеет качественный характер.

Величины перенапряжений характеризуются их кратностью по отношению к U_{Φ} ; $k = U_{\text{пер}}/U_{\Phi}$. Чем выше номинальное напряжение сети, тем меньшая кратность k нормируется для изоляции. Это объясняется тем, что с ростом k растет и доля стоимости изоляции в общей стоимости оборудования и линий, и для их удешевления необходимо снижение уровня допустимых перенапряжений.

Для развития перенапряжений существенное значение имеет режим нейтрали системы. Системы могут иметь эффективно заземленную, изолированную или резонансно заземленную нейтраль. B системах с эффективно заземленной нейтралью (рис. В-3,а) ток однофазного короткого замыкания практически полностью проходит через заземленные нейтрали трансформаторов, имеет индуктивный характер и сравним по величине с током трехфазного короткого замыкания. В системах с изолированной нейтралью (рис. В-3,б) ток однофазного замыкания на землю проходит через емкость фаз (в основном линий электропередачи)

на землю, имеет емкостный характер и по величине -- порядка десятков, максимум сотен ампер. В системах с резонансно заземленной нейтралью (рис. В-3,в) емкостный ток однофазного замыкания на землю компенсируется дугогасящими катушками, настроенными в резонанс с емкостью сети, и через место замыкания проходит малый остаточный емкостный или индуктивный TOK.

Каждый из видов заземления нейтрали, или, как говорят, режима нейтрали, имеет свои преимущества и недостатки.

В системе с эффективно заземленной нейтралью однофазное короткое замыкание приводит к автоматическому отключению поврежденного участка сети. Напряжение на неповрежденных фазах кратковременно, до отключения поврежденного участка, повышается примерно до 1.2- $1,4 U_{\Phi}.$

В большинстве случаев автоматическое повторное включение отключившегося элемента сети оказывается успешным и восстанавливается нормальная схема сети. Вследствие больших TOKOB нение заземлителей, но, с другой чение поврежденного участка снижает опасность поражения от

напряжения прикосновения и шага для обслуживающего персонала. Большие токи, проходящие по контуру провода линия — земля, создают значительные помехи для линий связи, но опять-таки эти помехи кратковременны. Вследствие кратковременности дуг однофазного короткого замыкания эти наиболее частые и легкие виды коротких замыканий не переходят в междуфазные, но, с другой стороны, при очень больших токах возможен пережог дугой проводов и тросов. В системах с изолированной нейтралью однофазное замыкание на

на

стороны,

землю не приводит к автоматическому отключению поврежденного участка, но напряжение на здоровых (неповрежденных) фазах повышается до линейного. При дуговом замыкании на землю дуга не гаснет, если емкостный ток превышает определенный предел. Релейная защита от замыканий на землю, действующая на отключение или сиг-



Рис. В-3. Прохождение тока однофазного короткого замыкания в системах с эффективно заземленной (a), изолированной (б) и резонансно заземленной нейтралью (в).

усложняется

автоматическое отклю-

выпол-

землю

2 ð I) нал, существенно усложняется вследствие малости токов. Требования к заземлителям облегчены, но практика показывает, что в сетях с изолированной и резонансно заземленной нейтралью велика опасность для населения при падении проводов на землю. При дуговых замыканиях на землю могуг возникать длительные перенапряжения, связанные с неустойчивым горением дуги. Эти перенапряжения, охватывающие всю сеть, могут привести к однофазному замыканию на землю в другой точке сети. Возникающее двухфазное короткое замыкание на землю в разных точках сети приводит к отключению двух участков и часто осложняется неселективной работой релейной защиты. Мешающие влияния на провода связи слабые, но длительные.

Компенсация емкостных токов в системах с резонансным заземлением нейтрали осуществляется посредством дугогасящих катушек, включаемых в нейтрали одного или нескольких трансформаторов. Компенсация служит для гашения дуги замыкания на землю. Тем самым компенсация предотвращает возникновение перенапряжений дугового замыкания на землю и снижает вероятность замыкания на землю в другой точке сети. Таким образом, компенсация нейтрали, сохраняя достоинства изолированной нейтрали, устраняет в то же время многие ее недостатки. Но и в сети с резонансным заземлением нейтрали устойчивое (металлическое) однофазное замыкание на землю приводит к повышению напряжения на неповрежденных фазах до линейного.

В Советском Союзе принято, что сети до 35 кв включительно имеют изолпрованную или резонансно заземленную нейтраль, а сети 110 кв и выше — эффективно заземленную нейтраль (см. табл. В-1). Такая практики объясняется следующим. Сети до 35 кв имеют невысокую изоляцию, и в этих сетях замыкания на землю относительно часты; чтобы предотвратить частые автоматические отключения и повреждения от больших токов целесообразно разземлять нейтрали этих сетей. С другой стороны, возможные длительные повышения напряжения на фазах до линейного и обусловленное с этим явлением повышение изоляции не приводят к существенному удорожанию сетей.

В сетях 110 кв и выше стоимость изоляции резко возрастает с ростом номинального напряжения, и в этих сетях изоляционная проблема диктует необходимость всемерно ограничивать возможные повышения напряжения, т. е. применять эффективно заземленную нейтраль. В некоторых европейских странах еще недавно повсеместно использовалось резонансное заземление нейтрали. Но с внедрением напряжений 220 кв и выше выгоды заземленной нейтрали оказались столь явными, что область резонансно заземленной нейтрали была ограничена напряжением 110 кв. В США сети всех напряжений, за редким исключением, имеют эффективно заземленную нейтраль.

В сетях переменного тока с эффективно заземленной нейтралью сколь угодно длительно может воздействовать наибольшее рабочее фазное напряжение U_{Φ} (см. табл. В-1). В переходных режимах возникают кратковременные, длительностью от десятых долей секунды до минут, повышения напряжения рабочей частоты. Обычно эти повышения напряжения не превышают 1,2—1,4 U_{Φ} , но в резонансных схемах возможны и существенно бо́льшие резонансные перенапряжения. В частности, возможны резонансные перенапряжения на высших и низших гармониках.

При коммутациях в сети — включении и отключении элементов сети (линий, трансформаторов, реакторов), коротких замыканиях возникают так называемые коммутационные перенапряжения или коммутационные импульсы. Эти перенапряжения могут иметь кратность по отношению к U_{Φ} до 2,5—3. Длительность коммутационных перенапряжений порядка долей миллисекунды до десятков миллисекунд (*мсек*). Бо́льшие значения относятся к коммутациям длинных линий.

Грозовые разряды вблизи линий и особенно непосредственно поражающие линии ведут к возникновению волн (импульсов) атмосферных или грозовых перенапряжений. Амплитуды грозовых волн ограничены только уровнем изоляции линий, и. следовательно, грозовые перенапряжения опасны для сетей практически любого номинального напряжения, если только не приняты специальные меры грозозащиты. Длительность атмосферных перенапряжений порядка десятков микросекунд (*мксек*).

В сетях переменного тока с незаземленной нейтралью (изолированной или резонансно заземленной) допускается длительное повышение напряжения на фазах до линейного напряжения $V\bar{3}U_{\Phi}$. Соответственно более высокими оказываются и кратности внутренних напряжений резонансных и коммутационных. Повышаются также кратности атмосферных перенапряжений, воздействующих на изоляцию подстанционного оборудования.

В электропередачах постоянного тока высокого напряжения на изоляцию полюса воздействует рабочее выпрямленное напряжение положительной или отрицательной полярности. В переходных процессах возникают перенапряжения колебательного характера. Благодаря сеточному регулированию длительность этих перенапряжений ограничивается десятыми долями секунды. Атмосферные перенапряжения имеют в основном те же характеристики, что и в сетях переменного тока.

Изоляция электрических установок должна быть вполне надежной при воздействии рабочего напряжения (переменного или постоянного) и должна противостоять всем видам перенапряжений. С другой стороны, возможно ограничение перенапряжений с целью снижения уровней изоляции. Обе указанные проблемы являются основными в технике высоких напряжений (ТВН). Соответственно курс ТВН разделен на две части. В первой части (ТВН-1) изучаются проблемы, относящиеся к конструпрованию, технологии, испытаниям и эксплуатации изоляции электрических установок. Во второй части (ТВН-2) изучаются возникновение перенапряжений в электрических сетях и методы их ограничения.

Задачей ТВН-1 является, в конечном счете, создание изоляционных конструкций, обладающих рациональными в технико-экономическом отношении уровнями изоляции. Под уровнем изоляции понимают значения испытательных напряжений, которые эти элементы сетей выдерживают без повреждения. Испытательные напряжения в свою очередь выбираются исходя из тех воздействующих перенапряжений (воздействий), которым подвергаются элементы сети в эксплуатации.

Задачей ТВН-2 является изучение форм и величин перенапряжений и разработка способов их ограничения до уровней, при которых нарушения изоляции элементов сетей становятся редким явлением, в той мере, в которой это диктуется технико-экономическими соображениями.

Из изложенного видно, что обе части ТВН тесно увязаны между собой и полное решение проблем той или другой части должно проводиться во взаимной связи. В настоящем учебном пособии обе части ТВН излагаются в семи разделах и 28 главах.

Электрическая прочность изоляции может быть нарушена под действием высокой напряженности электрического поля. Поэтому изучение пространственного распределения напряженности поля необходимо для выполнения любой изоляционной конструкции. Характеристика электрических полей в высоковольтных изоляционных конструкциях, в однородной и неоднородных средах дается в первом разделе книги (гл. 1 и 2).

В изоляционных конструкциях используется газовая, обычно воздушная, среда, твердые, жидкие и комбинированные диэлектрики. Техника высоких напряжений изучает свойства изоляции прежде всего под углом зрения ее электрической прочности в реальных полях, а также эксплуатационные характеристики этой изоляции и методы ее нопытания. Во втором разделе книги (гл. 3—6) изучаются физические основы ионизационных процессов в газах, протекание газового разряда на всех его стадиях, начиная с элементарных ионизаций и кончая искровым и дуговым разрядами в промежутке. На основе изученных закономерностей излагаются технические характеристики разрядных напряжений промежутков при грозовых и коммутационных импульсах, при напряжении рабочей частоты и выпрямленном напряжении. Наряду с разрядом в чисто газовых промежутках рассматривается газовый разряд по поверхности твердых диэлектриков, а именно по поверхности изоляторов, выходящих в газовую, обычно воздушную, среду.

В третьем разделе книги (гл. 7—8) изучаются характеристики твердой, жидкой и комбинированной изоляции, применяемой в высоковольтных изоляционных конструкциях. Рассматриваются различные формы разряда в изоляции, эксплуатационные характеристики и методы испытания изоляционных конструкций.

В четвертом и пятом разделах рассматриваются основные изоляционные конструкции электроэнергетических систем, условия их эксплуатации и испытания. Раздел четвертый (гл. 9—12) посвящен линиям электропередачи, воздушным и кабельным. Изучаются характеристики и правила выбора изоляции воздушных линий, условия коронирования на проводах и выбор проводов по условиям потерь на корону и радиопомехам, дуговые замыкания в системах с заземленной и изолированной нейтралью, гашение дуг в этих системах с помощью автоматического повторного включения (АПВ) и дугогасящих катушек. Отдельная глава посвящена конструкциям кабельных линий, методам их испытаний и характеристике дуговых замыканий в кабельных линиях.

В разделе пятом (гл. 13—16) дается описание изоляционных конструкций — станционных изоляторов различного назначения, выключателей, трансформаторов тока, конденсаторов, силовых трансформаторов и генераторов. Описанию всех этих конструкций предшествует глава, посвященная координации изоляции, т. е. выбору испытательных напряжений оборудования на основе допустимых воздействующих перенапряжений. При описании изоляционных конструкций силовых трансформаторов и генераторов излагаются переходные процессы, возникающие в обмотках при воздействии импульсов; протекание этих процессов непосредственно влияет на построение изоляционных конструкций обмоток. На этом заканчивается первая часть книги.

Вторая часть книги, содержащая два раздела, посвящена изучению перенапряжений. В шестом разделе (гл. 18—24) рассматриваются атмосферные перенапряжения. В первую очередь излагаются методы анализа переходных процессов в линиях и схемах при грозовых импульсах, далее — характеристики молнии и средств защиты от грозовых перенапряжений — молниеотводов (и заземлителей) и разрядников. На основе изученного материала дается анализ методов и схем грозозащиты линий, подстанций и вращающихся машин. В седьмом разделе (гл. 25—28) рассматриваются внутренние перенапряжения. Так же как и в предыдущем разделе, в первую очередь излагаются общие методы анализа переходных и установившихся процессов, возникающих при развитии внутренних перенапряжений. Далее излагаются различные виды внутренних перенапряжений — коммутационные, дугового замыкания на землю, резонансные. Одновременно приводятся методы и устройства по ограничению перенапряжений.

Для наглядности структура курса со связями между разделами показана графически на рис. В-4 (раздел «Испытательные установки и



Рис. В-4. Структура курса ТВН.

измерения на высоком напряжении» не включен в это учебное пособие). Книга завершается заключением, в котором приводятся соображения по основным современным проблемам ТВН в электроэнергетике.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ТВН — техника высоких напряжений;

- ВЛ воздушная линия электропередачи;
- п/ст. подстанция:
- ПУЭ правила устройства электроустановок;

- ТЭС тепловая электростанция; ГЭС гидроэлектростанция; РУ распределительное устройство; руководящие указания;
- ОРУ -- открытое РУ;
- ЗРУ закрытое РУ:
- АПВ автоматическое повторное включение;
- ТАПВ --- трехфазное АПВ;
- ОАПВ однофазное АПВ;
 - ЦВМ цифровая вычислительная машина;
 - АВМ аналоговая вычислительная машина;
 - СВН сверхвысокие напряжения;
 - УПК устройство продольной компенсации;
- ток к. з. ток короткого замыкания;
 - с. в. н. скорость восстанавливающегося напряжения;
- э. д. с. электродвижущая сила;
- п. у. м. прямой удар молнии;
- в. а. х. вольт-амперная характеристика;
 PB разрядник вентильный;

 - РТ разрядник трубчатый;
 - ПЗ промежуток защитный
 - СПЗ стабилизированный ПЗ;
 - ИП искровой промежуток;
 - в. ч. высокочастотный;
 - ШР шаровой разрядник;
 - В выключатель;
 - ГИН генератор импульсных напряжений;
 - ГИТ генератор импульсных токов;
 - ГКВ генератор коммутационных волн.

Сокращенные обозначения институтов

- МЭИ Московский энергетический институт (Москва);
- ВЭИ Всесоюзный электротехнический институт имени В. И. Ленина (Москва);
- ЭНИН Энергетический институт имени Г. М. Кржижановского (Москва);
- ВНИИЭ Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики (Москва);

ЛПИ, ХПИ, УПИ, КПИ, ТПИ — Ленинградский, Харьковский, Уральский, Киевский,

- Томский политехнические институты; НИИПТ - Научно-исследовательский институт постоянного то
 - ка (Ленинград):
- СибНИИЭ Сибирский научно-исследовательский институт элек
 - троэнергетики (Новосибирск);

ВНИИКЭ — Всесоюзный научно-исследовательский институт комплексного электрооборудования (Ереван).

Обозначения индексов

р — разрядное; ср — сухоразрядное; мр — мокроразрядное; к — коммутационный; и — импульсное (грозового происхождения), а также ионизации; ~ — рабочей частоты; = — выпрямленное; ф — фазное; мф — междуфазное; л — линейное; пр — прочность, пробивное, а также проводимость; о, н — исходное, начальное; ∞, пр — установившееся, принужденное; о — свободная составляющая, удельное значение; м. макс — максимум; мин — минимум; з — заземление; исп — испытательное; 1, 2, 0 — прямой, обратной, нулевой последовательности, *i*, *k*, *n* — счетные индексы.

Часть первая ИЗОЛЯЦИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТАНОВКАХ

Изоляция токоведущих частей электрических установок может быть газовой, твердой, жидкой или комбинированной. Естественная газовая изоляция — это воздушная изоляция; атмосферный воздух обладает электрической прочностью, позволяющей использовать воздушную изоляцию вплоть до высших рабочих напряжений при условии достаточно больших расстояний между электродами. В машинах, аппаратах, изоляторах, кабелях, конденсаторах, где изоляционные расстояния должны быть невелики, для сохранения приемлемых габаритов устройств применяется твердая, жидкая или газовая изоляция (последняя — в виде воздуха под большим давлением, вакуума, специальных высокопрочных газов). Обычно изоляция имеет комбинированный характер с твердой и жидкой или твердой и газовой составляющими. Твердая изоляция используется также в качестве конструкционного материала, а жидкая — в качестве охлаждающей среды.

Изоляция устройств высокого напряжения с одним и тем же диэлектриком во всем объеме называется однородной. Строго говоря, однородной благодаря явлению диффузии является только газовая изоляция. В твердой и жидкой изоляции всегда имеются включения или примеси, которые создают местные неоднородности. Однако в среднем в больших объемах эту изоляцию часто также рассматривают как однородную. Комбинированная изоляция, как правило, является неоднородной.

Глава первая

электрические поля в однородной среде

1-1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

При подаче напряжения на токоведущие части электрической установки в окружающем пространстве возникает электрическое поле. При прохождении по токоведущим частям тока в окружающем пространстве возникает магнитное поле. При тех частотах, с которыми обычно имеют дело в ТВН, электрические и магнитные поля практически не связаны между собой, т. е. к ним в каждый данный момент применимы законы электростатических и магнитостатических полей. Основной характеристикой электрического поля служит вектор напряженности поля E. Если напряженность поля E превысит значение электрической прочности $E_{\rm пр}$, то в данном месте возникнет ионизация. Следовательно, напряженность поля E характеризует возможность возникновения ионизации и в конечном счете пробоя изоляции.

Направления векторов Е в электрическом поле изображаются силовыми линиями. Так называются линии, в каждой точке которых вектор E направлен по касательной. В неравномерном поле Е изменяется от точки к точке. Линейный интеграл Е вдоль силовой линии между двумя точками 1 и 2 равен напряжению U_{12} или разности потенциалов φ между этими точками:

$$\int_{\Gamma}^{2} \mathbf{E} \, d\mathbf{I} = U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \qquad (1-1)$$

где dl — элемент длины силовой линии.

Потенциал точки есть напряжение этой точки относительно земли (потенциал земли принят равным нулю). В ТВН часто говорят о напряжении электрода (например, о напряжении провода), помня при этом, что речь идет о напряжении относительно земли.

Напряженность поля Е в заданной точке равна скорости изменения потенциала, т. е. падению напряжения на единицу длины вдоль силовой линии, и направлена в сторону снижения потенциала. Это выражается равенством

$$\mathbf{E} = - \frac{d\varphi}{dl} \,\mathbf{n},\tag{1-2}$$

где п — единичный вектор, направленный по силовой линии поля в данной точке.

Поверхности равного потенциала φ называются эквипотенциальными поверхностями. Силовые линии нормальны к этим поверхностям. Поверхности электродов являются эквипотенциальными поверхностями. Обычно, рисуя на листе бумаги поле электродов, наносят следы эквипотенциальных поверхностей через заданный перепад потенциала $\Delta \varphi$. Силовые линии нормальны к эквипотенциальным поверхностям. Обычно силовые линии рисуются так, чтобы число силовых линий на единицу площади эквипотенциальной поверхности было в среднем равно Е в данной точке поля. Образующиеся при этом трубки называют силовыми трубками электрического поля. Вдоль силовой трубки постоянен вектор смещения **D**. Графическое изображение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий согласно приведенным правилам называют формой или картиной поля.

Электрическое поле создается по крайней мере двумя электродами, на которых заканчиваются силовые линии. Однако в некоторых случаях удобно рассматривать поле одиночного электрода. Это возможно в тех областях пространства, где форма поля зависит в основном только от конфигурации одного электрода. Например, изучая форму поля вблизи провода воздушной линии электропередачи, можно провод рассматривать как одиночный электрод, удаленный от других проводов и земли на «бесконечное» расстояние.

Рассчитать поле при заданном напряжении между электродами означает найти в общем виде или численно значения потенциалов и напряженности поля в произвольной точке поля с координатами x, y, z. Зная $\varphi(x, y, z)$, можно по формуле (1-2) найти E(x, y, z) и наоборот. Расчеты полей в диэлектриках основываются на теоремс Гаусса или уравнении Лапласа.

1-2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЯ

Электрические поля разделяют на равномерные и неравномерные. Равномерные поля обладают тем свойством, что вдоль их силовых линий напряженность поля постоянна. Например, равномерным является поле в средней части плоского конденсатора. В неравномерных полях Е изменяется вдоль силовых линий; однако на отдельных участках неравномерных полей поле может оказаться практически равномерным. По степени неравномерности поля разделяют на слабонеравномерные и резконеравномерные. Слабонеравномерным можно назвать поле, в котором напряженность изменяется вдоль силовых линий не более чем в 2—3 раза. Типичным примером слабонеравномерного поля является поле между шарами шарового разрядника, между жилой и оболочкой кабеля. Резконеравномерным полем называется поле, в котором напряженность Е изменяется вдоль силовых линий на несколько порядков. В электроэнергетических установках большинство полей является резконеравномерным. Это поля между проводом и землей или опорой воздушных линий, поля в проходных изоляторах и других конструкциях.

Степень неравномерности поля связана с геометрическими характеристиками электродов. Неравномерность поля возрастает с увеличением отношения расстояния между электродами *d* к наименьшему радиусу их кривизны *r*.

Электрические поля можно также подразделить на симметричные и несимметричные. К симметричным относятся поля между электродами одинаковых формы и размеров. Симметрично поле плоского конденсатора, поле между двумя проводами или стержнями (независимо от степени неравномерности поля). Несимметричными называются поля между электродами различной формы, например поле между проводом и землей, электродом и фланцем изолятора. Наиболее резкой несимметрией обладает поле стержень—плоскость; значительно меньше несимметрия поля между проводом и опорой и т. п. Чем меньше разнятся радиусы кривизны электродов, тем меньше и несимметрия поля.

Из встречающихся на практике разнообразных видов полей могут быть выделены имеющие широкое распространение плоскопараллельные и плоскомеридианные поля. Плоскопараллельными называются поля, форма которых одинакова в параллельных плоскостях, называемых плоскостями поля. Плоскопараллельным является поле воздушной или кабельной линии. Плоскости поля в данном случае перпендикулярны сси линии. Плоскопараллельными могут быть как равномерные, так и неравномерные поля. Плоскомеридианными называются поля, эквипотенциальные поверхности которых, в том числе поверхности электродов, образуют тела вращения. Плоскомеридианное поле всегда неравномерно. Плоскомеридианные поля характерны для многочисленных конструкций ТВН, например изоляторов, стержневых электродов и т. д.

1-3. ОБЩИЕ СВОИСТВА И ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПОЛЕИ

Для упрощения расчета и изображения полей наряду с основными уравнениями поля используются некоторые общие принципы, излагаемые ниже.

Принцип симметрии. Для ряда простейших электродов форма поля определяется непосредственно соображениями симметрии. Так, например, этот принцип может быть использован для построения поля изоли-

1

рованного шарового и цилиндрического электродов; эквипотенциальные поверхности этих полей имеют также шаровую или цилиндрическую форму, а силовые линии радиальны.

В полях, обладающих центральной или осевой симметрией, на шаровых или цилиндрических поверхностях S вектор E постоянен по величине и нормален (перпендикулярен) к этим поверхностям. Для этих полей уравнение Гарса можно записать в форме

$$ES = \frac{1}{s'\varepsilon_0} q = \frac{1}{s} q. \tag{1-3}$$

Для шара $S = 4\pi r_o^2$. Следовательно, напряженность поля на расстоянии $r > r_0$ от центра шара равна:

$$E_r = \frac{q}{e \cdot 4\pi r^2},\tag{1-4}$$

где q — заряд шара.

Для цилиндра $S=2\pi r$ на единицу длины электрода. Следовательно, напряженность поля на расстоянии r от оси цилиндра равна:

$$E_r = \frac{q}{\epsilon \cdot 2\pi r},\tag{1-5}$$

где *q* — заряд цилиндра на единицу длины, называемый удельным зарядом электрода.

С Заметим, что в формулы (1-4) и (1-5) не входит радиус шара или шилиндра. Следовательно, поле заряженного шара или цилиндра совпадает (вне электродов) с полем точечного заряда или заряженной оси, несущих тот же заряд и расположенных в центре шара или на оси цилиндра.

Эффект близости В общем случае распределение зарядов, а следодовательно, и напряженности поля на электродах зависит не только от формы данного электрода, но и от взаимного расположения и формы всех электродов в заданной системе. Так, например, распределение зарядов на поверхности двух близко расположенных шаровых электродов существенно зависит от расстояния между электродами. Указанное влияние называется эффектом близости.

Во многих случаях эффектом близости можно пренебречь. Так, например, на воздушных линиях, где радиусы проводов много меньше расстояния между проводами, заряды на проводах распределены, как на изолированных в пространстве электродах, а следовательно, при расчете напряженности поля заряды на проводах можно считать сосредоточенными на оси проводов. Такая возможность значительно упрощает расчеты полей.

Принцип наложения. Поле системы линейных зарядов заряженных осей рассчитывается путем векторного суммирования напряженностей E_k или скалярного суммирования потенциалов φ_k , создаваемых зарядами q_k (k — порядковый номер заряда).

Рассмотрим в качестве примера поле двух проводов (рис. 1-1), между которыми приложено напряжение U. Очевидно, что заряды на проводах равны по абсолютной величине и противоположны по знаку. Предполагаем, что эффектом близости проводов можно пренебречь и, следовательно, заряды можно считать сосредоточенными на оси провода. Тогда по формуле (1-5) в каждой точке пространства можно найти векторы напряженности E_1 и E_2 , создаваемые зарядами +q н -q, как это показано на рис. 1-1. Складывая векторно E_1 и E_2 , можно построить полную картину поля, показанную на рис. 1-1.

Принцип зеркального отображения. Если электрическое поле создается системой электродов в пространстве, ограниченном бесконечной проводящей плоскостью, то для расчета искомого поля проводящая плоскость может быть замещена фиктивной системой электродов, зеркально отображающей истинную систему. Этот принцип позволяет, например, легко найти поле электродов провод—земля (земля является проводящей плоскостью). На рис. 1-1 в качестве такой системы можно представить провод 1 и плоскость OO'. Строя зеркальное отображение провода (провод 2 на рис. 1-1), мы получаем систему из двух проводов с зарядами +q и -q, электрическое поле которых находится методом наложения. Фиктивное поле в нижнем полупространстве далее не принимается в расчет; истинное поле заканчивается на проводящей плоскости. Аналогично может быть найдено поле системы проводов, расположенных над землей.



Рис. 1-1. Электрическое поле двух проводов с удельными зарядами +q и -q.

Принцип зеркального изображения используется не только дли проводящих плоскостей, но и для шаровых и цилиндрических поверхностей. Однако в этих случаях, как и при изображении предметов в кривом зеркале, построение зеркального изображения оказывается более сложным.

Свойства эквипотенциальных поверхностей электрического поля. Поверхность электродов является эквипотенциальной поверхностью. Наоборот, любую эквипотенциальную поверхность можно без искажения поля представить в виде тонкого проводящего листа — промежуточного электрода.

Так как электроды являются эквипотенциальными поверхностями, то форма эквипотенциальных поверхностей в диэлектрике плавно пере-

ходит от формы одного электрода к форме другого. Это видно, например, из картины поля, показанной на рис. 1-1. Указанная особенность может служить для ориентировочного построения формы поля двух электродов.

Связь напряженности поля с кривизной эквипотенциальных поверхностей. Краевой эффект. Напряженность поля на какой-либо эквипотенциальной поверхности наибольшая в местах наибольшей кривизны этой поверхности. В частности, это относится и к поверхности электродов.

Напомним, что кривизна k в какой-либо точке кривой на плоскости есть величина, обратная радиусу кривизны кривой r. Кривизна k в какой-либо точке поверхности (в данном случае — эквипотенциальной поверхности) есть сумма кривизны $k_x = 1/r_x$ и $k_y = 1/r_y$ в двух ортогональных плоскостях, проходящих через рассматриваемую точку.

Наибольшей кривизной обладают обычно края электродов. Возрастание напряженности поля в этих местах называется краевым эффек-



Рис. 1-2. Поле уединенного электрода.

том. Напряженность поля пропорциональна поверхностной плотности зарядов на электродах. Поэтому заряды также концентрируются в местах наибольшей кривизны электродов.

Выведем уравнение, позволяющее количественно связать напряженность поля с кривизной эквипотенциальных поверхностей, включая поверхность электрода. В простейших случаях шаровых и цилиндрических электродов эта связь выражается простыми формулами (1-4) и (1-5). Для того чтобы найти эту связь в общем случае, рассмотрим уединенный электрод произвольной формы (рис. 1-2). В электростатике установлено, что у поверхности электрода относительная скорость снижения напряженности поля вдоль силовой линии равна кривизне электрода $k_x + k_y$ в данной точке. Эта связь записывается уравнением

$$-\frac{dE}{dn}: E_{d} = k_{x} + k_{y}$$

или

$$-\frac{dE}{E} = (k_x + k_y) \, dn = k \, dn.$$

Это уравнение пригодно не только для поверхности электрода, но и для любой эквипотенциальной поверхности.

Интегрируя это уравнение вдоль силовой линии, получаем:

$$E_0 = E_s e^{\int_0^{t} k \, dn} , \qquad (1-6)$$

где E_0 и E_s — напряженности поля в точке 0 на поверхности электрода и в некоторой точке *s* вдоль силовой линии.

При значительном удалении точки s от электрода поле приближается к полю точечного заряда, эквипотенциали которого имеют вид сфер. Обозначив через s_{∞} радиус сферы, на которую попала точка s, имеем:

$$E_{\infty} = \frac{q}{\epsilon \cdot 4\pi s_{\infty}^2}.$$

Как следует из формулы (1-6), Е возрастает вдоль силовой линии при приближении к электроду, причем Е максимально вдоль той силовой линии, вдоль которой кривизна k на эквипотенциальных поверхностях максимальна. Следовательно, абсолютное значение E на поверхности электрода зависит не только от кривизны этой поверхности, но и

от кривизны эквипотенциальных поверхностей вдоль силовой линии, исходящей от рассматриваемой точки электрода.

В высоковольтных конструкциях стремятся всемерно снижать кривизну электродов, что ведет к снижению напряженности поля в изоляции. Особенно это касается конструкций, работающих в наиболее напряженных условиях, например в высоковольтных генераторах. Провода ошиновки, в частности в высоковольтных лабораториях, нередко выполняются со специальными шаровыми наконечниками. Это делается для снижения напряженности поля в этих местах с целью устранения разрядов.

Сравним максимальные напряженности поля двух форм электродов, показанных на рис. 1-3,a и б. Хотя кривизна электродов в точке 0 у обоих электродов и одинакова, у электрода на рис. 1-3,6 напряженность поля в этой точке и особенно вблизи точки 0 существенно ниже, чем у электрода на рис. 1-3,a. Это объясняется тем, что кривизна эквипотенциальных поверхностей у электрода на рис. 1-3,6 быстро сглаживается, что, как следует из





а — без экрана; б — с экраном.

формулы (1-6), и ведет к снижению *E*. Подобный результат можно истолковать таким образом, что плоскость за выступающим стержнем служит экраном, выравнивающим поле в промежутке. Это свойство частичного экранирования, заключающееся в выравнивании эквипотенциальных поверхностей вблизи электрода (если нельзя снизить кривизну самого электрода), часто используется в изоляционных конструкциях для снижения напряженности поля.

Выше рассматривались поля вблизи выступающих участков поверхности электродов и эквипотенциальных поверхностей, обладающих положительной нормалью *n*. Вогнутые участки поверхности электродов и эквипотенциальных поверхностей обладают отрицательной нормалью *n*. Распознать знак нормали можно по следующему признаку: если направление нормали *n* совпадает с направлением вектора кривизны эквипотенциальной поверхности, то *n* — положительно, и наоборот.

Как видно из формулы (1-6), при отрицательном n напряженность *Е* вдоль силовой линии снижается при приближении к электроду, причем тем в большей степени, чем больше абсолютное значение кривиз-



Рис. 1-4. Электрическое поле у внутреннего угла электрода.

ны k. Так, например, поле у внутреннего угла электрода, показанного на рис. 1-4, очень слабое.

Идеализация реальных полей. Электрические поля рассчитываются в основном аналитическими или, в более редких случаях, графическими методами. Строгое аналитическое решение с помощью разнообразных и весьма изящных методов теории потенциальных полей возможно, однако, только для электродов относительно простой формы. Это приводит к необходимости идеализации реальных полей и электродов: реальные электроды заменяются такими, поля которых доступны расчету и в то же время достаточно близки к действительным. Так, например, реальный провод с негладкой поверхностью замещается цилиндрическим, резконеравномерные и резконесимметричные поля реальных электродов замещаются полем электродов стержень — плоскость, причем форма стержня задается аналитической функцией, которая позволяет рассчитать поле.

В следующих параграфах изучаются свойства типовых полей, встречающихся в технике высоких напряжений.

1-4. ПОЛЯ ПРОСТЕЙШИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Поле плоского конденсатора. Напряженность поля плоского конденсатора (рис. 1-5) E = U/d, а емкость $C = \varepsilon \frac{S}{d}$, где S — площадь обкладки конденсатора. У краев конденсатора поле искажается так,



Рис. 1-5. Поле плоского конденсатора. *а* - с острыми краями; *б* - с закругленными краями.

как это показано на рис. 1-5, а. На расстояниях от края, превышающих d, поле в конденсаторе уже практически равномерно. Чтобы напряженность поля на краях не превышала напряженности равномерного поля, необходимо скругление краев с радиусом кривизны $r \ge d$ (рис. 1-5, d).

Равномерное плоское поле имеет место в изоляции паза мощных вращающихся машин. Напряженность поля в средней части паза может быть рассчитана по формуле плоского конденсатора. Максимальных значений напряженность поля достигает на углах проводника. Для того чтобы достигнуть равнопрочности пазовой изоляции на всех ее участках, края проводника закругляются с радиусом кривизны *г*.

Поле цилиндрического конденсатора. Цилиндрический конденсатор показан на рис. 1-6. Поле в средней части такого конденсатора имеет плоскопараллельную структуру. Краевой эффект ослабляется скруглением краев внешнего цилиндра и устройством охранных электродов. Структура поля в цилиндрическом конденсаторе и вблизи проводов воздушных линий передачи практически совпадает. Ввиду этого цилиндрические конденсаторы применяются в высоковольтных лабораториях для исследования полей и ионизационных процессов вблизи проводов. Поле цилиндрического конденсатора подобно также полю коаксиального кабеля и полю проходного изолятора на некоторых его участках.



Рис. 1-6. Цилиндрический конденсатор и его электрическое поле.

Предположим, что на внутреннем и внешнем электродах цилиндрического конденсатора сосредоточены заряды +q и -q. Заряды, расположенные на внешнем цилиндре, не создают поля внутри этого цилиндра; поэтому поле в конденсаторе полностью совпадает с полем изолированного внутреннего цилиндра [см. формулу (1-5)].

Обычно известны не заряды, а напряжение или разность потенциалов между электродами U. Связь напряженности поля с напряжением U выражается формулой $(r_1 < r < r_2)$

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}},\tag{1-7}$$

где E_r — напряженность поля на расстоянии r от оси внутреннего цилиндра. Напряженность максимальна у поверхности внутреннего цилиндра (провода):

$$E_{\rm M} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}.$$
 (1-8)

С ростом *r* напряженность поля спадает по гиперболическому закону: $E_r: E_M = r_1: r$.

Если задаться неизменным значением r_2 и изменить r_1 , то зависимость E_{r1} от r_1/r_2 будет иметь вид, показанный на рис. 1-7. Вначале при возрастании r_1 напряженность E резко спадает вследствие снижения кривизны внутреннего электрода. Затем проявляется и противоположная тенденция — повышение Е вследствие снижения расстояния между электродами. При $r_1 > r_{10\pi T}$ этот фактор начинает превалировать и возникает, вначале медленное, а затем при r_1 , близких к r_2 , быстрое возрастание E_{r1} . Оптимальное значение r_1 , при котором E_{r1} минимально, определяется формулой

$$\frac{r_{100T}}{r_2} = \frac{1}{e} \ (e = 2, 7...).$$

Это соотношение может быть, например, использовано для выбора радиуса внутреннего электрода в проходных изоляторах. Следует, однако, заметить, что в реальных конструкциях снижение *E* обычно достигается другими, более экономичными методами.



Рис. 1-7. Зависимость максимальной напряженности поля в цилиндрическом конденсаторе от отношения радиусов его цилиндров. При расчете принято $U = 10 \ \kappa s$, $r_2 = 10 \ c m$.

На основе формул (1-5) и (1-7) можно найти формулу для удельной емкости цилиндрического конденсатора:

$$C_{0} = \frac{q}{U} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\frac{r_{a}}{r_{1}}} = 55.5 \frac{\epsilon'}{\ln\frac{r_{a}}{r_{1}}}, \ ngb/m.$$
(1-9)

В изоляционных конструкциях часто создаются коаксиальные цилиндрические конденсаторы, у которых расстояние между электродами мало по сравнению с раднусами цилиндров. Поскольку $r_2 = r_1 + \delta$, где δ — малая величина, напряженность E_{r1} близка к E_{r2} . Это означает, что поле в таких конденсаторах близко к равномерному и, следовательно, удельную емкость можно вычислять по формуле плоского конденсатора:

$$C_{o} = \varepsilon \frac{S}{\delta} = \varepsilon \frac{2\pi r}{\delta}, \qquad (1-10)$$

где следует принять

$$r=\frac{r_1+r_2}{2}.$$

1-5. ПРОВОДЯЩИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ИЗОЛЯЦИИ

Изолированный электрод, помещенный в электрическое поле, искажает это поле вследствие разделения индуктированных зарядов на поверхности электрода (рис. 1-8,*a*). В новом результирующем поле поверхность электрода является эквипотенциальной поверхностью, а силовые линии нормальны к этой поверхности. Распределение на-







Рис. 1-8. Искажение равномерного поля при внесении в него электрода. *а* — изолированного: *б* — заземленного.

пряженности поля на электроде связано с кривизной его поверхности. В местах большой кривизны, например на остриях, напряженность поля резко возрастает. Поэтому при внесении во внешнее слабое поле электродов с заостренными краями или выступами напряженность в поле может возрасти до недопустимых значений.

Строгое решение задачи найдено, в частности, для напряженности поля на поверхности шара и цилиндра (провода), внесенных в равномерное поле напряженности E₀. Максимальная напряженность поля на поверхности шара

$$E_{\rm M} = 3E_0$$

а на поверхности цилиндра (провода)

$$E_{\rm M} = 2E_{\rm Q}$$

В обоих случаях $E_{\rm M}$ направлено по вектору E_0 .

Интересно отметить, что в указанных случаях $E_{\rm M}$ не зависит от радиуса шара и цилиндра. Это обясняется тем, что с уменьшением радиуса снижается также момент диполя, образованного индуктированными зарядами.

До сих пор шла речь о напряженности поля на поверхности изолированных электродов шара и провода. Иногда интересуются потенциалом, который приобретают изолированные электроды во внешнем поле. Если размеры этих электродов настолько малы, что их можно счи-

тать расположенными на одной эквипотенциальной поверхности поля, то изолированный электрод пассивно приобретает потенциал данной эквипотенциальной поверхности. Дипольные заряды, наведенные на изолированном электроде, создают достаточно сильное местное поле, усиливающее или ослабляющее напряженность поля на поверхности электродов; но это местное поле не в состоянии, при условии малых размеров изолированного электрода, изменить потенциал данной точки поля.

При внесении в равномерное поле заземленного электрода наблюдается более резкое возрастание напряженности поля у этого электрода (рис. 1-8,б), обусловленное стеканием в землю зарядов, ослабляющих поле у электрода (на рис. 1-8,б это положительные заряда). Потенциал электрода при заземлении равен, естественно, нулю.

1-6. НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ОДИНОЧНЫХ И РАСЩЕПЛЕННЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Провода линий передачи при изучении их электрического поля представляются цилиндрическими электродами. Негладкость поверхности проводов учитывается коэффициентом, значение которого будет указано в дальнейшем.

Линии электропередачи напряжением до 220 кв включительно выполняются обычно одиночными проводами, т. е. каждая фаза линии состоит только из одного провода. Расстояние d между проводами (фазами) много больше радиуса проводов ro. Если задан удельный заряд q на проводе, то электрическое поле вблизи провода может рассчитываться, как для изолированного цилиндра в пространстве. В частности, напряженность поля на поверхности провода вычисляется по формуле

$$E = \frac{q}{e_0 \cdot 2\pi r_0} = 0.018 \frac{q}{r_0}, \ \theta/cM,$$
(1-11)

где $q - в n \kappa / m; r_0 - в C M (e'=1).$

На линиях передачи сверхвысокого напряжения (СВН) на каждой фазе подвешивается пучок, состоящий из двух, трех или четырех отдельных проводов, располагаемых на некотором расстоянии друг от друга. Это



Рис. 1-9. Расположение расщепленных проводов в пучке.





так называемые расщепленные провода. Все провода в пучке находятся под одним потенциалом, и напряжение линии приложено только между фазами (пучками проводов) и фазой и землей.

Обычно расщепленные провода располагаются симметрично на периметре окружности радиусом R (рис. 1-9), причем расстояние между проводами a на порядок превышает радиус проводов r_0 . Если число проводов в пучке равно n, то соседние провода разделены дугой окружности, равной $2\pi/n$ радианов. Провода удерживаются в заданном расположении распорками, устанавливаемыми через каждые несколько десятков метров вдоль линии.

Изучим поле на поверхности расщепленных проводов, если задано, что удельный заряд всего пучка проводов равен q. Вследствие симметричного расположения проводов в пучке заряд каждого провода равен q/n. Для расчета поля вблизи проводов используем принцип наложения. Поле каждого провода в отсутствие остальных определяется по формуле (1-5). Поле всей системы проводов находится векторным суммированием отдельных составляющих в каждой точке пространства. На рис. 1-10 приведена картина поля расщепленных проводов. Максимальные напряженности на поверхности проводов возникают с внешней стороны пучка проводов, минимальные — с внутренней стороны.

Средняя напряженность поля на поверхности расщепленных проводов находится по формуле

$$E_{\rm cp} = 0.018 \, \frac{q}{nr_{\rm o}}.\tag{1-12}$$

Напряженность поля на поверхности, соответствующая углу θ (рис. 1-9), выражается с точностью до r_0^2/a^2 формулой

$$E_{\theta} = E_{cp} \left(1 + \beta \frac{r_{\theta}}{a} \cos \theta \right), \qquad (1-13)$$

где коэффициент

$$\beta = 2(n-1)\sin\frac{\pi}{n}.$$

В этих формулах n — число проводов в пучке, r_0 — радиус провода, a — расстояние между проводами (шаг расщепления). В точке $\theta = 0$ E_{θ} максимально

$$E_{\text{Make}} = k E_{e_{i}}, \qquad (1-14)$$

где $k = 1 + \beta \frac{r_0}{a}$. В точке $\theta = \pi E_{\theta} = E_{MRH} = E_{cP} \left(1 - \beta \frac{r_0}{a} \right)$. Значения коэффициентов β и k для двух, трех и четырех проводов в пучке приведены в табл. 1-1.

Расчеты по приведенным формулам показывают, что напряженности поля на поверхности проводов снижаются с увеличением числа про-Таблица 1-1

Значения коэффициентов β и k и эквивалентного радиуса r_э для расщепленной фазы

Число проводов в фазе п	2	3	4
Коэффициент β	2	2 √ 3	3√2
Коэффициент k	$1+2\frac{r_0}{a}$	$1+2\sqrt{3}\frac{r_0}{a}$	$1+3\sqrt{2}\frac{r_0}{a}$
Эквивалентный радиус г.	$\sqrt{r_0 a}$	Vroa2	$\sqrt[4]{\sqrt{2}r_0a^3}$

водов n в пучке при неизменном суммарном сечении проводов (рис. 1-10). Снижение $E_{\rm M}$ на поверхности проводов и является целью применения расщепленных проводов на линиях СВН.

1-7. РАСЧЕТ ЗАРЯДОВ И НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ НА ПРОВОДАХ По известным фазным напряжениям

В § 1-6 показано, как вычислять напряженность поля на поверхности проводов и в пространстве между фазами при условии, что заданы удельные заряды проводов. Но на линиях электропередачи известны не удельные заряды, а напряжения проводов. Задача, следовательно, заключается в вычислении удельных зарядов проводов по известным фазным напряжениям.

На линиях электропередачи подвешиваются фазные провода, служащие для передачи энергии, и стальные провода-тросы, предназначенные для целей грозозащиты. Фазные провода могут быть как одиночными, так и расщепленными. При расчете удельных зарядов q пучок расщепленных проводов обычно замещают эквивалентным одиночным проводом, раднус которого r_3 вычисляется по формуле

$$r_{\theta} = \sqrt{r_{\theta} \left(\frac{a}{\sin\frac{\pi}{n}}\right)^{n-1} \prod_{k=1}^{n-1} \sin\frac{k}{n} \pi}, \qquad (1-15)$$

где П означает знак умножения. Значения *г*₀ для двух, трех и четырех проводов в пучке даны в табл. 1-1. В дальнейшем, чтобы избежать повторений в рассуждениях, будем называть просто проводом (без упоминания о его свойствах) как одиночный провод или трос, так и эквивалентный провод пучка расщепленных проводов.

Связь потенциалов и зарядов в системе из *n* проводов выражена в уравнениях Максвелла:

где а — потенциальные коэффициенты проводов и их зеркальных изображений (рис. 1-11).

Систему (1-15) сокращенно можно записать в следующем виде:

$$U_{i} = \sum_{k=1}^{k=n} a_{ik} q_{k}.$$
 (1-16a)

Потенциальный коэффициент a_{kk} определяет составляющую потенциала k-го провода, создаваемую зарядом того же провода. Коэффициенты a_{kk} называются собственными потенциальными коэффициентами k-го провода. Потенциальный коэффициент a_{ik} ($i \neq k$) определяет з* составляющую потенциала k-го провода, создаваемую зарядом i-го провода. Коэффициенты α_{ik} называются взаимными потенциальными коэффициентами проводов i и k. По принципу взаимности $\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$.

Коэффициенты акк и ак вычисляются по формулам:

$$a_{kk} = 0.018 \ln \frac{2h_k}{r_k}, \ M/n\phi; \ a_{ik} = 0.018 \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}, \ M/n\phi,$$
(1-17)

где размеры обозначены в соответствии с рис. 1-11.

На реальных линиях электропередачи высота проводов над землей *h* изменяется вдоль пролета между опорами в связи с провисанием

проводов. Поэтому в формулы (1-17) следует подставлять некоторую среднюю высоту $h_{\rm cp}$, которая определяется по формуле

$$h_{\rm cp} = h_{\rm M} - \frac{2}{3}f,$$

где h_{M} — высота подвески провода на опоре; f — стрела провеса провода.

Решая систему уравнений (1-16) относительно зарядов, приходим к системе уравнений следующего вида:

$$q_{i} = \sum_{k=1}^{k=n} \beta_{ik} U_{k}.$$
 (1-18)

Коэффициенты β называются емкостными коэффициентами системы проводов. При заданном *n* они могут быть выражены через коэффициенты α. В общем случае для системы из *n* проводов коэффициенты β определяются формулой

$$\beta_{ik} = \frac{(-1)^{i+k} M_{ik}}{\Delta},$$

где Δ — определитель системы уравнений (1-16); M_{ik} — соответствующий минор, получающийся вычеркиванием из определителя Δ *i*-й строки и *k*-го столбца.

Рассмотрим в качестве примеров двухпроводную линию постоянного тока и трехпроводную (трехфазную) линию переменного тока.

Двухпроводная линия (n=2). Для двухпроводной линии связи коэффициентов β н α выражаются формулами:

$$\beta_{11} = \frac{\alpha_{12}}{\Delta}; \quad \beta_{22} = \frac{\alpha_{11}}{\Delta}; \quad \beta_{12} = \beta_{11} = -\frac{\alpha_{12}}{\Delta}, \quad (1-19)$$

где определитель $\Delta = a_{11}a_{22} - a_{12}^2$.

Уравнение (1-18) для n = 2 приобретает вид:

$$q_{1} = \beta_{11}U_{1} + \beta_{12}U_{2}; q_{2} = \beta_{21}U_{1} + \beta_{22}U_{2}.$$
 (1-20)

Учитывая, что для двухполюсной передачи постоянного тока $U_1 = -U_2$, находим из (1-20):

$$q_{1} = (\beta_{11} - \beta_{12})U_{1} = C_{1}U_{1};$$

$$q_{2} = (\beta_{22} - \beta_{12})U_{2} = C_{2}U_{2}.$$



Рис. 1-11. Система про-

водов и их зеркальных изображений.
Емкости C_1 и C_2 , связывающие заряды q_1 и q_2 с полюсными напряжениями U_1 и U_2 , называются рабочими емкостями проводов 1 и 2. Как видно из приведенных уравнений, эти емкости равны:

$$C_{1} = \frac{q_{1}}{U_{1}} = \beta_{11} - \beta_{12}; \quad C_{2} = \frac{q_{2}}{U_{2}} = \beta_{22} - \beta_{12}. \quad (1-21)$$

Трехфазная трехпроводная линия. Для трехпроводной линии переменного тока (n=3) связь коэффициентов β и α выражается формулами:

$$\beta_{11} = \frac{\alpha_{22}\alpha_{33} - (\alpha_{23})^2}{\Delta}; \quad \beta_{12} = \beta_{21} = \frac{\alpha_{23}\alpha_{31} - \alpha_{12}\alpha_{33}}{\Delta}; \\\beta_{22} = \frac{\alpha_{11}\alpha_{32} - (\alpha_{13})^2}{\Delta}; \quad \beta_{23} = \beta_{32} = \frac{\alpha_{21}\alpha_{12} - \alpha_{23}\alpha_{11}}{\Delta}; \\\beta_{33} = \frac{\alpha_{11}\alpha_{32} - (\alpha_{12})^2}{\Delta}; \quad \beta_{31} = \beta_{13} = \frac{\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{31}\alpha_{23}}{\Delta}, \quad (1-22)$$

где определитель $\Delta = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}(a_{23})^2 - a_{22}(a_{31})^2 - a_{33}(a_{12})^2 + 2a_{12}a_{23}a_{31}$. Заметим, что перестановка индексов у коэффициентов β и а в формулах (1-22) подчинена циклической закономерности в прямом или обратном направлениях: 1 - 2 - 3 - 1.

Напряжения фаз для трехфазной сети обычно задаются в комплексной форме; соответственно комплексами выражаются и заряды фаз. Уравнения (1-18) для комплексных амплитуд зарядов и напряжений приобретают вид:

$$\begin{array}{c} \dot{q}_{1} = \beta_{11} \dot{U}_{1} + \beta_{12} \dot{U}_{2} + \beta_{13} \dot{U}_{3}; \\ \dot{q}_{2} = \beta_{21} \dot{U}_{1} + \beta_{22} \dot{U}_{2} + \beta_{23} \dot{U}_{3}; \\ \dot{q}_{3} = \beta_{31} \dot{U}_{1} + \beta_{32} \dot{U}_{2} + \beta_{33} \dot{U}_{3}. \end{array}$$

$$(1-23)$$

В симметричном трехфазном режиме комплексные амплитуды напряжения U_1 , U_2 , U_3 образуют симметричную тройку векторов. Выберем момент времени t, когда ось действительных величин совпадает, например, с направлением вектора U_1 . В этот момент напряжение на фазе I максимально и равно U, а на фазах 2 и 3 - 0,5U. Подставляя эти значения в первое уравнение системы (1-23), находим:

$$q_1 = \left[\beta_{11} - \frac{1}{2}(\beta_{12} + \beta_{13})\right]U = C_1U.$$

Аналогично для второго и третьего провода:

$$q_{2} = \left[\beta_{22} - \frac{1}{2} (\beta_{21} + \beta_{23})\right] U = C_{2}U;$$

$$q_{3} = \left[\beta_{33} - \frac{1}{2} (\beta_{31} + \beta_{32})\right] U = C_{3}U.$$

Рабочие емкости фаз, связывающие амплитудные значения зарядов на проводах и фазных напряжений, равны:

$$C_{1} = \frac{q_{1}}{U} = \beta_{11} - \frac{1}{2} (\beta_{12} + \beta_{13});$$

$$C_{2} = \frac{q_{2}}{U} = \beta_{22} - \frac{1}{2} (\beta_{21} + \beta_{23});$$

$$C_{3} = \frac{q_{3}}{U} = \beta_{33} - \frac{1}{2} (\beta_{31} + \beta_{32}).$$
(1-24)

Расчет электрического поля линии электропередачи сводится к последовательности следующих действий:

а) по формулам табл. 1-1 находятся эквивалентные радиусы расщепленных проводов;

б) по формулам (1-17) для заданной системы проводов вычисляются потенциальные коэффициенты α;

 в) вычисляются емкостные коэффициенты β; в случае двух- или трехпроводной линии коэффициенты β определяют по формулам (1-19) или (1-22);

г) определяются рабочие емкости проводов, для чего в случае двух- или трехпроводной линии используются формулы (1-21) или (1-24);

д) по заданным напряжениям полюсов или фаз и известным рабочим емкостям вычисляются удельные заряды проводов;

 е) по формуле (1-12) вычисляются средние напряженности на поверхности расщепленных проводов;

ж) по формулам табл. 1-1 вычисляются максимальные напряженности на поверхности проводов.

Пример 1-1. На линии 500 кв переменного тока с горизонтальным расположением фаз подвешены расщепленные провода $3 \times ACO$ -500. Диаметр проводов r = i,51 см. Шаг расщепления a = 40 см. Расстояние между фазами d = 10,5 м. Средняя высота подвеса проводов $h_{ep} = 13,1$ м. Требуется рассчитать максимальную напряженность поля на проводах. Грозозащитные тросы полагаем изолированными для использования их, например, для отбора мощности; в этом случае тросы не оказывают заметного влияния на электрическое поле вблизи проводов и, следовательно, применимы формулы трехпроводной линии.

1. По формуле табл. 1-1 находим эквивалентный радиус пучка:

$$r_{p} = \sqrt[3]{r_{0}a^{2}} = \sqrt[3]{1,51\cdot40^{2}} = 13.4 \text{ cm}.$$

2. По формулам (1-16) вычисляем потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{32} = 0,018 \ln \frac{12h_{cp}}{r_3} = 0,018 \cdot 2,3 \lg \frac{2 \cdot 1 \ 310}{13,4} = 0,094 \ \varkappa/n\phi;$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{13} = 0,018 \ln \frac{D_{12}}{d_{13}} = 0.018 \cdot 2,3 \lg \frac{\sqrt[4]{1050^2 + (2 \cdot 1 \ 310)^2}}{1050} = 0,018 \ \varkappa/n\phi;$$

$$\alpha_{23} = 0,018 \ln \frac{D_{23}}{d_{23}} = 0,018 \cdot 2,3 \lg \frac{\sqrt{(2 \cdot 1 \ 050)^2 + (2 \cdot 1 \ 310)^2}}{2 \cdot 1 \ 050} = 0,009 \ \varkappa/n\phi.$$

 По формулам (1-22) вычисляем потенциальные коэффициенты β. Эти вычисления самые трудоемкие.

 $\Delta = 0,094^{3} - 2 \cdot 0,018^{2} \cdot 0,094 - 0,009^{2} \cdot 0,094 + 2 \cdot 0,018^{2} \cdot 0,009 = 770 \cdot 10^{-6};$

$$\beta_{11} = \frac{0.094^2 - 0.009^2}{770 \cdot 10^{-6}} = 11.3 \ n\phi/\mu; \quad \beta_{23} = \frac{0.018^2 - 0.009 \cdot 0.094}{770 \cdot 10^{-6}} = -0.68 \ n\phi/\mu;$$

$$\beta_{22} = \beta_{33} = \frac{0.094^2 - 0.018^2}{770 \cdot 10^{-6}} = 11 \ n\phi/\mu; \quad \beta_{12} = \beta_{13} = \frac{0.018 \cdot 0.009 - 0.018 \cdot 0.094}{770 \cdot 10^{-6}} = -2 \ n\phi/\mu.$$

4. По формулам (1-24) вычисляем рабочие емкости фаз:

$$C_1 = 11,3 + \frac{2+2}{2} = 13,3 \ n\phi/m; \ C_2 = C_3 = 11 + \frac{2+0.68}{2} = 12,3 \ n\phi/m.$$

*

5. При максимальном рабочем напряжении линии 525 кв амплитуда фазного напряжения равна:

$$U_{\Phi} = \frac{525 \sqrt{2}}{\sqrt[4]{3}} = 428 \ \kappa e.$$

Соответственно удельные заряды на проводах составляют:

$$q_1 = C_1 U_{\phi} = 13.3 \cdot 428 \cdot 10^3 = 5.7 \cdot 10^6 \ n\kappa/m;$$

$$q_2 = q_1 = C_2 U_{\phi} = 12.3 \cdot 428 \cdot 10^3 = 5.26 \cdot 10^6 \ n\kappa/m.$$

 По формуле (1-12) определяем амплитуды средних напряженностей поля на поверхности проводов:

$$E_{1cp} = 0.018 \frac{q_1}{3r_0} = 0.018 \cdot \frac{5.7 \cdot 10^6}{3 \cdot 1.51} = 22\ 600\ s/cm = 22.6\ \kappa s/cm;$$

$$E_{2cp} = E_{3cp} = 0.018 \cdot \frac{5.27 \cdot 10^6}{3 \cdot 1.51} = 20\,900 \, \text{ e.cm} = 20.9 \, \text{ ke/cm}.$$

7. По табл. 1-1 находим коэффициент $\beta = 2 \sqrt[4]{3}$ и коэффициент $k = 1 + \beta \frac{r_0}{a} = 1 + \beta \frac{r_0}{a}$

 $= 1 + 2\sqrt{3} \cdot \frac{1.51}{40} = 1.13$ и определяем максимальные напряженности на поверхности проводов:

$$E_{1M} = 1,13 \cdot 22,6 = 25,5 \ \kappa s/cm;$$
$$E_{2M} = E_{2M} = 1,13 \cdot 20,9 = 23,6 \ \kappa s/m.$$

Напряженность поля максимальна на проводах средней фазы.

1-8. УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОДОВ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ

В приближенных расчетах используется следующая формула для расчета $E_{\rm M}$ на поверхности проводов:

$$E_{\rm M} = kE_{\Phi} = k \cdot 0.018 \ \frac{C_{\rm p} U_{\Phi}}{nr_{\bullet}}, \ \delta/cM, \tag{1-25}$$

где рабочая емкость проводов

$$C_{1} = \frac{0.24 \cdot 10^{3}}{\lg \frac{D_{\bullet}}{r_{B}}}, \ n \phi / m;$$
(1-26)

 $D_0 = \frac{3}{V} \overline{d_{12}d_{23}d_{31}}; r_3$ и k определяются по формулам табл. 1-1.

На среднем проводе значение $E_{\rm M}$, вычисленное по формуле (1-25), повышается на 7%.

1-9. КОЭФФИЦИЕНТ НЕГЛАДКОСТИ ПРОВОДОВ

Во всех вышеприведенных расчетах провод представлялся гладким цилиндром. В действительности медные, алюминиевые и стальные провода скручиваются из жил малого сечения; на поверхности провода расположен наружный повив этих жил. Картина электрического поля вблизи поверхности многожильного провода показана на рис. 1-12. Возрастание напряженности поля на поверхности проводов, обусловленное большой кривизной жил, учитывается коэффициентом негладкости *m*. Зависимость *m* от числа жил *n* во внешнем слое внтого провода показана на рис. 1-13. В пределе, при $n \rightarrow \infty$, коэффициент $m \rightarrow 0,717$. Если расчет, выполненный для гладкого провода, дал значение напря-





Рис. 1-12. Электрическое поле у поверхности многожильного провода.



женности поля *E*, то максимальная напряженность поля на поверхности витого провода

$$E_{\rm B}=\frac{E}{m}.$$

Эта напряженность возникает в наружных точках жил верхнего повива. В точках соприкасания жил напряженность минимальна. Снижение $E_{\rm B}$ до E может быть достигнуто наложением на провод металлического гладкого экрана. Такой способ используется в высоковольтных кабелях.

1-10. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОДОВ СТЕРЖЕНЬ — СТЕРЖЕНЬ И СТЕРЖЕНЬ — ПЛОСКОСТЬ

Средн разнообразных форм электродов особое место в ТВН занимают пары электродов стержень — стержень и стержень — плоскость. Электрическое поле этих электродов обладает наибольшей степенью неравномерности, вследствие чего они широко используются для изучения разряда в резко неравномерных полях. Картина электрического поля промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость дана на рис. 1-14. Поле в промежутке стержень — стержень получено из поля промежутка стержень — плоскость на основе принципа зеркального изображения. Для аналитического изучения поля стержней их поверхность выражается уравнением двуполого гиперболоида вращения. Тогда при напряжении между стержнями U, расстоянии между ними d и радиусе кривизны их кончика $r(d \gg r)$ максимальная напряженность поля, которая имеет место на конце стержня, выражается формулой

$$E_{\mathrm{M}} = \frac{2U}{\ln \frac{2d}{r}} \frac{1}{r}.$$
 (1-27)

Из принципа зеркального отображения следует, что поле в промежутке стержень — плоскость совпадает с полем промежутка стержень — стержень, если последний имеет удвоенное расстояние между электродами, к которым приложено удвоенное напряжение. Предположив, что к промежутку стержень — плоскость с расстоянием d' между электродами приложено напряжение U, подстановкой в формулу (1-27) 2U вместо U и 2d' вместо d находим,

что для промежутка стержень — плоскость максимальный граднент дается выражением

$$E_{\rm M} = \frac{4U}{\ln \frac{4d'}{r}} \frac{1}{r}.$$
 (1-28)

формулы Сравнивая (1-27)И (1-28), убеждаемся, что напряженность поля вблизи стержня в промежутке стержень - плоскость почти вдвое превышает напряженность поля в промежутке стержень --- стержень. Физически это объясняется тем, что емкость между стержнем и плоскостью почти вдвое превышает емкость между стержиями при одном и том же d; соответственно больше заряд и напряженность поля у стержня в промежутке стержень — плоскость.

Радиус кривизны r конца стержня очень мал; соответственно расчетное значение $E_{\rm M}$ может оказаться очень велико. В действительности эта напряженность ограничена явлением ионизации. Ионизированное пространство высокой проводимости как бы продол-



Рнс. 1-14. Электрическое поле в промежутках стержень — плоскость и стержень — стержень (поле в промежутке стержень — стержень достроено пунктиром).

жает электрод, но уже с большим радиусом кривизны г.

Обычно один из электродов промежутка стержень — стержень заземлен. Само по себе придание нулевого потенциала одному из электродов не изменяет напряженности поля в промежутке. Но при заземлении одного из электродов поле в промежутке искажается вследствие влияния посторонних заземленных предметов, в частности самой земли. Характер этого искажения показан на рис. 1-15, из которого следует, что максимальное число силовых линий исходит из стержня, находящегося против заземленного электрода. Это означает, что заземление одного из электродов (стержня или другого типа электрода) увеличивает напряженность поля у незаземленного электрода вследствие влияния посторонних заземленных предметов. Понятно, что эффект увеличения E тем меньше, чем дальше от промежутка расположены эти предметы.

Вопросы и задачи для самопроверки

1-1. На рис. 1-16 показаны четыре промежутка с различной формой электродов, но с одинаковыми расстояниями между ними *d*. При условии приложения одинакового напряжения *U* указать порядок, в котором следует перечислить промежутки по признаку величины максимальной напряженности поля. Укажите точки, где *E* максимально. 1-2. Нарисуйте примерную форму поля между электродом квадратного сечения и плоскостью. Какие меры можно принять для снижения максимальной напряженности поля?

1-3. Определите отношение величин максимальной напряженности поля для пучков из четырех и трех проводов при одинаковых зарядах *q*, радиусах проводов *r*₀ и расстояниях между проводами *a*.

1-4. Укажите ход расчета максимальных напряженностей поля на поверхности проводов для линии электропередачи переменного тока с двумя заземленными тросами.



го. го. искажение поля стержневого промежутка при заземлении одного из стержней.
 α – стержни изолированы от земли; δ – один из стержней заземлен.



Указание. Уравнения (1-15) имеют 5-й порядок. Напряжения тросов $U_4 = U_8 = 0$. 1-5. К пластинам плоского конденсатора с расстоянием d = 5 мм между электродами приложено напряжение U = 20 кв. В поле конденсатора (в равномерной его части) попало проводящее включение, которое можно представить шариком радиусом r = 0,1 мм. Определить максимальную напряженность в поле с проводящим включением.

Глава вторая

электрические поля в неоднородной изоляции

2-1. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ПОЛЯ НА ГРАНИЦЕ Двух изоляционных сред

В неоднородных средах форма электрического поля зависит не только от формы и взаимного расположения электродов, но и от расположения граничных областей изоляционных сред и диэлектрических характеристик последних. На границе двух сред диэлектрической проницаемостью ε_1 и ε_2 векторы напряженности электрического поля испытывают преломление: тангенциальные (т. е. направленные вдоль поверхности диэлектрика) составляющие напряженности поля E_t равны в обеих средах, а нормальные составляющие E_n изменяются обратно пропорционально диэлектрической проницаемости сред. В результате вектор E при переходе поверхности раздела двух сред изменяется как по величине, так и по направлению, причем изменение направления характеризуется отношением

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{n_2}}{E_{n_1}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}.$$
(2-1)

На рис. 2-1 приведена картина электрического поля изолятора, из которой видно, как в результате преломления на границе сред фарфора и воздуха, масла и фарфора, бу-

маги и масла искажаются силовые линии между электродами — стержнем и фланцем изолятора.

2-2. ПОЛЕ В МНОГОСЛОЙНЫХ Конденсаторах. Градирование Изоляции

Если вектор напряженности электрического поля нормален к границе раздела изоляционных сред, то направление его при переходе через данную поверхность не изменится. Поэтому многослойная изоляционная среда не исказит картины силовых линий поля, построенной для однородной среды, при условии, что границы слоев с разными диэлектрическими постоянными совпадают



Рис. 2-1. Электрическое поле проходного изолятора.

с эквипотенциальными поверхностями, как это показано на рис. 2-2. Эквипотенциальные поверхности можно представить в виде тонких проводящих поверхностей и ввести в рассмотрение емкости C_i между этими поверхностями. Тогда емкость между электродами составит:



а напряжение на k-м изоляционном слое определяется выражением

$$U_{k} = U \frac{C}{C_{k}} = U \frac{1}{C_{k} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_{i}}}.$$
(2-2)

Рассмотрим в качестве примера цилиндрический многослойный конденсатор, у которого границы между слоями совпадают с эквипотенциальными поверхностями (рис. 2-2, δ). Каждый слой в таком конденсаторе можно рассматривать как цилиндрический конденсатор с однородной изоляцией. Используя формулы (2-1), (1-7) и (1-9), найдем, что напряженность поля в k-м изоляционном слое с диэлектрической проницаемостью ε_k на поверхности радиусом r_k равна:

$$E = \frac{U}{r_k \epsilon_k \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\epsilon_i} \ln \frac{r_i + 1}{r_i}}.$$
 (2-3)

В многослойной изоляции происходит перераспределение напряженности поля: в слоях с большей диэлектрической постоянной напряженность поля снижается, а в слоях с меньшими є повышается. Поэтому в изоляционных конструкциях сгремятся в зонах, где эквипотенциальные поверхности имеют максимальную кривизну (т. е. где Е макси-





6)

Рис. 2-2. К расчету поля в многослойной изоляционной среде при совпадении границ слоев с эквипотенциальными поверхностями.

а — при произвольной форме элек-тродов; б — в цилиндрическом кон-- в цилиндрическом конденсаторе.



Рис. 2-3. Покрытие электрода с большой кривизной слоем твердой изоляции с ε₂>ε₁.

мально), размещать диэлектрики с наибольшими є. Тем самым удается снизить напряженность поля в этих зонах. Такой способ называется градированием изоляции. Условие идеального градирования, при котором соблюдается равенство напряженностей поля во всех слоях цилиндрического конденсатора, выразится формулой

$$r_h \varepsilon_h = \text{const.}$$
 (2-4)

Если в однородной изоляционной среде с диэлектрической постоянной є₁ включен тонкий слой с диэлектрической постоянной е2, совпадающий с эквипотенциальной поверхностью поля, то такой тонкий слой практически не изменяет емкости между электродами и напряженности поля в основной изоляционной среде. В самом же тонком слое напряженность поля может считаться постоянной (как в плоском конденсаторе) и равной

$$E_2 = E_1 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}, \qquad (2-5)$$

где E₁ — напряженность поля в месте расположения слоя в однородной среде.

В изоляционных конструкциях с газовой или масляной изоляцией электроды большой кривизны для предотвращения коронного разряда часто покрываются слоем твердой изоляции (рис. 2-3). Диэлектрическая постоянная ε_2 твердого слоя больше ε_1 основной изоляции, вследствие чего напряженность поля в слое снижается. Твердая изоляция обладает также более высокой электрической прочностью по сравнению с прочностью газовой и жидкой изоляции. Оба эти фактора предотвращают возникновение разряда вблизи электрода большой кривизны и как следствие повышают электрическую прочность всей изоляционной конструкции.

2-3. ГАЗОВЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КОНДЕНСАТОРАХ С ТВЕРДОЙ и жидкой изоляцией

В изоляционных конструкциях с твердой или жидкой изоляцией опасны газовые включения, которые могут образоваться вследствие технологических дефектов. Газовые диэлектрики обладают наименьшей диэлектрической постоянной (є'=1), вследствие чего напряженность по§ 2-4]

ля в газовом включении возрастет по сравнению с напряженностью окружающей среды. Газовые диэлектрики, в частности воздух, обладают и наименьшей электрической прочностью по сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками. Поэтому в газовых включениях возможно развитие разряда, что часто ведет к пробою всей изоляционной конструкции.

Пример 2-1. При намотке бумажного цилиндрического конденсатора между слоями образовалась тонкая воздушная прослойка. Определить напряженность поля в этой прослойке, приняв раднусы электродов $r_1 = 1$ см, $r_2 = 6$ см, раднус расположения прослойки r = 2 см, диэлектрическую постоянную материала бумажного конденсатора

$$\epsilon'_1 = 6$$
. Амплитуда приложенного напряжения $U = \frac{35}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = 28,5 \ \kappa \epsilon_{\text{макс}}$.

Для тонкой воздушной прослойки, расположенной по эквипотенциальной поверхности конденсатора, применима формула (2-5). Напряженность поля в однородной среде в месте расположения прослойки

$$E_1 = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{28.5}{2 \ln \frac{6}{1}} = 7.95 \ \kappa e/cm.$$

Напряженность поля в воздушной прослойке

$$E_{2} = E_{1} \frac{\epsilon'_{1}}{\epsilon'_{2}} = 7,95 \cdot \frac{6}{1} = 47,6 \ \kappa \epsilon' c M,$$

что достаточно велико для ударной ионизации в газовой прослойке (см. гл. 4).

Часто в изоляционной среде, особенно в жидкой среде (масло), воздушные включения имеют сферическую форму. При расчете напряженности поля в сфере, радиус которой много меньше расстояния между электродами, внешнее поле можно считать равномерным. В равномерном поле напряженность внутри сферы выражается формулой

$$E_{\mathbf{z}} = \frac{3\epsilon_1}{\epsilon_{\mathbf{z}} + 2\epsilon_{\mathbf{z}}} E_{\mathbf{z}}, \qquad (2-6)$$

где ε_2 , E_2 — диэлектрическая постоянная и напряженность поля в сфере, ε_1 , E_1 — то же в основной изоляционной среде. Как видно из формулы (2-6), напряженность поля в сфере не зависит от ее радиуса.

2-4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ЦЕПОЧКЕ ЕМКОСТЕИ

Ряд изоляционных конструкций, обычно состоящих из отдельных звеньев, можно при изучении электрического поля представлять емкостной цепочкой, показанной на рис. 2-4. Эта цепочка содержит последовательно включенные емкости K_1, K_2, \ldots, K_n , емкости $C'_1, C'_2, \ldots, C'_{n-1}$ между промежуточными электродами 1, 2, 3... и землей и емкости $C''_1, C''_2, \ldots, C''_{n-1}$ между промежуточными электродами и электродом, на ходящимся под напряжением (линейным электродом). Емкостная цепочка служит схемой замещения при изучении полей в гирлянде или колонке изоляторов, в обмотках трансформаторов и других составных нзоляционных конструкциях.

Предположим, что к линейному электроду приложено переменное напряжение и, следовательно, через емкостную цепочку протекает переменный ток. Обозначим через Δu_K напряжения на емкостях K и через u — напряжения на емкостях C, т. е. напряжения относительно зем-

ли (потенциалы) промежуточных электродов. При отсутствии емкостей С' и С" и равных емкостях $K_1 = K_2 = \ldots = K_n$ напряжения Δu_K также равны между собой, так что распределение напряжения и вдоль цепочки равномерное (рис. 2-5, кривая a).

При наличии емкостей C'(C''=0) от каждого промежуточного электрода оттекает ток на землю, в результате чего токи через емкости K_1, K_2, \ldots, K_n уменьшаются по мере удаления от линейного электрода. Соответственно $\Delta u_1 > \Delta u_2 > \ldots > \Delta u_n$. Распределение напряжения вдоль цепочки для этого случая изображено на рис. 2-5 кривой б. Чем больше емкости C', тем больше оттекающие токи и тем круче спадает кри-



нс. 2-4. Емкостная схема замещения изоляционной конструкции.



Рис. 2-5. Распределение напряжения по емкостной цепочке.

 $a \to при C' = C'' = 0; \quad 6 - при C' \neq 0, \quad C'' = 0;$ $в - при C' \neq 0 и C'' \neq 0; \quad e - при C' = 0,$ $C'' \neq 0.$

вая распределения напряжения. Максимальное напряжение Δu ложится на первую емкость цепочки K₁.

При наличии емкостей C'' через эти емкости от линейного электрода подтекает ток к промежуточным электродам, в результате чего происходит частичная компенсация тока, оттекающего по емкостям C', н кривая распределения напряжения вблизи линейного электрода выравнивается, как это показано на рис. 2-5 кривой θ . Заметим, однако, что если первая емкость C'_1 , по которой ток оттекает, находится под напряжением u_1 , то первая емкость C''_1 , по которой ток притекает, находится под значительно меньшим напряжением $u-u_1$. То же рассуждение справедливо для других ближайших к линейному электроду емкостей. Отсюда следует, что для эффективной компенсации оттекающих токов, т. е. для достаточно эффективного выравнивания кривой распределения напряжения, емкости C'' вблизи линейного электрода должны быть значительно больше емкостей C'.

Вблизи заземленного электрода емкости C' находятся под малым напряжением, а емкости C'' — под напряжением, близким к u, вследствие чего притекающий ток превышает оттекающий. В результате токи и напряжения на емкостях K вблизи заземленного электрода несколько возрастают. В зависимости от соотношений емкостей K, C' и C'' кривая распределения напряжения в изоляционной конструкции приобретает ту или иную форму. Обычно в отсутствие специальных выравнивающих устройств емкости C'' малы и распределение напряжения резко неравномерно у линейного электрода. Применением специальных электродов — экранов, присоединяемых к линейному концу, добиваются такого увеличения емкостей С", при котором кривая распределения напряжения у линейного электрода выравнивается. Экраны в сложных составных изоляционных конструкциях выравнивают поле аналогично экранам в однородных полях, действие которых было рассмотрено в § 1-3.

2-5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ Твердых диэлектриков

дена на рис. 2-6, а. В этой схеме Со — емкости единиц поверхности относительно изолятора второго электрода, Ко — емкости между соседними единицами поверхности изолятора. Как видно из рис 2-6, а, схема замещения образует цепочку емкостей. Как было установлено в § 2-4, кривая потенциала вдоль цепочки, т. е. в данном случае вдоль поверхности изолятора, тем круче и напряженности поля вблизи электрода 1 тем выше, чем больше отношение емкостей С₀/К₀. Емкость К₀ имеет весьма стабильный характер и в среднем равна 2—3 пф/см. Емкость Со растет с увеличением диэлектрической постоянной изолятора єг и снижением его толщины d. Таким образом, емкость Со, называемая емкостью образца, поверхностной определяет степень неравномерности поля вдоль поверхности изоля-Чем больше удельная потора. верхностная емкость, тем при прочих равных условиях более нерав-





1, 2 — электроды.

номерно распределение напряжения по поверхности диэлектрика. Для выравнивания распределения напряжения применяются специальные экраны, увеличивающие емкости поверхности изолятора Ко относительно электрода 1. На рис. 2-6, а выравнивающий экран показан пунктиром. Чем больше экран охватывает поверхность диэлектрика, тем более полно его выравнивающее действие.

Для выравнивания распределения напряжения применяются также полупроводящие покрытия части поверхности твердого диэлектрика. При наличии полупроводящего поверхностного слоя токи смещения, протекающие через емкости C_0 , замыкаются через этот слой. Очевидно, что чем больше проводимость слоя, тем меньше падение напряжения вдоль поверхности. С другой стороны, проводимость слоя должна быть достаточно мала, чтобы на конце полупроводящего слоя напряжение было существенно меньше напряжения электрода.

2-6. ВЫРАВНИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОНДЕНСАТОРНЫМИ ОБКЛАДКАМИ

В ряде изоляционных конструкций (проходные изоляторы, трансформаторы тока, кабельные муфты) для выравнивания нормальных и



Рис. 2-7. Изоляционный остов с конденсаторными обкладками.

тангенциальных составляющих поля применяются конденсаторные обкладки, закладываемые в основную изоляцию. Типичная конструкция с конденсаторными обкладками приведена на рис. 2-7/ Емкости между обкладками C_i образуют цепочку, включенную между электродами. Если длина обкладки много больше расстояния между обкладками Δr , то емкость C_i можно рассчитывать по формуле плоского конденсатора (см. § 1-5):

$$C_i = \varepsilon \, \frac{S_i}{\Delta r} = \varepsilon \, \frac{l_{\rm ti} \cdot 2\pi r_{\rm ti}}{\Delta r}.$$

Емкостный ток, текущий через конденсатор С_i, равен:

$$I = \Delta u_i \omega C_i = (\Delta r E_r) \omega \frac{l_i \cdot 2\pi r_i}{\Delta r}.$$

Из условия равенства емкостных токов, текущих через все последовательно включенные емкости C_i , находим выражение, связывающее радиальную напряженность поля E_r с размерами конденсаторных обкладок:

$$E_r r_i l_i = \text{const.}$$
 (2-7)

Регулирование поля можно осуществлять, исходя из следующих условий:

а) постоянство радиальной напряженности поля E_r;

б) постоянство аксиальной (тангенциальной) составляющей напряженности поля E_i на краях конденсаторных обкладок или, что практически то же самое, вдоль поверхности изолятора.

На основании выражения (2-7) условие постоянства Е, имеет вид:

$$r_i l_i = \text{const},$$
 (2-8)

т. е. длины обкладок *l* должны изменяться обратно пропорционально радиусу *r*. При выполнении условия (2-8) распределение аксиальной напряженности *E_l* оказывается сильно неравномерным:

$$E_l = \frac{\text{const}}{l^2} = \text{const} r^2, \qquad (2-9)$$

что приводит к необходимости придания изолятору значительной длины. Поэтому обычно при регулировании поля исходят из условия постоянства аксиальной напряженности

$$E_l = \frac{da}{dl} = \text{const.} \tag{2-10}$$

Совместное решение уравнений (2-7) и (2-10) приводит к следующей связк l_i и r_i , обеспечивающей условие $E_l = \text{const}$,

$$\left(\frac{l_i}{l}\right)^2 + \ln\left(\frac{r_i}{r}\right)^2 = 1, \qquad (2-11)$$

где *l*, *r* — длина и раднус некоторой, например 1-й промежуточной, обкладки.

При условии E_l = const радиальная напряженность E_r изменяется обратно пропорционально площади обкладок $S_i = 2\pi r_i l_i$:

$$E_r = \frac{\text{const}}{r_{\text{cl}} t_{\text{s}}}.$$
 (2-12)

Поскольку l_i снижается с увеличением r_i , как это следует из уравнения (2-11), то градиент E_r изменяется сравнительно мало, причем максимальные значения E_r достигаются у крайних внутренней и внешней обкладок, а в средних слоях изоляции E_r проходит через минимум. Но так как охлаждение средних слоев изоляции обычно особенно затруднено, такое изменение величины E_r является благоприятным.

2-7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В НЕОДНОРОДНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ УЧЕТЕ ПРОВОДИМОСТЕЙ НА ПЕРЕМЕННОМ И ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИЯХ

Все технические диэлектрики не являются совершенными, а обладают некоторой удельной проводимостью у. Когда к электродам изоляционного устройства приложено напряжение, в общем случае переменное, через изоляцию протекает ток смещения (емкостный ток) и ток проводимости.

Плотность тока смещения связана с напряженностью поля уравнением

$$\dot{\delta}_{c} = j \alpha \varepsilon \dot{E}. \tag{2-13}$$

В этом уравнении $\dot{\delta}_c$ и \vec{E} — комплексные значения плотности тока смещения и напряженности поля, ω — частота (круговая) приложенного напряжения. Комплексы $\dot{\delta}_c$ и \vec{E} сдвинуты по фазе на угол $\pi/2$, что характеризуется множителем j.

Плотность тока проводимости

$$\dot{\delta}_{\mathbf{r}_{1'}} = \gamma \dot{E}.$$
 (2-13a)

Как видно из этого уравнения, комплексы δ_{np} и *E* совпадают по фазе. Полная плотность тока в переменном поле частоты ω равна:

$$\dot{\delta} = \dot{\delta}_{c} + \dot{\delta}_{n_{1}} = (j\omega\varepsilon + \gamma)\dot{E}. \qquad (2-14)$$

Рассмотрим равномерное поле, в котором вектор E, а следовательно, и вектор плотности тока δ имеют постоянное направление (рис. 2-8). Определим отношения напряженностей E_1 и E_2 в средах ε_1 , γ_1 и ε_2 , γ_2 . По закону непрерывности полного тока $\delta_1 = \delta_2$ и, следовательно,

$$(j\omega\varepsilon_1 + \gamma_1)E_1 = (j\omega\varepsilon_2 + \gamma_2)E_2,$$

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}} = \frac{j\omega\varepsilon_2 + \gamma_2}{j\omega\varepsilon_1 + \gamma_1}.$$
(2-15)

В электроэнергетических установках рабочая частота $\omega = 314$, в переходных режимах частоты обычно более высокие. Для диэлектриков, применяемых в высоковольтной изоляции, $\gamma \ll \omega \varepsilon$ и, следовательно,

$$\frac{E_1}{E_2}\approx \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

Обобщая этот вывод для полей произвольной конфигурации, можно утверждать, что в изоляции установок переменного тока напряжен-



Рис. 2-8. Равномерное поле в двухслойном диэлектрике при учете его проводимости. всем предыдущем изложении. Исключения составляют случаи повышенной проводимости участков изоляции вследствие увлажнения, загрязнения, ионизации или выполнения изоляции из специальных полупроводящих материалов. Рассмотрим теперь электрические поля

ность Е регулируется диэлектрическими характеристиками среды, как это и было принято во

в установках высокого напряжения постоянного (выпрямленного) тока. При этом роде тока $\omega = 0$ и соотношение (2-15) приобретает вид $E_1/E_2 = \gamma_2/\gamma_1$. Это соотношение показы-

вает, что в изоляции установок постоянного тока напряженность E регулируется проводимостями среды. В однородной диэлектрической и проводящей среде структура полей одинакова. В неоднородной среде структура полей одинакова при соблюдении условия $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = \gamma_2/\gamma_1$, которое может быть выполнено только специальным подбором сред. Обычно указанное условие не соблюдается и электрические поля в изоляционных конструкциях под воздействием переменного и постоянного напряжения оказываются существенно различными.

откуда

Значения диэлектрических постоянных изоляционных материалов весьма стабильны, вследствие чего в изоляционных конструкциях, находящихся под воздействием переменного напряжения, распределение напряженности поля также стабильно. Значения удельных проводимостей изоляционных материалов подвержены колебаниям в широких пределах. Небольшие примеси, химические изменения, увлажнение изменяют у диэлектриков на несколько порядков. Поэтому распределение напряженности поля в нзоляционных конструкциях постоянного тока также может изменяться с течением времени, что является неблагсприятным фактором. Для стабилизации поля целесообразно использование изоляционных материалов с полупроводящими свойствами, ассортимент которых пока еще очень ограничен.

Интересно отметить следующее. В изоляционных конструкциях электрическое поле при воздействии переменного напряжения управляется диэлектрическими характеристиками среды, т. е. в соответствии с законами электростатики. Понятно, что частота приложенного напряжения должна быть не слишком велика, чтобы электрическое поле в изоляции в каждый данный момент можно было считать статическим и однозначно связанным с мгновенным значением напряжения. При воздействии постоянного напряжения законы электростатики оказываются уже недействительными и поле управляется проводимостями среды. С другой стороны, в электростатических полях, изучаемых в курсе ТОЭ, предполагается постоянство приложенного напряжения. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что в электростатике изучаются поля в идеальных непроводящих диэлектриках. В таких диэлектриках постоянные поля формируются в соответствии с диэлектрическими свойствами среды. Так, например, если к двухслойному конденсатору (рис. 2-8) приложить толчком постоянное напряжение, то в первый момент напряжение распределится согласно значениям є слоев (прямоугольный фронт приложенного напряжения эквивалентен переменному напряжению с частотой ω→∞). При условии ү1=ү2=0 это распределение напряжения сохранится и в дальнейшем.

Реальные диэлектрики всегда обладают некоторой проводимостью. Поэтому в реальном двухслойном конденсаторе поле с течением времени перераспределяется в соответствии с проводимостями слоев. Время перераспределения может измеряться долями секунды, минутами или даже часами, но во всяком случае в установках постоянного напряжения процесс всегда достигает установившегося состояния, которое характеризуется распределением *E* по проводимостям.

Вопросы и задачи для самопроверки

2-1. В масляном промежутке стержень — плоскость (рис. 2-3) стержневой электрод покрыт слоем твердой изоляции, причем толщина слоя $\delta \ll d$ и *г*. Рассчитать максимальную напряженность поля на поверхности стержня, приняв для масла $\varepsilon'_1=2,5$ и для твердого слоя $\varepsilon'_1=4$. Радиус r=1 см, расстояние d=10 см, приложенное напря-

were $U = \frac{110}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \approx 90$ ws.

Ответ: 61 кв/см.

2-2. В поле плоского конденсатора, заполненного диэлектриком с $\varepsilon'=2,5$ (масло), попало воздушное включение, принявшее сферическую форму. Определить напряженность поля в конденсаторе, при которой в воздушном включении начнется ионизация, если $E_{\rm пp}$ воздуха принять равным 30 кв/см.

Ответ: $E = 24 \ \kappa B / c M$.

2-3. Объясните влияние емкостных экранов на распределение напряжения вдоль емкостной цепочки (рис. 2-4) и поверхности изоляции (рис. 2-6).

4*

5

2-4. Объясните назначение и основы расчета конденсаторных обкладок в изоляционных конструкциях. 2-5. В двухслойном конденсаторе (рис. 2-8) заданы параметры сред: в'1=2,5,

$$\gamma_1 = 10^{-12} \frac{1}{OM \cdot CM}$$
 H $\epsilon'_2 = 4$, $\gamma_2 = 10^{-12} \frac{1}{OM \cdot CM}$; $d_1 = d_2 = 1$ CM.

Рассчитайте напряженности поля в обенх средах при приложении переменного ($\omega = 314 \ 1/ce\kappa$) и постоянного напряжения U, равного 20 кs.

Ответ: На переменном токе $E_1 = 12,3$ кв/см, $E_2 = 7,7$ кв/см; на постоянном токе $E_1 = 18,2$ кв/см; $E_2 = 1,8$ кв/см.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ГАЗОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ В ТЕХНИКЕ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

Природа снабдила нас даровым диэлектриком — атмосферным воздухом. Естественная воздушная изоляция используется на воздушных линиях электропередачи, на подстанциях и вообще во всех высоковольтных установках, токопроводные элементы которых выходят в атмосферу. Изоляция, имеющая непосредственную связь с атмосферным воздухом, называется наружной. К наружной изоляции относятся все воздушные промежутки на линиях и подстанциях и наружная поверхность изоляторов любого типа.

Экономичность и доступность являются основными преимуществами атмосферного воздуха как изоляции. Именно по этой причине получили столь большое распространение воздушные линии электропередачи высокого напряжения. Но атмосферный воздух как изоляция обладает и рядом недостатков, которые создают существенные трудности в технике высоких напряжений. Атмосферный воздух подвержен всем метеорологическим воздействиям, а также загрязнению, например уносами труб промышленных предприятий. Загрязнения при повышенной влажности резко снижают изоляционные свойства наружной поверхности изоляторов. Электрическая прочность атмосферного воздуха, достаточно высокая для низких и средних напряжений, оказывается недостаточной для сверхвысоких напряжений.

Изоляционные свойства атмосферного воздуха зависят от барометрического давления. В известных пределах электрическая прочность воздуха пропорциональна давлению (это свойство в дальнейшем будет выведено на основе микроскопических характеристик газовой изоляции). Подавляющее большинство электрических установок расположено на уровне, близком к уровню моря, где давление близко к одной атмосфере. На этом уровне изоляционные свойства воздуха еще удовлетворительны с точки зрения строительства воздушных линий и подстанций. Но в горных районах, где барометрическое давление низко, изоляшионные свойства воздуха снижаются, и в этих районах перед техникой высоких напряжений возникает много сложных проблем. При очень глубоком разрежении газа электрическая прочность вновь повышается, что также используется в изоляционных конструкциях. Хотя техника высоких напряжений пока еще вполне земная техника, можно задаться вопросом о ее возможностях в космосе. В практически абсолютном вакууме электрическая прочность очень высока; поэтому, например, на Луне проблема наружной изоляции высоковольтных установок решалась бы очень просто.

Газы используются в качестве не только наружной, но и внутренней изоляции высоковольтных конструкций, т. е. изоляции, непосредственно не связанной с атмосферным воздухом. Для внутренней изоляции применяются газы, обладающие повышенной электрической прочностью. Такими являются газы при высоком давлении, а также специальные высокопрочные газы, находящие за последние годы все большее применение. Применяется также вакуумная внутренняя изоляция, обладающая высокой электрической прочностью.

Для использования газов в качестве внутренней изоляции важна не только их электрическая прочность, но и ряд других физико-химических свойств. Газы должны быть инертны, т. е. не вступать в химические соединения с материалом оболочки (металл, пластмасса, фарфор), в которой заключен газ. Для аппаратов, выделяющих тепло, важна теплопроводность газов. С точки зрения безопасности важны невоспламеияемость, взрывобезопасность и нетоксичность газов. Только с учетом всех этих условий можно подобрать для данной изоляционной конструкции газ с «оптимальными» свойствами. Стоимость такого газа решает вопрос о целесообразности его применения.

Электрическая прочность — основная характеристика газа как изоляционной среды — изучается в технике высоких напряжений наиболее иодробно. На основе изученных свойств разряда в газах выбираются габариты воздушных линий электропередачи, ошиновка подстанций, марки проводов сверхвысокого напряжения, высота изоляторов, размеры изоляционных конструкций с газовой изоляцией и т. д. Таким образом, свойства разряда в газах имеют важнейшее значение в электроэнергетике вообще и в технике высоких напряжений в частности.

Глава третья

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

3-1. ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ГАЗА

В нормальном неионизированном состоянии газы являются почти идеальными диэлектриками. Это состояние нарушается при напряженности поля, при которой в газе под действием сил поля возникает интенсивная ионизация — газовый разряд. При газовом разряде резко возрастает ток, стекающий с электродов. Этот ток есть ток конвекции, обусловленный движением заряженных частиц между электродами. Чтобы описать газовый разряд, необходимо понять условия возникновения, движения и исчезновения заряженных частиц в электрическом поле.

Газы различаются структурой молекул и атомов; различным может быть также физическое состояние газов — давление и температура. Говорят, что газ находится при нормальных атмосферных условиях, если его давление $p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$, а температура $t = 20^{\circ}$ С. Нормальным атмосферным условиям соответствует нормальная плотность газа, принимаемая за относительную единицу. Относительная плотность газа б при давлении p и абсолютной температуре T, отличающихся от нормальных, вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{p}{p_{\bullet}} \cdot \frac{T_{\bullet}}{T} = \frac{p}{760} \cdot \frac{273 + 20}{T} = 0,386 \frac{p}{T}.$$
 (3-1)

В этой формуле *р* измеряется в миллиметрах ртутного столба ($p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$) и T - в градусах Кельвина ($T = 273 + t^{\circ}$ C).

В технике высоких напряжений газовой изоляцией служит в основном атмосферный воздух. Давление воздуха зависит от высоты расположения электрической установки над уровнем моря. В среднем можнопринять, что на уровне моря давление *p* равно 760 *мм рт. ст.* и падает на 1% на каждые 100 *м* высоты над уровнем моря. Следовательно,

$$p = p_0(1 - 10^{-4}h),$$
 (3-1a)

где *h* — высота над уровнем моря, *м*.

Температура воздуха меняется в пределах — 50°С (Сибирь) до +50°С (Средняя Азия). До очень высоких температур воздух нагревается в результате горения дуги. В электрических аппаратах и машинах применяются газы при высоких и, в более редких случаях, при низких давлениях (вакуумная изоляция). В курсе ТВН основное внимание уделяется газовому разряду при атмосферном давлении.

3-2. ИОНИЗАЦИЯ И ВОЗБУЖДЕНИЕ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Напомним некоторые основные понятия атомной физики, существенные для понимания процессов ионизации в газе. Вокруг положительно заряженного ядра вращаются на некоторых «разрешенных» орбитах электроны. Заряд электрона $q_e = -1.6 \times 10^{-19} \kappa$; масса электрона (9,1 · 10⁻²⁸ г) на 4—5 порядков меньше массы ядра. В нейтральном атоме заряд электронов на орбитах равен положительному заряду ядра. Чем дальше расположена орбита электрона от ядра, тем меньше силы связи электронов с атомом. В устойчивом состоянии атома электроны располагаются на ближайших к ядру орбитах. Эти орбиты устойчивы. Дальше от ядра расположены неустойчивые орбиты; на них электроны могут находиться только в течение малого промежутка времени.

В газах атомы обычно связаны в молекулы. Число связей определяется валентностью атомов. Молекулы таких распространенных газов, как водород, кислород, азот, состоят из двух атомов (H₂, O₂, N₂). В технических целях применяются также газы, молекулы которых состоят из большого числа атомов и имеют сложную структуру (высокопрочные газы). В атомах, связанных в молекулы, электроны взаимодействуют не только с собственным ядром, но и с ядрами других атомов молекулы, хотя и в меньшей степени. Поэтому при рассмотренни микропроцессов газового разряда молекулы газа рассматриваются как целостное образование, взаимодействующее с электронами.

При отрыве одного электрона от нейтральной молекулы возникает однозарядный положительный ион; его заряд, очевидно, равен $+q_e$. Процесс отрыва электрона от молекулы называется нонизацией; при большей интенсивности ионизации возможен отрыв двух или трех электронов и образование двухзарядного или трехзарядного положительного иона. Для ионизации молекулы требуется затратить энергию. В атомных процессах энергию принято измерять в электрон-вольтах (эв). Энергия в 1 эв равна кинетической энергии, которую приобретает электрон при свободном движении между двумя точками с разностью потенциалов в 1 в. Следовательно, 1 эв равен энергии $q_eU=1,6\cdot10^{-19}$ $\kappa\cdot 1$ $s=1,6\cdot10^{-19}$ вт сек. Так как заряд электрона постоянен, энергию можно также численно измерять величиной напряжения (или потенциала) U, выражаемого в вольтах.

В микропроцессах газового разряда возможен не только полный отрыв электрона от молекулы, но и переход электрона на более удаленную неустойчивую орбиту. Этот процесс называется возбуждением молекулы. Возбужденная молекула «живет» в течение времени порядка 10-10 сек, после чего происходит обратный переход электрона на устойчнвую орбиту. Очевидно, для возбуждения молекулы необходимо затратить некоторую энергию, которая излучается молекулой при переходе из возбужденного состояния в устойчивое. Процесс этот играет существенную роль в газовом разряде.

Значения энергии или потенциалы, необходимые для ионизации $U_{\rm H}$ и возбуждения $U_{\rm B}$ молекул разных газов, в том числе паров различных элементов, приведены в табл. 3-1.

Таблица 3-I

Первый потенциал ионизации и первый потенциал воз5уждения молекул различных газов

Газ	Потенциал ионизации U _и , в	Потенциал возбуждения U _в , в	Газ	Потенциал ионизации U _щ . в	Потенциал возбуждения U _B . в
Водород H ₂	15,4	11,2	Гелий Н ₂	24,6	19,8
Азот N ₂	15,8	6,1	Цезий Сs	3,88	1,38
Кислород O ₂	12,5	7,9	Ртуть Нg	10,4	4,86

Наибольшие значения U_{μ} и U_{B} имеют инертные газы — гелий, неон, аргон и др.; наименьшие значения — щелочные газы. Для атмосферного воздуха значения U_{μ} и U_{B} близки к потенциалам ионизации и возбуждения основных атмосферных газов — кислорода, водорода, азота.

Перечислим теперь основные процессы, при которых молекуле в разрядном промежутке передается энергия, достаточная для ее ионизации или возбуждения.

Ионизация столкновением или ударная ионизация. Так называется нонизация при столкновении молекулы с электроном, ускоренным в электрическом поле. В поле напряженности E электрон, пробегая путь $x_{\rm H}$, приобретает кинетическую энергию $mv^2/2 = Ex_{\rm H}$ (эв). Приравнивая $Ex_{\rm H}$ потенциалу ионизации $U_{\rm H}$, находим путь $x_{\rm H}$, который электрон должен свободно пролетать, чтобы ионизировать молекулу,

$$x_{\rm H} = \frac{U_{\rm m}}{E}.\tag{3-2}$$

Аналогичный вид имеет формула для расчета пути x_в, необходимого для возбуждения молекулы,

$$x_{\rm B} = \frac{U_{\rm B}}{E}.\tag{3-2a}$$

Схема ионизации молекулы при столкновении с электроном показана на рис. 3-1. В результате ионизации возрастает число свободных электронов — происходит, как говорят, размножение электронов. Следует отметить, что формулы (3-2) и (3-2а) отражают упрощенную картину ионизации и возбуждения молекул. В действительности ионизация и возбуждение происходят при накоплении кинетической энергии на пути, в течение которого происходит несколько столкновений с молекулами.

Потенциалы ионизации и возбуждения, приведенные в табл. 3-1, принимаются в расчет при столкновении молекул с электронами. Для ионизации (или возбуждения) нейтральной молекулы ионами требуется значительно бо́льшая энергия, чем это указано в табл. 3-1. Это объясняется относительно малыми скоростями движения ионов. «Медленный» ион обменивается импульсом с молекулой в течение длительного времени, много большего периода обращения электрона вокруг ядра. Устойчивость электрона на орбите вследствие этого значительно возрастает. Поэтому в электрическом поле ионизация и возбуждение молекул ионами имеют второстепенное значение.

Пример 3-1. Определить путь x_n , который должен пробежать электрон для ионизации молекулы азота в поле напряженностью E = 30 кв/см.

По табл. 3-1 находим для азота U_m=15,8 в. По формуле (3-1) находим:

$$x_{\rm m} = \frac{15.8}{30 \cdot 10^8} \approx 5.3 \cdot 10^{-4} \ cm.$$

Фотоионизация — так называется ионизация в результате поглощения молекулой квантов лучистой энергии, т. е. фотонов. Процесс фотоионизации схематически показан на рис. 3-2. Энергия фотона выражается формулой w = hv, где v — частота излучения, $1/ce\kappa$, а $h = = 6.6 \cdot 10^{-27}$ эрг · се $\kappa = 4.13 \cdot 10^{-8}$ эв · се κ — постоянная Планка.



Рис. 3-1. Схема ударной ионизации электроном.

Рис. 3-2. Схема нонизации фотоном.

Условия ионизации и возбуждения выражаются формулами

$$hv_{\mathbf{R}} \ge U_{\mathbf{R}}$$
 и $hv_{\mathbf{R}} \ge U_{\mathbf{R}}$. (3-3)

Как видно из этих формул, повышение частоты увеличивает способность фотона к ионизации. Наибольшей ионизирующей способностью обладают космические лучи, ү-излучение радиоактивного распада и световые волны в ультрафиолетовой части спектра (рис. 3-3). Используя связь между частотой излучения и длиной его волны ($v = \frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света и λ — длина волны), из уравнения (3-3) можно определить длины волн (в ангстремах), необходимые для ионизации или возбуждения молекул газа:

$$\lambda_{\rm H} = -\frac{12^2 400}{U_{\rm H}}, {\rm \AA} {\rm unu} {\rm l}_{\rm B} = -\frac{12 400}{U_{\rm B}}, {\rm \AA}.$$
 (3-3a)

Пример 3-2. Определить длину волны излучения, необходимой для ионизации молекулы азота. По формуле (3-3а) находим:

$$\lambda_{\pi} = \frac{12 \, 400}{15,8} = 785 \text{ Å}.$$

Такой длине волны соответствует ультрафиолетовое излучение (рис. 3-3).

В газовом разряде источником фотонов, способных к ионизации, служат не только внешние излучатели, но и сами молекулы, участвующие в газовом разряде. Как было ранее указано, в возбужденной молекуле электрон, смещенный на внешнюю неустойчивую орбиту, удерживается на ней в течение очень короткого времени — порядка 10-10 сек. При возвращении электрона на устойчивую орбиту молекула излучает фотон, который способен вызвать фотоионизацию нейтральных или уже возбужденных других молекул газа. Например, на рис. 3-4 показан процесс, включающий возбуждение молекулы газа в результате столкновения, излучение фотона при возврате электрона на устойчивую орбиту и ионизацию этим фотоном ранее возбужденной молекулы. Процесс ионизации вторичными фотонами играет решающую роль в формировании искрового разряда.

Термоионизация. Температура есть мера кинетической энергии хаотического (теплового) движения молекул и свободных электронов в га-



Рис. 3-3. Частоты и длины воли возможных излучений.

зе. Величина этой кинетической энергии определяется для молекулы выражением

$$W = \frac{3}{2} \kappa T, \tag{3-4}$$

где W — кинетическая энергия теплового движения для молекулы;

Т — температура, °К;

k — постоянная Больцмана, равная 1,37 · 10⁻¹⁶ эрг/°К \approx 0,86 · 10⁻⁴ эв/°К.



Рис. 3-4. Схема ионизации возбужденной молекулы. Электрон в результате соударения возбуждает молекулу; при возвращении электрона на устойчивую орбиту излучается фотон, ионизирующий другую возбужденную молекулу.

Очевидно, что при достаточно высокой температуре становится возможной ионизация в результате столкновения молекул с электронами. Степень ионизации, т. е. отношение числа ионизированных молекул N_и к общему их числу N в данном объеме газа, может быть вычислена по формуле Caxa:

$$\frac{m^2}{1-m^2} = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{T^{2.5}}{p} e^{-\frac{U_{\pi}}{kT}},$$
(3-5)

где $m = N_{\mu}/N$ — степень нонизации;

р — давление газа, мм рт. ст.

На рис. 3-5 приведена кривая зависимости степени ионизации молекул воздуха от его температуры, рассчитанная по формуле (3-5). Из

рис. 3-5 видно, что при достижении температуры порядка 20 000° К практически все молекулы оказываются ионизированными. Процесс термоионизации играет, в частности, определяющую роль в столбе электрической дуги, температура которого составляет от 4 000 до 15 000° К.

з-з. поверхностная ионизация

В ряде случаев в развитии электрического разряда в газовом



Рис. 3-5. Зависимость степени нонизации молекул воздуха от его температуры.

промежутке существенную роль может играть поверхностная нонизация. Так называется эффект испускания из электродов заряженных частиц, в основном свободных электронов. В металле свободные электроны находятся в электрическом поле положительных ионов, образующих кристаллическую решетку. Поверхность металла создает потенциальный барьер, который удерживает свободные электроны внутри металла. Для выхода из металла электроны должны получить энергию, достаточную для преодоления поверхностного потенциального барьера. Значения энергии выхода, иначе говоря, значения потенциалов поверхностної понизации $U_{п.и}$ для различных металлов приведены в табл. 3-2. Наименьшие потенциалы $U_{п.и}$ имеют щелочные металлы. Как видно из сравнения табл. 3-1 и 3-2, потенциалы поверхностной ионизации $U_{п.и}$ меньше потенциалов объемной ионизации молекул газа $U_{n.}$

Таблица 3-2

Металл	Потенциал поверх- ностной нонизации U _{п.н} , в	Металл	Потенциал поверх- ностной ионизации U _{п.н} , в
Алюминий А1 Медь Си Окись медн СиО Железо Fe Gepeбро Ag	1,8 3,9 5,3 3,9 3,1	Платина Pt Ртуть Hg Цезий Cs Окись бария BaO	3.6 4.5 0.7 1.0

Потенциалы поверхностной ионизации различных металлов

Электроны, высвобождающиеся в результате поверхностной ионизации с катода, силами электрического поля уводятся от катода в область газового разряда. Наоборот, при поверхностной ионизации с анода электроны вновь притягиваются к аноду и поглощаются им. Поэтому для развития газового разряда основное значение имеет поверхностная ионизация с катода.

Поверхностная ионизация с катода может иметь различные формы, которые перечисляются ниже. Поверхностная ударная ионизация происходит под действием бомбардировки поверхности катода положительными ионами, ускоренными в электрическом поле (рис. 3-6). Для того чтобы освободить из катода один электрон, т. е. для однократной поверхностной ионизации, положительный ион должен свободно пролететь в поле напряженности *E* расстояние

$$x_{\mathbf{n}.\mathbf{n}} = \frac{U_{\mathbf{n}.\mathbf{n}}}{E}.$$
(3-6)

Поверхностная фотоионизация (фотоэлектронная эмиссия) происходит при падении на поверхность катода фотонов достаточно высокой



Рис. 3-6. Схема ударной поверхностной ионизации.

энергии (рис. 3-7). Для однократной поверхностной ионизации необходимо условие

$$hv \ge U_{\Pi,\Pi}$$
 (3-7)

или

$$\lambda \leq \frac{12 \cdot 400}{U_{\text{n.H}}}, \quad \text{Å.} \tag{3-8}$$

Термическая эмиссия электронов из катода — это эмиссия, при которой свободные электроны в металле за счет его нагрева приобретают энергию, достаточную для преодоления поверхностного потенциального барьера. Явление термической эмиссии широко используется в раднолампах.



Рис. 3-7. Схема фотоэлектронной эмиссии.

Автоэлектронная эмиссия заключается в том, что электроны под действием сил электрического поля вырываются из катода. Автоэлектронная эмиссия происходит при напряженностях поля вблизи катода порядка 10⁶ в/см. Такую напряженность можно создать на остриях в средах, в которых отсутствуют другие формы ионизации, например в вакууме или в масле.

3-4. ЯВЛЕНИЕ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ — ОБРАЗОВАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

При ионизации нейтральной молекулы образуются положительный ион и свободный электрон. Свободный электрон при известных условиях может слиться с нейтральной молекулой (прилипнуть) и образовать отрицательный ион. Возможность прилипания электронов обусловлена наличнем у атомов, входящих в молекулы, свободных внешних устойчивых орбит, на которые может попасть электрон. Сродство нейтральных молекул к электронам выражается энергией, которая выделяется при слиянии молекулы с электроном или которую необходимо затратить на это слияние. В первом случае энергия сродства положительна, во втором — отрицательна. Значения потенциалов сродства $U_{\rm cp}$ для некоторых газов приведены в табл. 3-3. Газы с положительным значением энергии сродства называются электроотрицательными. Молекулы этих газов захватывают свободные электроны; выделяемая энергия излучается или же поглощается колебаниями молекул. Из распространенных в природе газов наибольшим сродством к электронам обладает кислород, очень большим сродством к электронам обладают специальные высокопрочные газы, которые будут в дальнейшем рассмотрены подробно.

Таблица 3-3

Потенциалы сродства с Эј	лектронами для	некоторых	газов
--------------------------	----------------	-----------	-------

Газ	Потенциал сродства U _{ср} , эв	Газ	Потенциал сродства U _{ср} , эв
Кислород О ₂ Водород Н ₂ Хлор Сl ₂ Фтор F ₂	2,2 0,75 3,8 3,9	Азот N ₂ Аргон Аг Неон Ne	0,6 1,0 1,2

Поскольку при прилипании электронов к молекулам электроотрицательных газов выделяется энергия, то для отрыва прилипшего электрона необходимо, чтобы отрицательный ион поглотил энергию, равную энергии сродства. По этой причине отрицательные ионы газов с положительной энергией сродства устойчивы. Наоборот, газы с отрицательным значением энергии сродства не могут образовать устойчивого отрицательного иона, так как внутренняя энергия молекулы всегда стремится к минимуму, который достигается при высвобождении случайно прилипшего электрона.

3-5. РЕКОМБИНАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Процесс рекомбинации обратен процессу ионизации; если при ионизации возникают заряженные частицы, то при рекомбинации заряды

частиц взаимно компенсируются. Возможна электронноионная рекомбинация, т. е. рекомбинация электрона с положительным ионом, в результате которой возникает нейтральная молекула. Возможна также ионная рекомбинация, т.е. рекомбинация положительного и отрицательного ионов; в процессе этой рекомбинации ≪лншний» электрон с орбиты отрицательного иона переходит орбиту положительного на нона и возникают две нейтральные молекулы. Схемы этих процессов приведены на рис. 3-8. В результате рекомбинации выделяется энергия в виде фотонов.



Рис. 3-8. Схемы рекомбинации положительного иона с электроном (а) и отрицательным поном (б).

Назовем концентрацией частиц N число частиц в 1 см³ газа. Если в начальный момент времени (t=0) концентрации положительных и отрицательных частиц равны, т. е. $N_+=N_-=N$, то с течением времени концентрация частиц того или другого знака снижается в соответствии с соотношением

$$N = \frac{N_0}{1 + N_0 \rho t},\tag{3-9}$$

где *t* — время, *сек*;

р — коэффициент рекомбинации, характеризующий интенсивность нейтрализации заряженных частиц; величина этого коэффициента для ионной рекомбинации в воздухе при нормальной его плотности составляет ~ 2 · 10⁻⁶ см³/ион · сек.

Пример 3-3. Концентрация ионов в заданной точке канала газового разряда $N_+ = N_- = 10^{11}$ ион/см³. Рассчитать время, в течение которого эта концентрация уменьшится вдвое за счет рекомбинации частиц.

Из формулы (3-9) имеем:

$$t = \frac{1}{\rho N_0} \left(\frac{N_0}{N} - 1 \right).$$

Подставляя N_{0} , $N_{0}/N = 2$ и кожфициент рекомбинации $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$, находим. $t = \frac{2-1}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{11}}$ сек = 5 мксек.

3-6. ПОДВИЖНОСТЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ И ДИФФУЗИЯ Заряженных частиц

Заряженные частицы, образованные в результате ионизации, перемещаются вдоль силовых линий поля и диффундируют в окружающее пространство. Перемещение частиц ведет к перераспределению объемного заряда и электрического поля в межэлектродном промежутке.

В поле напряженностью E на заряженную частицу действует сила *qE*. При свободном движении эта сила сообщит частице постоянное ускорение, однако при столкновениях с молекулами газа частица будет постепенно терять приобретенную скорость. В результате аналогично движению тел в вязкой среде частица начнет двигаться с некоторой, в среднем постоянной скоростью, величина которой пропорциональна воздействующей силе *qE*. В случаях, когда $q = q_e$, эту пропорциональность обычно представляют в виде

$$v = kE, \tag{3-10}$$

где *v* — скорость движения частицы;

k — коэффициент, численно равный скорости движения частицы, см/сек, при E = 1 в/см и называемый ее подвижностью.

При нормальных атмосферных условиях подвижность положительных ионов $k_{+} = 1,6 \frac{c_{m/cek}}{s/c_{m}}$; подвижность отрицательных ионов $k_{-} = 2,2 \frac{c_{m/cek}}{s/c_{m}}$; подвижность электронов (при $E > 100 \ s/c_{m}) k_{e} = 5 \cdot 10^{s} \frac{c_{m/cek}}{s/c_{m}}$. Соответственно соотношению масс и длин свободных пробегов подвижность электрона на несколько порядков выше подвижности ионов.

Пример 3-4. Рассчитать расстояние, которое пробегают положительные и отрицательные ионы в воздухе при нормальных атмосферных условиях за время $\Delta t =$ =0,005 сек (четверть периода промышленной частоты) в поле со средней напряженностью 5 кв/см.

По формуле (3-10) определяем скорость ионов:

 $v_{+}=1,6\cdot 5\cdot 10^{3}=8\cdot 10^{3}$ cm/cek; $v_{-}=2,2\cdot 5\cdot 10^{3}=11\cdot 10^{3}$ cm/cek.

Расстояние, пройденное ионами, составит:

$$s_{+}=8\cdot 10^{3}\cdot 5\cdot 10^{-3}=40$$
 cm; $s_{-}=11\cdot 10^{3}\cdot 5\cdot 10^{-3}=55$ cm.

Помимо движения под действием сил электрического поля, заряженные частицы участвуют также в хаотическом тепловом движении, в результате которого происходит их перемещение из области большей в область меньшей концентрации. Такое перемещение называется диффузией. Диффузия происходит тем интенсивнее, чем больше градиент (скорость изменения в пространстве) концентрации и выше температура газа. Явление диффузии играет существенную роль в расширении канала электронных лавин при формировании разряда.

3-7. ПЛАЗМА

В XX веке физики обнаружили, что наряду с тремя известными агрегатными состояниями вещества-твердым, жидким и газообразнымсуществует четвертое состояние, названное плазмой. Плазма представляет собой газ, в котором ионизирована значительная часть молекул. Отличительной особенностью плазмы как ионизированного газа является ее квазинейтральность, т. е. отсутствие избыточных зарядов какоголибо знака (N₊=N₋) во всем объеме плазмы. Для поддержания плазменного состояния вещества необходима некоторая определенная достаточно высокая концентрация заряженных частиц. Объясняется это следующим. Под действнем хаотического теплового движения частиц легкие электроны стремятся уйти за пределы объема, занимаемого плазмой. Этому выходу противодействуют силы электрического поля, возникающие между вылетевшими электронами и оставшимися избыточными положительными ионами. Только при достаточной концентрации частиц эти силы создают потенциальный барьер на границах плазмы, способный удержать электроны от вылета из плазмы и поддерживающий тем самым плазменное состояние вещества с ее свойством квазинейтральности.

Плазму рассматривают как четвертое состояние вещества в силу присущего ей ряда специфических свойств. Будучи схожей с газом, плазма обладает также некоторыми свойствами металлов: плазма электропроводна, отражает электромагнитные волны. В ТВН плазма возникает в электрическом разряде при достаточно высокой степени ионизации в канале разряда (дуга, искровой разряд). Чем выше степень нонизации в разряде, тем примерно пропорционально выше и проводимость плазмы.

Плазма может быть получена и при чисто термической ионизации газа. Таким путем создается плазма в магнитогидродинамических геиераторах (МГД), разрабатываемых в СССР и в некоторых других странах. Эта плазма является «низкотемпературной» (10³—10⁴ °K), т. е. имеет относительно невысокую степень ионизации. Во Вселенной широко распространена высокотемпературная (10⁷—10⁸ °K) плазма, образующая ядра звезд и, в частности, Солнца. При этих температурах в плазме происходят термоядерные реакции. Физики всего мира в настоящее время работают над получением такой плазмы в земных условиях. Принципиально это возможно в искровом разряде огромной мощности.

Задачи и вопросы для самопроверки

1. Опишите условия возникновения и протекания: a) ударной ионизации газа; б) фотоионизации газа; в) термической ионизации газа. Приведите примеры устройств, в которых использовано явление поверхностной ионизации.

2. Чему равна кинетическая энергия электрона в электрон-вольтах при свободном пробеге расстояния 10-3 см в поле напряженностью 20 кв/см? Достаточна ли приобретенная энергия для ионизации или возбуждения молекулы азота и гелия?

3. Какое излучение (длина волны в ангстремах, характер излучения) необходимо для ионизации и возбуждения молекулы водорода, а также для поверхностной ионизации с медного электрода?

Ответ: 800; 1 110; 3 200 А.

4. Қакие газы называются электроотрицательными? В каких областях — с малой или большой напряженностью поля более вероятен захват электронов?

5. В атмосферном воздухе всегда имеются ионы обоих знаков с концентрацией N₊=N₋=500 ион/см³. Определить плотность тока в атмосфере при напряженности поля 1 кв/см.

Указание. Плотность тока $\delta = (N_+v_+ + N_-v_-)q$, где q — заряд иона и v_+ , v_- скорости движения ионов. Заряд иона принять в предположении однократной ионизации молекул воздуха $(q=q_e)$. Ответ: 3,04 · 10⁻¹³ a/cm^2 .

6. Опишите свойства плазмы. Какие условия необходимы для существования плазмы? Как получают плазму в технических условиях?

7. В результате газового разряда между электродами образовался плазменный канал. Какие процессы будут происходить в канале после снятия напряжения?

Глава четвертая

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

4-1. КОЭФФИЦИЕНТ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ

В предыдущей главе было показано, что в электрическом поле напряженностью Е для ионизации одной молекулы газа электрон должен пробежать до столкновения с молекулой путь x_н >U_n/E. Для того чтобы изучить ионизационные процессы в газе, определим длину свободного пробега электрона. Все частицы в газе, в том числе и электроны, находятся в хаотическом движении. Согласно кинетической теории гаэлектрон пролетает без столкновения путь х с вероятностью 30B

, где λ_e — средняя длина свободного пробега электрона. Запишем эту е закономерность в следующей форме:

$$Bep \{npofera\} = e^{-\frac{x}{\lambda_o}}.$$
 (4-1)

Средняя длина свободного пробега электрона λ_e обратно пропорциональна плотности газа о:

$$\frac{1}{\lambda_e} = A_{\delta}^{\prime} \delta. \tag{4-2}$$

Значения коэффициента A_δ для разных газов приведены в табл. 4-1. Там же даны значения λ_е при нормальных атмосферных условиях.

Таблица 4-1 Значения коэффициента А _д и длины свободного пробега электрона при нормальной плотности воздуха			
Газ	Ад. 1/см). _e , см	
Воздух Водород Н ₂ Азот N ₂ Гелий Не Аргон Аг	$ \begin{array}{c} 11,1\cdot10^{2}\\ 3,8\cdot10^{3}\\ 9,6\cdot10^{3}\\ 2,2\cdot10^{3}\\ 10,3\cdot10^{2} \end{array} $	$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	

Ионизация молекулы электроном произойдет, если путь пробега *х* достигнет значения *x*_и, необходимого для однократной ионизации. Следовательно,

Вер {ионизации при столкновении} = Вер {пробега x_{μ} } = $e^{-\frac{\gamma_{\mu}}{\lambda_{e}}}$. (4-3) Подставляя выражения

$$x_{\mathrm{H}} = \frac{U_{\mathrm{H}}}{E}$$
 H $\frac{1}{\lambda_{\mathrm{e}}} = A_{\mathrm{b}}\delta$,

находим, что

Вер {ионизации при столкновении} = exp
$$\left\{-\frac{A_{\delta}U_{\pi}}{E/\delta}\right\}$$
. (4-4)

Замена U_{π} на U_{B} дает формулу для вероятности возбуждения молекул газа электроном.

Определим теперь число ионизаций, совершаемых электроном на пути в 1 см. Если λ_e — средняя длина свободного пробега электрона (см), то среднее число столкновений на 1 см равно 1/ λ_e . Умножая число столкновений на вероятность ионизации при столкновении, получаем число ионизаций электрона на пути в 1 см, которое называется коэффициентом ударной ионизации и обозначается а. Следовательно,

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_{\bullet}} \exp\left\{-\frac{A_{b}U_{u}}{E/\delta}\right\}, \quad uohus/c.m.$$
(4-5)

Пример 4-1. Определить коэффициент ударной ионизации для азота при нормальных атмосферных условиях и напряженности E=30 кв/см.

По табл. 3-1 находим для азота $(N_s) U_m = 15,8$ зв. Согласно табл. 4-1 для азота коэффициент $A_{\delta} = 9,6\cdot10^{3}$ 1/см. По условию задачи $\delta = 1$. Находим по формуле (4-5) коэффициент ионизации: $\alpha = 10\cdot10^{3} \exp\left\{\frac{9,6\cdot10^{3}\cdot15,8}{30\cdot10^{3}}\right\} = 50$ иониз/см.

Эксперименты показывают, что значения <u>а</u> <u>ра</u>ссчитанные по формуле (4-5), несколько завышены. Вместе с тем они подтверждают существование вытекающей из формулы (4-5) функциональной зависимости вида

$$\frac{\alpha}{\delta} = f\left(\frac{E}{\delta}\right). \tag{4-6}$$

5-641

В качестве примера на рис. 4-1 дана такая зависимость для воздуха. При нормальных атмосферных условиях (δ =1) минимальная напряженность поля, при которой еще возможна заметная ионизация, ле-



Рис. 4-1. Зависимость $\alpha/\delta = -f(E/\delta)$ для воздуха.

жит около 20 кв/см. С ростом Е коэффициент а быстро растет.

4-2. ЛАВИНА ЭЛЕКТРОНОВ

Если напряженность электрического поля достигает значения, при котором возможна ударная ионизация, то в поле возникают лавинные процессы, в которых происходит размножение заряженных частиц электронов и ионов. Рассмотрим протекание этого процесса. Предположим, что в какой-либо точке поля с напряженностью *Е* возник свободный электрон, обладающий энергией, достаточной для ионизации молекул газа. Этот так называемый начальный электрон может возникнуть, например, в ре-

зультате фотоионизации молекул газа каким-либо внешним ионизатором. Этот электрон ионизирует молекулу, что приводит к образованию положительного иона и двух электронов. Разгоняясь в электрическом поле, каждый из этих электронов в свою очередь ионизирует по молекуле, что приводит к образованию трех положительных ионов и четырех электронов, и т. д. Этот лавинообразный процесс показан на рис. 4-2.



Рис. 4-2. Схема образования лавины электронов (а) и распределение в ней заряженных частиц (б).

Выведем соотношение, позволяющее количественно охарактеризовать лавину электронов в равномерном поле. Допустим, что на расстоянии x от начала лавины число электронов в лавине достигло n. Тогда на участке dx число ионизаций или число новых электронов будет равно:

$$dn = andx. \tag{4-7}$$

Обозначим расстояние, которое может пробежать лавина, через s. Оно может быть равно расстоянию между электродами либо при развитии разряда в газовом включении расстоянию между стенками твердой изоляции. Чтобы определить число электронов N в лавине, прошедшей путь x=s, разделим в уравнении (4-7) переменные и проинтегрируем его, причем учтем, что при x=0 n=1:

$$\int_{1}^{N} \frac{dn}{n} = \int_{0}^{s} \alpha \, dx.$$

В равномерном поле E = const, следовательно, постоянен и коэффициент a. Поэтому интегрирование дает:

$$\ln N = \alpha s \quad \text{или} \quad N = e^{\alpha s}. \tag{4-8}$$

Таким образом, число электронов возрастает с расстоянием по экспоненциальному закону и притом с тем большей интенсивностью, чем больше коэффициент ионизации α.

Электроны и ионы, образовавшиеся в лавине, перемещаются под действием электрического поля. Так как подвижность электронов много больше подвижности ионов, последние за время развития лавины смещаются весьма незначительно. В результате в голове лавины образуется избыток электронов, а в ее хвосте преобладают положительно заряженные ионы (рис. 4-2,6).

4-3. САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД

Для образовання лавины необходим по крайней мере один начальный электрон. В том случае, когда начальные электроны непрерывно воссоздаются, лавинный процесс не прекращается. Начальные электроны могут создаваться внешними ионизаторами; в этом случае разряд называют несамостоятельным. Воссоздание начальных электронов может происходить и за счет ионизационных процессов в самой лавине. В этом случае процесс носит самоподдерживающийся характер и разряд называется самостоятельным.

Выведем условия самостоятельного разряда в равномерном поле. Согласно соотношению (4-8) число ионизаций в лавине $N-1=e^{\alpha s}-1$. Ионизация в лавине сопровождается возбуждением части молекул и излучением фотонов. Механизм этого процесса был рассмотрен в § 3-2. Излучаемые фотоны могут вызвать вторичную ионизацию в газе или на катоде. Назовем коэффициентом вторичной ионизации в газе или на катоде. Назовем коэффициентом вторичной ионизации у число вторичных электронов, создаваемых фотонами, отнесенное к одному акту ионизации в лавине. Так как в лавине происходит $e^{\alpha s}-1$ ионизация, то общее число вторичных электронов равно $\gamma(e^{\alpha s}-1)$. Если это число равно 1, то это означает, что в результате своего развития лавина воссоздает начальный электрон. Следовательно, при условии

$$\gamma \left(e^{\alpha s} - 1 \right) \ge 1 \tag{4-9}$$

разряд будет поддерживаться, если даже действие внешнего ионизатора прекратится. Другими словами, условие (4-9) есть условие самостоятельного разряда. Заметим, однако, что для начала развития разряда необходим исходный начальный электрон. Условие (4-9) может быть переписано и в такой форме:

$$\alpha s = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \text{const.}$$
 (4-10)

Для воздуха значение $\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right) \approx 20$ и, следовательно,

$$as \approx 20.$$
 (4-11)

Связывая эту формулу с кривой $\frac{\alpha}{\delta} = f\left(\frac{E}{\delta}\right)$ по рис. 4-1, нетрудно рассчитать критическую напряженность $E_{\rm KF}$, необходимую для поддержания самостоятельного разряда в воздухе.

Пример 4-2. Определить критическую напряженность равномерного поля в воздухе на участке s = 2 см при давлении p = 700 мм pm. cm. н $t = 40^{\circ}$ C.

По формуле (3-1) находим плотность воздуха $\delta = 0,386 \cdot \frac{700}{273 + 40} = 0,86$. Из формулы (4-11) определяем $\alpha = \frac{20}{2} = 10$. По кривой на рис. 4-1 находим, что значение

 $\frac{\alpha}{\delta} = \frac{10}{0.86} = 11,6 \text{ соответствует } \frac{E}{\delta} = 32, \text{ откуда искомое значение } E_{\text{кр}} = 32.0,86 = 27,5 \text{ кв/см.}$

4-4. РАЗРЯДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРОМЕЖУТКА С РАВНОМЕРНЫМ ПОЛЕМ. ЗАКОН ПАШЕНА

Как было показано в § 4-1, коэффициент ударной ионизации α быстро возрастает с увеличением напряженности электрического поля E. Поэтому достаточно ничтожно малого повышения E сверх $E_{\rm кр}$, чтобы число воссоздаваемых лавиной начальных электронов γ ($e^{\alpha s}$ —1) стало боль ше единицы.

При этом число ионизированных частиц в газовом промежутке стремительно нарастает, что приводит к образованию между электродами плазменного канала. Ток через возникший проводящий канал определяется внешней цепью, в которую включен промежуток, и при атмосферном давлении разряд имеет искровую или дуговую форму.

таким образом, в промежутке с равномерным полем условие самостоятельности разряда оказывается совпадающим с условием пробоя промежутка. Значение разрядного напряжения U_p можно найти из равенства (4-5), если подставить в него значение α , заданное формулой (4-10), и принять в этой формуле $E = U_p/s$ (s — длина промежутка). Получаем тогда:

$$as = A_{\delta}(\delta s) \exp\left\{-\frac{A_{\delta}U_{\pi}}{U_{p}}(\delta s)\right\} = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right),$$
$$U_{p} = \frac{B(\delta s)}{C + \ln\left(\delta s\right)},$$
(4-12)

откуда

где коэффициенты
$$B = A_{\delta}U_{\mu}; C = \ln \frac{A_{\delta}}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}$$

Замечаем, что U_p является функцией произведения δs , остальные величины в формуле являются константами для данного газа. На рис. 4-3 по формуле (4-12) построена кривая $U_p = f(\delta s)$ для воздуха. Эта кривая имеет характерный минимум при малых значениях δs . Поясним ее ход на основе физических соображений.

Пусть задано расстояние s, например s=1 см. Тогда кривая на рис. 4-3 дает зависимость $U_p=f(0)$. Как следует из формулы (4-12), при заданном s самостоятельный разряд возникает при определенном значении $\alpha_{\rm KP}=20/s$. В свою очередь $\alpha_{\rm KP}$ равно числу столкновений электрона на пути в 1 см, умноженному на вероятность ионизации при этих



Рис. 4-3. Зависимость $U_p = f(\delta s)$ для воздуха. Пунктиром нанесена зависимость $E_p = f(s)$ при $\delta = 1$.

столкновениях [см. формулу (4-5)]. С ростом плотности газа возрастает число столкновений электрона с молекулами, но одновременно снижается путь свободного пробега электрона, что ведет к снижению вероятности ионизации. При увеличении δ против значения, соответствующему минимуму U_p , преобладает эффект снижения вероятности ионизации; при снижении δ против этого значения преобладает эффект снижения числа столкновений. В обоих случаях коэффициент α снижается и требуется большее напряжение для возникновения разряда.

• Эффект возрастания U_p при больших плотностях газа используется в изоляционных конструкциях со сжатым газом (кабели, конденсаторы). Эффект возрастания U_p при малых плотностях газа используется в конструкциях с вакуумной изоляцией (электроннолучевые трубки высокого напряжения, вакуумные выключатели).

Пусть теперь задана плотность δ , например $\delta = 1$. Тогда кривая на рис. 4-3 дает зависимость $U_1 = \hat{f}(s)$. Построим кривую $E_1 = \frac{U_1}{s} = \hat{f}(s)$.

Такая кривая дана на рис. 4-3 пунктиром. Значения E_p возрастают при снижении расстояния *s*, незначительно при *s* порядка сантиметров и резко при *s* порядка долей миллиметров и ниже. Физически такая зависимость объясняется тем, что со снижением *s*, т. е. со снижением длины лавины, снижается число столкновений в промежутке и необходимы все большие *E* для повышения вероятности ионизации (как и при малых δ). Вследствие возрастания *E* со снижением *s* кривая $U_p = Es = = f(s)$ проходит через минимум.

Кривая на рис. 4-3 показывает, что имеется определенный минимум напряжения, ниже которого разряд в промежутках невозможен. При 8=1 этот минимум примерно равен 300 в. Наличие такого мини-

[Гл. 4

мума играет важную роль в построении искровых промежутков разрядников.

Так как U_p зависит от произведения δs , то значение U_p не изменится, если плотность газа δ увеличить, а расстояние s уменьшить в n раз. В этом заключается правило подобия разрядов в промежутках. Связь U_p с произведением δs была впервые установлена Пашеном; поэтому зависимость $U_p = f(\delta s)$ и правило подобия промежутков часто называют законом Пашена.

4-5. ПЕРЕХОД ОТ ЛАВИННОЙ ФОРМЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА К ИСКРОВОМУ РАЗРЯДУ В МАЛЫХ ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКАХ С РАВНОМЕРНЫМ ПОЛЕМ. ОБРАЗОВАНИЕ СТРИМЕРОВ

КВ § 4-4 было показано, что в равномерном поле условие самостоятельного разряда есть также условие возникновения искрового разряда в промежутке, но не был изучен процесс перехода от одной формы разряда к другой.) Исследования показали, что этот процесс существенно различен для разреженных газов и газов высокой плотности (близкой к 1).

(В разреженных газах каждая лавина ведет к нарастанию числа начальных электронов, инициирующих следующую лавину. В результате в каждой последующей лавине возрастает число ионизаций.) Этот процесс нарастает по экспоненциальному закону, пока промежуток между электродами не заполнится хорошо проводящей плазмой, состоящей из положительных ионов, оставшихся от предыдущих лавин, и электронов, образованных последней лавиной. (Таким образом, в разреженных газах разряд носит многолавинный характер. Ввиду разреженности газа основную роль во вторичной ионизации, создающей новые начальные электроны, играет фотоионизация с катода, Поэтому на разрядное напряжение промежутка заметно влияет материал катода, характеризуемый потенциалом поверхностной ионизации (табл. 3-3).

(При высокой плотности газа, примерно при $\delta s > 1$, наблюдается иная картина развития самостоятельного разряда. Искажение поля по-



Рис. 4-4. Схема стримерной формы разряда в малом промежутке с равномерным полем. *а* — начальная лавина пересекла промежуток; электроны лавины поглощены анодом; головка лавины интенсивно испускает фотоны; *б* — фотоионизация породила вторичные лавины: электроны вторичных лавин проникают внутрь первичной лавины; началось образование плазменного канала стримера; *в*, *е* — на конце плазменного канала резко увеличивается напряженность поля, что приводит к интенсивной фотоионизации и возникновению новых лавин; плазменный канал быстро прорастает к катоду (положительный стример); *д* — стример достиг катода; разряд переходит в искровию.

ложительными зарядами лавины оказывается в этом случае весьма значительным, что приводит к выделению большого количества фотонов и интенсивной фотоионизации в объеме газа вблизи головки лавины (рис. 4-4,*a*). Образующиеся вторичные лавины направляются к головке первичной лавины, где напряженность поля особенно велика. Электроны вторичных лавин проникают внутрь первичной лавины, образуя с ее положительными нонами канал проводящей плазмы. Напряженность поля на конце канала (со стороны катода) повышается, что ведет к возникновению новых вторичных лавин и к дальнейшему прорастанию плазменного канала и т. д. Такой быстро удлиняющийся канал получил название стримера (от английского stream — поток). Когда стример достигает катода, плазменный канал замыкает электроды и разряд переходит в искровую стадию.

Таким образом, в малых промежутках и в плотных газах разряд протекает в однолавинной форме, переходящей в стримерную. Время разряда — порядка 10⁻⁸ сек. Основную роль в образовании вторичных лавин играет фотоионизация в объеме газа, поэтому материал электрода не оказывает заметного влияния на напряжение искрового разряда. ∕

4-6. САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД В НЕРАВНОМЕРНОМ ПОЛЕ. Лавинная корона

В неравномерном поле остаются в силе основные закономерности самостоятельного разряда, но вследствие изменения Е вдоль пути лавины условие самостоятельного разряда (4-10) приобретает вид:

$$\int_{0}^{s} \alpha \, dx = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = \text{const. (4-13)}$$

(Коэффициент ионизации α по-преж нему определяется формулой (4-5), в которой *E* теперь является функцией *x*.)

Ограннчимся качественной характеристикой самостоятельного разряда / вблизи электрода с малым раднусом например провода или кривизны, стержня.) Лавинный процесс возникает на некотором пути s вблизи электрода; за участком s напряженность поля уже недостаточна для нонизационных процессов. При условии соблюдения равенства (4-13) разряд на участке я самостоятельный характер. имеет Однако в данном случае лавинный процесс не приводит непосредственно с искровому разряду, поскольку ионизационные токи ограничены большим емкостным сопротивлением оставшейся части промежутка Разряд в такой форме получил название коронного разряда или просто короны. Коронный разряд возникает при некоторой начальной напряженности поля Ен или начальном напряжении U_{н.}





а — развитие лавин; б — образование облачка избыточных положительных нонов; в — нскажение исходного поля в промежутке объемным зарядом. (Рассмотрим особенности коронного разряда на примере стержневого электрода.) Напряженность поля особенно велика вблизи стержня и при удалении от него резко спадает; соответственно корона возникает в области вблизи стержня. Характер коронного разряда существенно зависит от полярности электрода.

Пусть электрод имеет положительную полярность. Возникающие вблизи стержня лавины будут развиваться по направлению к стержню (рис. 4-5,*a*). Под действием сил электрического поля легкие электроны лавины быстро перемещаются к стержню и поглощаются им, а тяжелые положительные ноны направляются к расположенному в отдалении



Рис. 4-6. Возникновение короны у отрицательно заряженного стержня.

а -- развитие лавин; б -- образование облачков положительных и отрицательных ионов; в -- искажение исходного поля в промежутке объемными зарядами.

катоду, но со скоростью, много меньшей, чем скорость движения электронов (§ 3-6). Из-за этого различия в скоростях стержень оказывается окруженным облачком избыточных положительных ионов (рис. 4-5,6). Создаваемое облачком ионов 1 дополнительное поле с напряженностью E_q ослабляет основное поле Е у стержня (анода) и усиливает основное поле вдали от стержня (по направлению к катоду), как это показано на рис. 4-5, в. В результате область, охваченная короной, расширяется.

Рассмотрим теперь лавинную корону вблизи отрицательного стержня. В этом случае лавины возникают у стержня (катода) и развиваются в глубь промежутка (рис. 4-6,а). Электроны выносятся силами электрического поля из области ионизации и попадают в область слабого электрического поля, где они захватываются нейтральными молекулами и образуют отрицательные ионы. В результате вблизи катода образуется облачко положительных ионов; отрицательные ионы рассеяны за концентрированным об-

лачком положительных ионов (рис. 4-6,6). Вводя, как и ранее, центры скоплений ионов того и другого знака (зачерненный и светлый кружки) и нанося напряженности E_q дополнительного поля, убеждаемся, что результирующая кривая напряженности поля приобретает форму, показанную на рис. 4-6,8. Вблизи катода поле уснливается, а в неионизированном пространстве поле ослабляется. В результате происходит стягивание лавинной короны к отрицательному электроду. Процесс стягивания происходит следующим образом. С каждой новой лавиной происходит усиление поля вблизи катода и ослабление поля за центром скопления положительных ионов. Поэтому лавины начинают пробегать все меньшее расстояние. В конечном счете у поверхности катода образуется узкий слой высокой напряжен-

¹ Условный центр облачка обозначен на рис. 4-5,6 зачерненным кружком.
ности поля, где существует лавинный процесс и где рождаются электроны, выносимые во внешнее пространство.

Очевидно, что начальные значения напряженности E_н и напряження U_н при прочих равных условиях тем меньше, чем больше кривизна коронирующего электрода. Хотя коронный

разряд при отрицательной полярности тормозится возникающим объемным зарядом, начальная напряженность короны $E_{\rm H(-)}$ при отрицательной полярности ниже, чем при положительной полярности $E_{\rm H(+)}$. Это объясняется тем, что при отрицательной полярности существенную роль играет фотоэффект с катода, способствующий возникновению самостоятельного разряда. Различие $E_{\rm H(+)}$ и $E_{\rm H(-)}$ незначительно у электродов с радиусом кривизны $\rho > 1$ см.

'В слабонеравномерных полях, например в малых промежутках, возникновение лавинной короны при небольшом повышении напряжения приводит к полному пробою промежутка. Так как напряжение возникновения короны у положительного электрода выше, чем у отрицательного, то и пробивное напряжение малых промежутков выше при положительной полярности электрода с большей напряженностью поля.

/ Лавинная корона отрицательной полярности развивается в виде четко выраженных импульсов экспоненциальной фор-



Рис. 4-7. Импульсы тока лавинной короны в промежутке игла — плоскость. а — отрицательная полярность, $l_{cp} = 0.7$ *мка*; 6 — то же, $l_{cp} = -2$ *мка*; 6 — положительная поляр-

ность, I_{ср}=0,5 мка.

мы (рис. 4-7), названных импульсами Тричеля по имени их первого исследователя) (По измерениям Л. С. Перельмана импульсы Тричеля имеют форму 10/30 нсек (1 нсек=10⁻³ мксек), а их амплитуда равна 6—8 ма.) При повышении напряжения увеличивается только число импульсов в единицу времени (и, следовательно, средний ток), но амплитуда и форма отдельных импульсов остаются без изменения. Положительные импульсы развиваются хаотически, их амплитуда 15—40 ма при форме 15—30/80—120 нсек.)

4-7. СТРИМЕРНАЯ КОРОНА

И Повторные лавины в коронном разряде приводят к высокой концентрации положительных ионов у коронирующего острия. При незначительном повышении напряжения на промежутке сверх начального коронного поле E_q , создаваемое этими зарядами, становится сравнимым (в данной области) с основным полем E. При этом условии в коронном разряде возникают стримеры, процесс образования которых аналогичен приведенному на рис. 4-4.

(На рис. 4-8 показано образование положительного (анодного) стримера в лавинном коронном разряде. Фотоны, возникающие в головке лавины, приводят к образованию вторичных лавин впереди и с боков головки первичной лавины. Вторичные лавины втягиваются в первичную лавину, образуя плазменный канал, по которому электроны устремляются к аноду. Поскольку развитие лавин и плазменного канала приводит к усилению поля в глубине промежутка (т. е. по направлению к катоду). одновременно с развитием плазменного канала впереди него



Рис. 4-8. Развитие положительного (анодного) стримера в неравномерном поле.

а — закончилось развитие начальной лавины; возникают вторичные лавыпы, ... ляющиеся к головке начальной лавины: δ — по каналу начальной лавины разви-вается стример (направление движения троита стримера указано стрелкой). фронта стримера указано стрелкой), в глубине промежутка возникает вторич-ная лавина: в -- стример заполиил канал в начальной лавине; завершилось развитие вторичной лавины в глубине промежутка.

происходит возникновение и развитие новых лавин. Эта одновременность обеспечивает высокую среднюю скорость продвижения фронта

положительного стримера, составляющую примерно 10⁸—10⁹ см/сек, т. е. всего на несколько порядков ниже скорости света. Очевидно, что это не скорость движения электронов, а скорость продвижения фотоионизационных процессов в глубь промежутка.

Развитие отрицательного (катодного) стримера показано на рис. 4-9. Отрицательный стример также возникает при достаточной концентрации положительных зарядов в головке лавины и развивается в результате слияния ряда лавин в виде быстро удлиняющегося канала. Однако возникновение отрицательного стримера 3aтрудняется низкой напряженностью электрического поля вне узкой зоны ионизации у стержня. Продвижение катодного стримера в глубь промежутка сдерживается влиянием положительного объемного заряда лавин. усиливающего поле в той части промежутка, которая уже пересечена лавинами, и резко ослабляющего поле в остальной части промежутка. Благодаря этому влиянию возникновение

вторичных лавин впереди стримерного канала оказывается возможным лишь после того, как стримерный канал разовьется по всей длине первичной лавины. Таким образом, средняя скорость продвижения катод-

ного стримера оказывается меньше, чем анодного. Поток электронов в отрицательном стримере движется от катода по каналу стримера. Непрерывность потока у катода обеспечивается интенсивной ионизацией в узком прикатодном слое (между катодом и положительным объемным зарядом), в котором напряженность поля весьма высока.

В соответствии с различным физическим характером протекания процесса различна и визуальная картина стримерной короны при положительной и отрицательной полярности стержня. Положительная корона имеет больший радиус; ввиду случайного характера вторичных лавин, проникающих в глубь промежутка, внешняя область коронного разряда состоит из небольшого числа ярко выделенных ветвей, направление которых имеет случай-



Рис. 4-9. Развитие отрицательного (катодного) стримера в неравномерном поле.

 а — закончилось развитие начальной лавины; электроны из головки лавины уходят в глубь электроны из толовки лавины уходит в глуов промежутка; возникают вторичные лавины, направляющиеся к головке начальной лавины вается стример (направление движения фрон-та стримера указано стрелкой); δ — стример заполнил канал начальной лавины; в глубине промежутка возникает вторичная лавина.

ный характер. Напротив, отрицательная корона стянута к электроду, состоит из очень большого количества коротких ветвей и имеет довольно четкую границу, за которой видны только тонкие бледные нити — следы отдельных лавин.

(Стример, как положительный, так и отрицательный, существует до тех пор, пока в нем поддерживается поток электронов, т. е. ток. Концентрация положительных ионов в стримере достигает 10¹² ион/см³. Амплитуда тока в стримере достигает 10 а. Возникает вопрос — как замыкается цепь тока? Ответ на этот вопрос иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 4-10. Конец стримера связан с противоположным элек-



Рис. 4-10. Развитие стримеров в промежутке стержень — плоскость.

тродом некоторой емкостью C_c . Ток, протекающий в канале стримера, замыкается через ток смещения в емкости C_c . Если принять, что напряжение между головкой стримера и противоположным электродом неизменно, то ток смещения равен $i = \frac{d}{dt} (uC_c) = u \frac{dC_c}{dt}$.

Большому *i* соответствует большое значение dC_c/dt , обеспечиваемое высокой скоростью продвижения канала стримера. Таким образом, стример может существовать только в развитии. Следовательно, каждый стример коронного разряда после своего полного развития должен затухнуть. При затухании стримера восстанавливается высокая напряженность поля на поверхности электрода, что способствует образованию нового стримера. В результате из электрода развиваются следующие друг за другом стримерные разряды.

4-8. ПЕРЕХОД СТРИМЕРА В ИСКРОВОИ РАЗРЯД В ПРОМЕЖУТКАХ С НЕРАВНОМЕРНЫМ ПОЛЕМ

(При подъеме напряжения на промежутке с неравномерным полем длина стримеров возрастает, пока один из стримеров не пересечет весь промежуток и не произойдет искровой разряд между электродами ... В промежутках с симметричными электродами (например, стержень стержень) обычно образуются встречные стримеры положительной и отрицательной полярности.)Искровой разряд в воздухе, в промежутках с межэлектродными расстояниями *s* в десятки сантиметров, происходит при средних напряженностях поля E_p порядка 10 кв/см, что значительно меньше критической напряженности самостоятельного разряда в равномерном поле. Объясняется это характером стримерного разряда: стример приводит к искажению поля в непробитой части промежутка и к повышению напряженности поля вблизи головки стримера.

Когда стример замыкает промежуток, по каналу стримера начинает проходить ток разряда между электродами. При этом повышается температура канала и возникает интенсивная термическая ионизация, приводящая к повышению проводимости плазменного канала, повышению тока разряда между электродами и т. д. В результате за очень малый

¹ Искровой разряд часто называют просто разрядом.

промежуток времени, порядка 10-8 сек, формируется ярко светящийся искровой канал высокой проводимости, замыкающий электроды промежулка.

По пути искрового разряда начинает проходить ток короткого замыкания между электродами. Искра при этом может перейти в стадию дугового разряда, для которой характерны очень малые напряженности в разрядном канале. Искровая и дуговая стадии разряда будут более подробно рассмотрены в § 4-11 и 4-12.

4-9. ПЕРЕХОД СТРИМЕРА В ИСКРОВОЙ РАЗРЯД В ДЛИННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ. ЛИДЕРНАЯ СТАДИЯ РАЗРЯДА

В воздушных промежутках длиной в несколько метров или десятков метров разряд приобретает новые качественные особенности. Проводимость стримеров уже недостаточна для создания хорошо проводящего канала между электродами, и по следу одного из стримеров возникает разряд в новой, так называемой лидерной форме.

Ввиду того что разрядные напряжения промежутков меньше при положительной полярности электрода, с которого начинается разряд, изучению основное внимание уделялось положительного лидера (рис. 4-11). Электроны в канале стримера, как уже отмечалось в § 4-5,



Рис. 4-11. Схема развития положительного лидера (по И. С. Стекольникову).

и — распространение лидера тл по каналу стриме-ра тк; у головки стримера происходит образование новых лавин; б — завершение переработки канала стримера в лидер; в → образование нового стриме-ра kl и новых лавин.

отсасываются анодом. При достаточной концентрации электронов, движущихся под действием напряженности поля в канале, т. е. при достаточно большом токе, возникает интенсивная термоионизация, приводящая к повышению концентрации заряженных частиц в канале стримера, что ведет к росту проводимости плазменного канала и дальнейшему росту тока. Этот процесс начинается у электрода, так как через сечение канала стримера у электрода проходит весь поток электронов (рис. 4-11,а). В результате происходит переработка канала стримера в хорошо проводящий плазменный канал — лидер. Визуально наблюдается **ЭTOT** процесс в виде яркого свечения, быстро распространяющегося от электрода кана.ту стримера. по Концентрация зарядов в ликанале достигает дерном

10¹⁸ ион/см³; ток лидера достигает сотен ампер. 'Лидер представляет хорошо проводящий плазменный канал.

Когда лидерный канал достигает конца стримера, наступает пауза (рис. 4-11,6). Лидер вследствие его высокой проводимости можно уподобить металлическому стержню, выходящему из электрода. Высокие напряженности на конце такого стержня приводят к образованию нового стримера, продолжающего разрядный канал, новому продвижению

76

лидера и т. д. Естественно, что такой механизм развития разряда позволяет лидеру перекрывать большие расстояния при относительно малых средних напряженностях поля. Действительно, в длинных воздушных промежутках разряд происходит при средних напряженностях поля E_p порядка 1—2 кв/см, причем чем длиннее промежуток, тем меньше E_p . Это свойство лидерного разряда создает трудности в построении электропередач сверхвысокого напряжения.

(Особенностью разряда в длинных воздушных промежутках является внедрение в промежуток положительного объемного заряда, созда-

ваемого положительным стримером. / Этот объемный заряд выравнивает электрическое поле в непробитой части промежутка и тем самым несколько повышает разрядное напряжение. /

Схема образования отрицательного лидера показана на рис. 4-12. В этом случае поток электронов направлен от электрода. Канал лидера исходит из катода, где в области прикатодного падения напряжения поддерживается ударная ионизация и возникающие электроны поступают в канал лидера. Вследствие тормозящего действия отрицательных зарядов, выносимых лидером в неионизированную область, продвижение отрицательного лидера затрудняется и требуются более высокие напряжения для полного пробоя промежутка.

По мере продвижения лидера в глубь промежутка на конце лидера появляются все новые стримеры. Каждый из вновь образовавшихся стримеров представляет вероятное направление прорастания канала лидера и тем более вероятное, чем более нонизированным является канал того или иного стримера. При развитии лидера по этому каналу снижается продольная напряженность в промежутке, что ведет к затуханию остальных стримеров. Преимущественное направление траектории лидера определяется линией максимальных напря-



Рис. 4-12. Схема образования отрицательного лидера (по И. С. Стекольникову).

а — распространение лидера тл по каналу стримера тk; б — завершение переработки канала стримера в лидер и образование новых лавин; электроны из лавин уходят в глубь промежутка; в — образование нового стримера kl.

женностей в промежутке, но отклонение траектории лидера от этого преимущественного направления носит, как и развитие стримеров, случайный характер. Например, при разряде в промежутке стержень — плоскость места, где лидер касается плоскости, распределяются так же, как места попадания пули около центра мишени при стрельбе с плохой наводкой.

4-10. ГЛАВНЫЙ РАЗРЯД В ДЛИННЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

В момент, когда лидер достигает противоположного электрода, начинается стадия главного разряда. Изучим этот процесс на примере промежутка стержень — заземленная плоскосты Аналогичный характер имеет разряд молнии (см. гл. 21).

Стилизованная картина развития лидера и перехода его в главный разряд показана на рис. 4-13. Впереди головки лидерного канала прорастают стримеры, прокладывающие путь лидеру. 1 Потенциал лидера так высок, что вокруг лидерного канала образуется коронный чехол, в котором сосредоточивается значительная часть заряда лидера/В момент, когда лидер достигает заземленной плоскости, по лидерному каналу от плоскости начинает распространяться разрядная волна, снижающая потенциал лидера до нуля (рис. 4-13,*в*). Волна распространяется в ионизированной среде коронного чехла, вследствие чего скорость движения разрядной волны составляет примерно 10⁸—10⁹ см/сек. С разрядной волной связано стекание заряда лидера в землю. Прежде всего



Рис. 4-13. Схема перевода лидера в главный разряд.

а — прорастание лидера; б — лидер коснулся второго электрода; в — прорастание главного разряда; і — стример; 2 — лидер; 3 — канал главного разряда; 4 — коронный чехол.

ростью главного разряда и (м/сек), простой формулой /

 $i = qv. \tag{4-14}$

Когда главный разряд достигает противоположного электрода (стержня), процесс переходит в новую стадию, характеризующуюся замыканием электродов через плазменный канал высокой проводимости. Эта стадия, называемая искрой, рассматривается в § 4-11.

4-11. ИСКРА

Искра в электрических сетях возникает в результате пробоя воздушной изоляции под действием импульса коммутационного или атмосферного перенапряжения. На фронте импульса по мере роста тока плазменный канал сильно разогревается и расширяется. Расширение происходит в форме цилиндрической ударной волны. Оптические исследования показали, что плотность газа от центра канала к его периферии нарастает очень круто (рис. 4-14). На периферии канала создается оболочка высокой плотности, охватывающая центральную часть канала, где газ сильно разрежен и сильно ионизирован. По мере расширения канала плотность оболочки снижается.

На рис. 4-15 показана зависимость продольной напряженности поля в канале искры от тока в начальный момент ее образования. Осо-

стекают заряды, сосредоточенные в самом лидерном канале. Когда лидерный канал приобретает нулевой потенциал, возникает явление «обратной короны», т. е. коронного разряда из области коронного чехла по направлению к лидерному каналу. В результате заряд коронного чехла также стекает по лидерному каналу в землю.

Процесс распространения по лидерному каналу разрядной волны называется главным разрядом, а канал, охваченный разрядной волной, главным каналом Визуально главный разряд имеет характер яркого свечения (значительно более яркого, чем лидер), движущегося в направлении, обратном движению лидера. / В стадии главного разряда через его канал прозначительный ток, соответстходит вующий стеканию с большой скоростью зарядов лидерного канала. Иок главного разряда i(a) связан с плотностью заряда (на единицу длины) в лидерном канале q (κ/m) и скобенностью искры является возрастающая вольт-амперная характеристика E = f(I). Удельное активное сопротивление искры $R_{\pi} = E/I$.

В начальной фазе расширение канала носит характер взрыва. Ударная акустическая волна создает характерный треск искрового разряда. Искровой разряд в дереве приводит к взрывообразному расщеплению древесины, что часто наблюдается на деревянных опорах линий электропередачи при грозах; искровой разряд в бетоне может привести к раскалыванию бетонных изделий.

В ТВН существенное значение имеет переход импульсной искры в дуговой разряд (см. § 4-12), поддерживаемый рабочим напряжением. Пе-



Рис. 4-14. Распределение плотности газа по раднусу расширяющегося цалиндрического канала искры (по данным Драбкиной). ро – плотность газа до возникновения

яскры.



Рис. 4-15. Продольная напряженность поля в канале искры и удельное сопротивление канала в зависимости от амплитуды тока.

реход этот определяется энергетическими соотношениями в искре. С одной стороны, происходит охлаждение искры, в основном в результате быстрого перемещения волокон искры от оси разряда к периферии. По выводам А. С. Майкопара этот процесс ведет к потере мощно-

сти искры (на единицу длины) $P_1 = cv^2r^2$, где r — радиус искры, v — относительная скорость перемещения оболочки канала искры, c — коэффициент, зависящий от свойств охлаждающей среды. С другой стороны, градиент рабочего напряжения $E_{\rm раб}$ приводит к выделению в искре

мощности (на единицу длины), равной $P_2 = \frac{E_{pa6}^2}{R_{m}}$, где R_m - удельное

сопротивление искры. Если $P_1 > P_2$, то небаланс мощности приводит к непрерывному повышению R_{π} и искра погаснет. В противном случае R_{μ} снижается и возникает дуговой разряд. Из приведенного качественного объяснения процесса следует, что искра не будет переходить в дугу при некотором значении $E_{pa5} < E_{\kappa p}$. В свою очередь, $E_{\kappa p}$ будет тем больше, чем интенсивнее охлаждение искры при ее расширении. Как показали исследования, $E_{\kappa p}$ для искры в открытой атмосфере составляет ~ 10 кв/м, а для искры в дереве $E_{\kappa p} \approx 15 \kappa a/m$. Более полные данные показывают, что в электрических сетях переход импульсной искры в дуговой разряд имеет вероятностный характер, определяемый случайностью момента импульсного разряда относительно фазы переменного напряжения и статистическим характером всех процессов искрового разряда.

Искровой разряд может сыграть выдающуюся роль в овладении управляемой термоядерной реакцией. Первый доклад на эту тему был представлен академиком И. В. Курчатовым. При искровом разряде с током порядка 10⁶ а в сильно разреженном газе проявляется так называемый пинч-эффект, сущность которого заключается в том, что под действием собственного магнитного поля канал искры сжимается, в результате чего температура канала возрастает до десятков миллионов градусов. При таких температурах в газах возникают термоядерные реакции. Основная трудность в решении этой величайшей проблемы современности состоит в поддержании устойчивости высокотемпературного плазменного канала.

4-12. ДЛИННАЯ ДУГА В ВОЗДУХЕ

/ Дуговой разряд в установках высокого напряжения возникает между электродами под действием рабочего напряжения вслед за искровым разрядом при $E_{pa6} > E_{\kappa p}$, при замыкании электродов металлическими быстро перегорающими проволочками (набросы), при перекрытии загрязненной изоляции¹. Во всех случаях стремятся к скорейшему погасанию дуги.

Почти всю длину дуги занимает плазменный столб, плотность электронов и ионов в котором достигает $10^{18} \ ed/cm^3$. Электрическое поле в столбе дуги E_{π} сообщает энергию электронам и ионам, причем основную долю энергии воспринимают электроны, обладающие большей под-



Рис. 4-16. Вольт-амперная характеристика открытой электрической дуги в воздухе (по А. С. Майкопару).



Рис. 4-17. Открытая дуга на стержневых (а) и роговых (б) электродах.

вижностью. При столкновениях электроны отдают энергию молекулам, увеличивая их кинетическую энергию, т. е. повышая температуру газа. При высоких давлениях температура дуги лежит в пределах 4 000—15 000° К, что обеспечивает интенсивную термическую ионизацию.

Электроны поступают в дуговой столб за счет термоэлектронной эмиссии из катода, разогретого дугой. Переход электронов из электрода в газ обеспечивается прикатодным падением напряжения, величина ко-

¹ Дуговой разряд в коммутационных аппаратах в этом курсе не рассматривается.

торого составляет всего несколько десятков вольт. Если падение напряжения в приэлектродных областях пренебрежимо мало в сравнении с падением напряжения на плазменном столбе, дугу называют длинной. Энергия, подводимая из внешней электрической цепи к длинной дуге, выделяется в основном в плазменном столбе, так что характеристики длинной дуги и ее устойчивость полностью определяются процессами в столбе дуги. В установках высокого напряжения дуги в воздухе практически всегда являются длинными.

В устойчивой дуге сохраняется баланс между подводимой мощностью $P = E_{\pi} l l$ и потерей мощности в окружающее пространство в ре-



Рис. 4-18. Исходная расчетная схема (а) и графическое определение критической длины дуги (б) на постоянном токе.



Рис. 4-19. Исходная расчетная схема (а) и графическая грубая оценка критической длины дуги (б) на переменном токе.

зультате тепловой конвекции и теплопроводности. В диапазоне токов 0,1—50 а энергия отдается дуговым столбом в основном за счет теплопроводности, а при меньших и бо́льших токах — за счет свободной конвекции. Изменение механизма теплоотдачи заметно сказывается на ходе вольт-амперной характеристики дуги $E_{\pi} = f(I)$, имеющей в целом падающий характер (рис. 4-16). В электрических системах токи, возникающие в результате замыкания фаз, обычно превышают 100 а. Этим токам соответствует почти неизменный градиент, близкий к 15 в/см.

Дуга в воздухе растягивается, увлекаемая конвекционными потоками разогретого газа. Дуга, возникшая между горизонтальными электродами (рис. 4-17,*a*), через время *t* приобретает длину l=2h+s=2vt++s, где скорость v — порядка 100—150 *см/сек*. Вследствие изгиба и закручивания ствола дуги ее действительная длина еще более возрастает и может быть ориентировочно принята равной 4*l*. В большей степени растяжению дуги способствуют роговые промежутки, показанные на рис. 4-17,*6*. Основания дуги «скользят» по рогам, что ведет к возрастанию скорости *v*.

При увеличении длины дуги l сверх некоторой критической $l_{\rm kp}$ напряжение на дуге $U_{\rm g} = E_{\rm g} l$ окажется выше приложенного к электродам; баланс мощности нарушится и произойдет самопогасание дуги. Рассмотрим определение $l_{\rm kp}$ для дуги постоянного тока в схеме на 6—641 рис. 4-18,*а*. Внешняя U-l характеристика выражается уравнением: $U=U_0-Ir$. Вольт-амперную характеристику дуги находим по кривой на рис. 4-16, полагая $U_{\pi}=E_{\pi}l$. Пересечение U-l характеристик (рис. 4-18,*б*) определяет возможные режимы горения дуги. Из двух возможных режимов 1 и 2 устойчивым является только режим 1.¹ По мере увеличения длины дуги характеристика U=f(l) подымается, пока при $l=l_{\kappa p}$ не произойдет слияние устойчивой точки 1 и неустойчивой точки 2. В этой критической точке происходит самопогасание дуги; при $l>l_{\kappa p}$ горение дуги невозможно.

В цепях переменного тока U-I характеристика дуги вследствие тепловой инерции дугового столба зависит в каждый данный момент от предшествующего режима дуги. В первом приближении можно, однако, считать, что эффективные значения тока дуги и градиента напряжения на ней связаны характеристикой, приведенной на рис. 4-16.1 Грубая оценка критической длины дуги для цепи переменного тока может быть выполнена в предположении, что напряжение на дуге сохраняет синусоидальную форму; тогда зависимость на рис. 4-16 может быть распространена на связь между действующими значениями тока и напряжения дуги. fДля цепи переменного тока с внешним индуктивным сопротивлением $x = \omega L$ (рис. 4-19,*a*) внешняя характеристика выразится уравнением $U = \sqrt{U_0 - (Ix)^2} = f(I)$ и будет иметь вид, показанный на рис. 4-19,6. Пересечение характеристик определяет устойчивый ре-



жим в точке 1. При длине дуги $l = l_{\rm KP}$ происходит самопогасание дуги. При $l > l_{\rm KP}$ горение дуги невозможно.

4-13. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СТАДИИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

На рис. [4-20 приведена последовательность различных стадий газового разряда в неравномерном (преимущественно резко неравномерном) и равномерном полях. В длинных промежутках разряд проходит все стадии, начиная от лавинной короны до главного, искрового и дугового разряда. В относительно коротких промежутках лидерная стадия и стадня главного разряда практически отсутствуют.

В равномерном поле отсутствуют лавинная и стримерная формы короны и самостоятельный разряд непосредственно переходит в искровой Однако этот переход также осуществляется путем развития стримеров, но в отли-

чие от неравномерного поля в равномерном поле возникновение стримеров равновероятно по всей длине промежутка.

4-14. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Изучение самостоятельного разряда (см. § 4-4) выявило влияние плотности воздуха на разрядное напряжение Как показывают эксперименты, разрядное напряжение воздушных промежутков зависит также от влажности воздуха, причем влияние влажности возрастает с уве- лличением степени неравномерности поля. Нормальной абсолютной влажностью принято считать влажность воздуха 11 г/м³. Все опытные

кривые по разрядным напряжениям промежутков, как правило, относятся (путем пересчета) к нормальной плотности и влажности. ИЕсли необходимо определить разрядное напряжение при условиях, отличающихся от нормальных, используют формулу /

$$U_{\rm p} = U_{\rm p,n} \frac{\delta}{K}, \qquad (4-15)$$

- где U_{р.н} разрядное (искровое) напряжение при нормальных атмосферных условиях;
 - δ относительная плотность воздуха;
 - К поправочный коэффициент на влажность. значения которого даны на рис. 4-21, 4

Разрядные характеристики промежутков снимаются в различных лабораториях мира. Даже малые различия в условиях опыта влияют на их результаты, и обычно между опытными данными разных лабораторий суще-Международная электротехническая комиссия призвана унифицировать эти данные. Сведения по



Рис. 4-21. Поправочный коэффициент на влажность воздуха. При напряжении менее 141 комакс поправка в процентах уменьшается прямо пропорционально напряжению. При импульсах напряжения с предразрядными временами менее 10 мксек поправка в процентах уменьшается пропорциоствуют некоторые расхождения. Анально предразрядному времени. Для промерным полем (шаровой промежуток, промежуток между плоскостями) К≈1,0.

разрядным напряжениям воздушных промежутков излагаются в гл. 5.

4-15. БАРЬЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

Разрядные напряжения искровых промежутков стержень — плоскость при положительной полярности могут быть повышены путем установки барьера вблизи стержня. При возникновении короны вблизи положительного стержня положительные ноны, выносимые силами электрического поля к противоположному электроду, задерживаются барьером и растекаются /по нему (рис. 4-22,а). В результате поле между барьером и плоскостью выравнивается, что ведет к значительному повышению разрядного напряжения промежутка. Существует оптимальное расстояние зопт между стержнем и барьером, при котором разрядное напряжение максимально. При s<sопт коронирование возникает за барьером и роль барьера снижается; при s>sont разрядное напряжение снижается вследствие снижения длины промежутка с выравненным полем.

/ При отрицательной полярности стержня барьер не только не повышает, но даже снижает разрядное напряжение промежутка. Это объясняется тем, что электроны, выносимые силами электрического поля к противоположному электроду, задерживаются барьером, где происходит образование отрицательных ионов (рис. 4-22,б).

6*

/ Поэтому если без барьера положительный объемный заряд, сконцентрированный у стержня, снижал напряженность поля в промежутке, а отрицательный заряд был рассеян в пространстве, то при наличии





Рис. 4-22. Барьерный эффект в промежутке стержень — плоскость при положительной (а) и отрицательной (б) полярностя: стержня. барьера отрицательный заряд на барьере повышает напряженность поля между барьером и плоскостью, что ведет к понижению разрядного напряжения. / Опыт показывает, что при наличии барьера разрядные напряжения при обоих полярностях стержня близки друг к другу.

4-16. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ГАЗЫ

Для использования в изоляционных конструкциях высокого напряжения синтезированы специальные высокопрочные электроотрицательные газы. / Такие газы имеют молекулы с высоким потенциалом ионизации и большим сродством к электронам, вследствие чего электроны, возникающие в лавинах, легко прилипают к молекулам и лишаются своей активной роли в ионизационных процесах / Известен довольно ши-

рокий ассортимент высокопрочных газов, однако большинство их неприменимо в изоляционных конструкциях вследствие активного воздействия на металлы, токсичности или высокой температуры сжижения. В настоящее время практически используется газ, известный под названием элегаз SF₆. Его электрическая прочность относительно воздуха находится в пределах 2,3—2,5, температура сжижения —62° С, т. е. достаточно низкая для большинства районов земного шара! Элегаз является одним из наиболее инертных и химически стойких соединений! Электрическая прочность элегаза, как и других газов, может быть повышена путем повышения давления. Несмотря на ее относительно высокую стоимость, элегазовая изоляция все более широко используется в выключателях, кабелях высокого напряжения, конденсаторах.

4-17. ГАЗЫ ПОД БОЛЬШИМ ДАВЛЕНИЕМ

Увеличение разрядного напряжения газовых промежутков в изоляционных конструкциях часто достигается повышением давления газа. Согласно закону Пашена разрядное напряжение искрового промежутка является функцией давления газа./При давлениях порядка нескольких атмосфер разрядные напряжения можно считать прямо пропорциональными давлению. При бо́льших давлениях наблюдается снижение роста разрядного напряжения. Особенно резко это снижение проявляется в промежутках стержень — плоскость при положительной полярности стержня. Поэтому в изоляционных конструкциях обычно не применяются газы под давлением бо́льшим нескольких десятков атмосфер. (К тому же следует иметь в виду усложнение конструкций механиче-/ ских оболочек с ростом давления газа.)

В электроотрицательных газах при положительной полярности стержня наблюдается аномалия, заключающаяся в резком падении разрядного напряжения при давлении порядка десятка атмосфер. Эта аномалия иллюстрируется кривыми на рис. 4-23, а. Подобная же аномалия, но менее явная возникает и в воздухе, содержащем электроотрицательный газ кислород (рис. 4-23,б).

Физическая природа указанной аномалии до настоящего времени окончательно не установлена. Одно из вероятных объяснений такое. С ростом давления вероятность возникновения лавин в боковые стороны от оси стержня уменьшается и разряд концентрируется вдоль этой оси.



Рис. 4-23. Зависимость разрядных и коронных напряжений от давления в промежутке стержень — плоскость (s=0,3 с.м).

а — в элегазе; б — в воздухе. - — разрядное напряжение; — — — коронное напряжение.

Это ведет к повышению плотности энергии в канале стримеров и снижению разрядного напряжения. В некотором, относительно узком интервале давлений указанный фактор превалирует над факторами, повышающими Up, и в этом интервале наблюдается снижение Up с ростом давления. При дальнейшем росте давления вновь наблюдается возрастание U_{p} , но уже значительно более медленное.

Аномальное падение Up проявляется слабее в газах, где отсутствуют электроотрицательные составляющие, например в азоте.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Определите коэффициент ударной ионизации α для водорода при давлении 3 ат и t=100° С и напряженности поля E=30 кв/см. Ответ: ~107 иониз/см.

2. Постройте кривую ln N, где N — число электронов в лавине, в зависимости от расстояния s для водорода при условиях 1-й задачи.

3. Постройте зависимость $U_p = f(s)$ для воздуха при p = 700 мм рт. ст. и $t = 40^{\circ}$ С.

4. Известно пробивное напряжение искрового промежутка (с равномерным полем) s=1 см при нормальных атмосферных условиях. Величина промежутка s увеличин-вается вдвое, а температура возрастает до 100°С. Как следует изменить давление, чтобы Up промежутка осталось без изменения?

5. Опишите стадии газового разряда в равномерном поле.

Опншите развитие коронного разряда в промежутке стержень — плоскость при положительной и отрицательной полярности стержия.

7. Опишите стадии газового разряда в длинных промежутках.

8. Как определяется критическая длина свободно горящей дуги в цепях постоянного и переменного тока?

9. Объясните действие барьера в промежутке стержень — плоскость при положительной и отрицательной полярности стержня. На каком расстоянии от положительного стержня необходимо устанавливать барьер для наибольшего повышения разрядного напряжения?

10. Изложите, какими путями можно выполнить изоляционные конструкции с газовой изоляцией с высокой электрической прочностью газовых промежутков.

Глава пятая

РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

5-1. ФОРМЫ ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В электрических системах воздействующие напряжения, которые могут приводить к пробою воздушных промежутков, имеют разнообразную форму и длительность (см. введение). Характер разряда в существенной степени зависит от вида воздействующих напряжений, и для изучения методов построения изоляции современных электропередач необходимо изучить эти особенности.

В последующих параграфах рассматриваются характеристики искрового разряда в промежутках при волнах атмосферного происхождения, напряжении промышленной частоты, волнах коммутационного происхождения и выпрямленном (постоянном) напряжении.

5-2. СТАТИСТИЧЕСКИЙ РАЗБРОС РАЗРЯДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Все стадии развития разряда в воздушных промежутках подчинены статистическим закономерностям. Образование начальной лавины связано с появлением начального электрона (см. § 4-2) вследствие таких случайных факторов, как фотоионизация каким-либо внешним ионизатором. Развитие лавин, стримеров, лидерного разряда связано с огромным числом микропроцессов, каждый из которых в значительной степени имеет случайный характер в силу случайного взаимного расположения молекул, наличия пылинок в газе, действия внешних ионизаторов и пр. Предположим, что к промежутку приложено напряжение определенной формы. Если бы разряд протекал в детерминистической форме (т. е. при отсутствии элемента случайности), то разряд в промежутке происходил бы всегда при неизменном напряжении. Вследствие статистического характера развития разряда разрядное напряжение будет иметь некоторый разброс. Согласно теории вероятности разброс опытных точек, на который влияет большое число независимых случайных факторов (а именно это характерно для развития разряда в воздушных промежутках), должен следовать так называемому нормальному закону распределения Для разрядного напряжения интегральная функция распределения, следующая этому закону, имеет вид:

$$P_{\rm F}\{U\} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U} e^{-\frac{(U-\overline{U})^2}{2\sigma^2}} dU = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{U-U}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \qquad (5-1)$$

где $P_p\{U\}$ — вероятность того, что в данном опыте разрядное напряжение окажется меньшим или равным U; \overline{U} — среднее значение разрядных напряжений в большом числе опытов; вероятность $P_p\{\overline{U}\}=0,5$ или 50%; σ — среднеквадратичное отклонение (или стандарт распределения), характеризующее степень разброса опытных точек (в данном случае разрядных напряжений) относительно среднего значения \overline{U} ; σ выражается в единицах U или в долях или процентах от \overline{U} .

Типичная кривая $P_p\{U\}$ показана на рис. 5-1. Согласно выражению (5-1) $P_p\{U\}$ асимптотически стремится к нулю и единице при беспредельном снижении или возрастании напряжения. Однако в действительности разряд при малом напряжении невозможен, а при высоком на-

пряжении происходит в 100% случаев. Другими словами, выражение (5-1) справедливо лишь в ограниченных пределах отклонения напряжения от \overline{U} . Практически возможное отклонение разрядного напряжения от \overline{U} не превышает ±3 [вероятность столь значительного отклонения, рассчитанная по формуле (5-1), оценивается в 0,0013]. Соответствующие трехсигмовые границы могут рассматриваться в качестве верхней и нижней огибающей области опытных точек. Часто также верхняя и нижняя границы Up принимаются равными $\overline{U}_{p} \pm 2\sigma$. Двухсигмовой границе соответствует напряжение с вероятностью 0,023. Как следует из изложенного, для того чтобы охарактеризовать раз-



Рис. 5-1. Интегральная функция нормального распределения (о дано в долях \overline{U}).

рядное напряжение при воздействии напряжения заданной формы, достаточно знать среднее разрядное напряжение \overline{U} и значение σ .

5-3. РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Возникающие при грозовых разрядах импульсные напряжения имеют длительность в несколько десятков микросекунд. Такой импульс называют также волной (причина такого названия будет раскрыта во



Рис. 5-2. Стилизованная форма грозовой импульсной волны и определение ее параметров.

Π курса). Типовая части форма грозового импульса показана на рис. 5-2. Участок нарастания напряжефронтом ния называется волны, участок спада напряжения — хвостом волны. Аналитически форма волны аппроксимируется хорошо разностью двух экспонент:

$$u = U_o (e^{-\alpha t} - e^{-\rho t}),$$

где коэффициент а, характеризующий спад напряжения на хвосте волны, много мень-

ше в, характеризующего подъем напряжения на фронте волны.

Для унификации разрядных характеристик изоляции в СССР стандартизована испытательная волна с фронтом длиной 1,5 *мксек* и хвостом длиной 40 *мксек*, кратко обозначаемая как волна 1.5/40. Длины фронта и хвоста определяются из построения, показанного на рис. 5-2. На фронте волны отмечаются точки *a* и *b* на уровне 0,3 *U* и 0,9 *U*, где U — амплитуда волны; через эти две точки проводится прямая до пересечения в точке c с осью абсцисс и в точке d с прямой, параллельной оси абсцисс, на уровне U. Отрезок cd' есть длина фронта волны t_{Φ} . Далее находится точка пересечения e хвоста волны с прямой, параллельной оси абсцисс, на уровне 0,5 U. Отрезок ce' есть длина волны $t_{\rm B}$.

Когда на воздушный промежуток воздействует импульс напряжения, то при достаточной его амплитуде возникает искровой разряд. Но до наступления завершающей стадии — искры разряд должен пройти ряд промежуточных стадий, на что требуется определенное время. Пусть



Рис. 5-3. Составляющие времени разряда на грозовой импульсной волне.

на промежуток воздействует волна напряжения, показанная на рис. 5-3. Обозначим через $U_{\rm p}\infty$ разрядное напряжение промежутка при длительном воздействии напряжения, часто называемое статическим разрядным напряжением. С момента t_0 в промежутке возникают процессы, которые могут привести к искровому разряду в нем.

Для возникновения самостоятельного разряда необходимо появле-

ние в промежутке начального электрона, который создал бы начальную лавину. Время ожидания начального электрона (с момента t_0) называется холостым временем запаздывания и обозначается t_{xon} . Это время зависит от наличия внешнего ионизатора. При освещении промежутка дневным светом или светом искры t_{xon} составляет доли микросекунды. Еще более эффективно облучение промежутка ультрафиолетовым светом кварцевых ламп или γ -излучением радиоактивных препаратов. Наоборот, если промежуток поместить в закрытую обойму и изолировать от излучателей, t_{xon} составляет несколько микросекунд.

Время, протекшее с момента появления в промежутке начального электрона до начала искрового разряда, называется рабочим временем или временем формирования разряда и обозначается $t_{\text{раб}}$. За это время происходит развитие лавин, стримеров и лидерного разряда (в длинных промежутках).

Сумма холостого и рабочего времени называется временем запаздывания разряда t_{3an} (запаздывание по отношению к времени t_0)

$$t_{3an} = t_{xon} + t_{ya6}. \tag{5-2}$$

Общее время, протекшее от начала приложения волны до искрового разряда в промежутке, называется временем разряда

$$t_{1} = t_0 + t_{\text{xon}} + t_{1,a6}. \tag{5-3}$$

Структура времени запаздывания различна для малых промежутков с равномерным полем и длинных промежутков с резко неравномерным полем. В первых промежутках основную долю t_{aan} составляет $t_{xo,\tau}$; рабочее время относительно мало как вследствие малости промежутков, так и вследствие того, что лавины и стримеры возникают одновременно во многих точках промежутка. Соответственно время запаздывания мало зависит от длины таких промежутков и от приложенного напряжения.

В длинных промежутках, наоборот, t_{xon} составляет пренебрежимо малую долю по сравнению с t_{pa6} . Малость t_{xon} объясняется высокими напряженностями поля у одного из электродов, что ведет к повышению вероятности появления начального электрона. Высокие значения t_{pa6} объясняются большой дли-

ной промежутка и последовательным развитием стадий искрового разряда. Для разряда в длинных промежутках можно ввести в рассмотрение среднюю скорость продвижения лидера υ,. Эта скорость порядка десятков сантиметров в микросекунду; она больше у положительного лидера, чем у отрицательного. С ростом приложенного напряжения скорость v_{π} повышается. Тогда рабочее время составит:

$$t_{\mu a 6} = \frac{s}{v_{\pi}}, \qquad (5-4)$$

где s — длина промежутка.

С ростом *s* хотя и растет v_{π} , но непропорционально, и $t_{\text{раб}}$ возрастает. С ростом $U t_{\text{раб}}$ вследствие роста v_{π} снижается.

Зависимость амплитуды волны на промежутке от времени разряда называется вольт-секундной (u-t) характеристикой промежутка. Предположим, что амплитуда волны, приложенной к нзоляции, постоянно повышается. При некоторой амплитуде волны $U_{p.мин}$ возникает искровой разряд в промежутке, фиксируемый на осциллограме в виде среза a)





1 — приложенные к промежутку волны: 2 — моменты пробоя промежутка; 3 — вольт-секундная характеристика промежутка.

волны (рис. 5-4,*a*). Вследствие явления запаздывания искра сформируется не на амплитуде волны, а при некотором времени t_p . По мере роста амплитуды приложенной волны время t_p снижается. При достаточно высокой амплитуде разряд будет происходить уже не на хвосте, а на фронте волны. Нанесем теперь точки с координатами: достигнутая амплитуда U_p — время разряда t_p , как это показано на рис. 5-4,*a*. Кривая, соединяющая эти точки, и есть вольт-секундная характеристика. Разрядные напряжения промежутка u_p иногда выражают через коэффициенты импульса $k_x = \frac{u_p}{U_{p\infty}}$. Ясно, что $k_x = j(t)$ подобна вольт-секундной характеристике промежутка.

89

На рис. 5-5 приведены вольт-секундные характеристики стержневых промежутков. Как видно из рис. 5-5, по мере возрастания длины промежутка возрастает крутизна ее u-t характеристики. В данном случае играет роль не только возрастание неравномерности поля, но и необходимость очень высоких скоростей лидера для пересечения промежутка большой длины за малый промежуток времени. Для промежутков с равномерным либо слабонеравномерным полем u-t характеристика при



Рис. 5-5. Вольт-секундные характеристики стержневых промежутков при волне 1,5/40 положительной полярности и различных расстояниях между электродами (средние значения). Пунктиром показаны соответствующие разрядные напряжения при промышленной частоте.

наличии ионизатора, практически горизонтальна вплоть до времен порядка долей микросекунды.

При построении и-t характеристики на рис. 5-4,а предполагалось, что каждому значению ир соответствует определенное значение t_p. В действительности в опытах наблюдается разброс величин $t_{\rm p}$ около среднего значения. Причины этого разброса были установлены в § 5-2. Поэтому при экспериментальном определении *и—t* характеристики получают область точек, которую можно окаймить верхней и нижней огибающей, как это показано на рис. 5-4, б. Для каждого значения t_p разрядные напряжения подчиняются нормальному закону распределения (ō-1). На рис. 5-4,6 средняя линия соответствует средним значениям для каждого t_p, а нижняя и верхняя огибающие — откло-

нениям от среднего на $\pm 3\sigma$ (или на $\pm 2\sigma$). Вольт-секундные характеристики стержневых промежутков на рис. 5-5 построены для средних значений разрядного напряжения. Для длинных воздушных промежутков с резко неравномерным полем значение σ оценивается в 2,5---3%. В коротких промежутках с равномерным полем значение σ резко снижается, особенно при облучении промежутка.

Вольт-секундную характеристику (среднюю, верхнюю или нижнюю огибающие) можно охарактеризовать двумя значениями — минимальным импульсным разрядным напряжением $U_{p,мин}$, соответствующим максимальному времени разряда $t_{p,макc}$, и разрядным напряжением U_{p2-3} при времени разряда $t_p=2\div3$ мксек. Раополагая этими двумя значениями, можно приближенно построить и всю u-t характеристику. Для этого используется эмпирическая формула

$$u_{\mathrm{p}}(t) = U_{\mathrm{p,Muh}} \sqrt{1 + \frac{T}{t}}, \qquad (5-5)$$

где

$$T = \left[\left(\frac{U_{\text{pt}_1}}{U_{\text{pmaxy}}} \right)^2 - 1 \right] t_1;$$

Upr1 — разрядное напряжение при времени разряда t₁, равном 2 — 3 мксек.

Вольт-секундные характеристики промежутков используются для построения рациональной защиты изоляции (рис. 5-6). Допустим, что необходимо защитить изоляцию с *u-t* характеристикой 1. Для этого параллельно изоляции включается разрядник, например промежуток стержень — стержень с *и-t* характеристикой 2. Очевидно, что надежная защита будет обеспечена, если кривая 2 будет лежать ниже кривой 1 во всем диапазоне времен разряда. Интервал между кривыми должен перекрывать разброс разрядных напряжений.

Если бы *и-t* характеристика разрядника изображалась кривой 3, пересекающей кривую 1 при малых временах разряда, то разрядник не защищал бы изоляцию при высоких амплитудах или крутых фронтах набегающих волн, соответствующих малым tp. Отсюда видно, что для разрядника желательно иметь наиболее пологую *и-t* характеристику.

Для сравнения импульсной прочности двух промежутков часто используют не всю *и*-*t* характеристику, а только два ее характерных разрядное напряжение значения: при $t_p = 2 \div 3$ мксек и минимальноимпульсное разрядное напряжение. Разрядные напряжения воздуш-

щая и—1 характернстики разрядника, защи-щающего изоляцию; 3 — то же для разряд-ника, не способного защитить изоляцию. ных промежутков можно характеризовать не только и—t характеристиками, но и так называемыми кривыми эффекта или кривыми вероятности разряда $P_p{U}$. Предположим, что при многократном приложении к промежутку полной волны с амплитудой U ведется счет числа искровых разрядов в промежутке. Если волна подавалась N раз, а число разрядов при этом равно n, то вероятность разряда

$$P_{\nu}\left\{U\right\} = \frac{n}{N}.$$
(5-6)

При малом напряжении разряд не происходит и $P_p=0$, при увеличении U P_p возрастает до единицы. Значению P_p=0,5 соответствует среднее разрядное напряжение \overline{U} , которое обозначается так же, как 50%-ное разрядное напряжение $U_{5\%}$. Зависимость $P_{p}{U}$ и называется кривой эффекта. При большом числе опытов (большом N) кривая эффекта $P_p\{U\}$, полученная экспериментально, практически совпадает с теоретической кривой нормального распределения (5-1), показанной на рис. 5-1.

Отметим связь кривой эффекта с *u*—t характеристикой. Кривая эффекта дает разброс разрядных напряжений при воздействии полной волны, в то время как при-построении *и*—*t* характеристики мы получаем разброс разрядных напряжений при воздействии также срезанных волн различной длины tp. Следовательно, и-t характеристика дает существенно больше информации о разрядных напряжениях промежутка. Кривая эффекта по существу определяет только разброс минимальноимпульсных разрядных напряжений промежутка. Поэтому U или U или U, 5 м на напряжений промежутка. определенное по кривой эффекта, практически совпадает со средним минимально-импульсным разрядным напряжением $\overline{U}_{\text{р.мин}}$. В дальнейшем



Рис. 5-6. Координация вольт-секундных характеристик при защите изоляции

разрядником.

1 — нижняя сгибающая *и—t* характеристики защищаемой изоляции; 2 — верхняя огибаю-



через \overline{U} или $U_{50\%}$ всегда будет обозначаться среднее разрядное напряжение при полной волне.

Кривые эффекта снимаются значительно проще, чем u-t характеристики, и в этом их большое достоинство. Если известна форма воздействующей волны, то для снятия кривой эффекта не нужны измерения катодным осциллографом. По кривым эффекта (снятым при полной волне) можно оценить защищенность изоляции разрядником. Для этого необходимо, чтобы нижний предел U_p изоляции лежал выше верхнего



Рис. 5-7. Кривые эффекта для изоляции (1) и разрядника (2).

предела $U_{\rm p}$ разрядника, как это показано на рис. 5-7. Из изложенного, однако, следует, что такая оценка достаточна, если только известно, что крутизна *u*—*t* характеристики изоляции больше, чем разрядника. Такое заключение часто может быть дано исходя из формы поля промежутков.

В заключение приведем данные по импульсным разрядным напряжениям стержневых промежутков, широко используемые для оценки импульсной прочности реальных изоляционных конструкций. Промежу-

ток стержень — стержень характеризует прочность симметричных изоляционных конструкций (между проводами линии, между кольцами арматуры, устанавливаемой на высоковольтных аппаратах, и т. д.); промежуток стержень — плоскость может быть использован при оценке





1 — стержень — плоскость при положительной полярности стержня; ня; 2 — стержень — стержень при положительной полярности незаземленного стержня; 3 — стержень — стержень при отрицательной полярности незаземленного стержня; 4 — стержень плоскость при отрицательной полярности стержня.

прочности несимметричных конструкций (например, между проводом и землей). Зависимости разрядного напряження стержневых промежутков от расстояния между электродами *s* даны на рис. 5-8.

Поясним взаимное расположение кривых. При одной и той же форме промежутка разрядное напряжение ниже в том случае, когда незаземленный электрод имеет положительную полярность. Для промежутка стержень — заземленная плоскость это объясняется благоприятными условиями развития положительного стримера по сравнению с отрицательным. В промежутке стержень — стержень стримеры (положительный и отрицательный) развиваются с обонх электродов, и казалось бы безразлично, какова полярность незаземленного электрода. Но, как было показано в § 1-10, напряженность поля у незаземленного стержня выше, чем у заземленного, и при положительной полярности незаземленного стержня условия для развития положительного стримера наиболее благоприятные. При отрицательной полярности стержня разрядное напряжение для промежутка стержень — плоскость выше, чем для промежутка стержень — стержень. Хотя напряженность поля у незаземленного стержня выше в промежутке стержень -- плоскость, но в промежутке стержень — стержень превалируют благоприятные условия развития разряда с заземленного положительного стержня.

5-4. РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ При напряжении промышленной частоты

Измерение разрядных напряжений промежутков при напряжении промышленной частоты производится при медленном подъеме напряжения. Нормированная скорость подъема составляет 3% от амплитуды ожидаемого разрядного напря-

жения в секунду. Вследствие малой скорости возрастания напряжения при каждом опыте оказывается весьма вероятным наиболее неблагоприятное сочетание случайных факторов, влияющих на развитие разряда. Поэтому испытание воздушных промежутков при плавном подъеме напряжения промышленной частоты оказывается эквивалентным испытанию при длительном воздействии рабочего напряжения. В результате повторения при каждом опыте неблагоприятного сочетания влияющих факторов измеренные разрядные напряжения характеризуются малым разбросом опытных точек, при котором величина о не превышает 1,5-2%.

Зависимость средних разрядных напряжений стержневых промежутков на промышленной частоте от их длины дается на рис. 5-9. Для





промежутков длиной до 1 *м* разрядные напряжения промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость близки друг к другу. В длинных промежутках кривые резко расходятся, что указывает на существенное влияние на разрядные напряжения длинных промежут-

ков симметрии электродов. Промежуток стержень—стержень обладает 100%-ной симметрией, промежуток стержень— плоскость обладает наибольшей возможной несимметрией. Разрядные напряжения воздушных промежутков, встречающихся в электроустановках высокого напряжения, располагаются между кривыми для промежутков стержень—стержень и стержень—плоскость, тяготея в зависимости от симметричности реального промежутка к одной из этих кривых.

5-5. РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ (ВЫПРЯМЛЕННОМ) НАПРЯЖЕНИИ

На постоянном напряжении объемный заряд, источником которого служит коронный разряд около стержня, приводит к полному перераспределению поля в промежутке. Под действием напряжения возникает постоянный ток конвекции, в котором заряды уносятся на противоположный электрод. Можно представить, что между электродами оказывается включенной проводимость, выравнивающая электрическое поле



Рис. 5-10. Средние разрядные напряжения промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость на постоянном напряжении (по И. К. Федченко и

М. Е. Иерусалимову).

1 — стержень — стержень при положительной полярности незаземленного стержия; 2 — стержень — плоскость при положительной полярности стержия; 3 — стержень — стержень при отрицательной полярности незаземленного стержия; 4 — стержень — плоскость при отрицательной полярности стержия.

в промежутке. Это выравнивание ведет к значительному повышению разрядного напряжения в длинных воздушных промежутках.

Кривые разрядных напряжений для промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость на постоянном напряжении приведены на рис. 5-10. При несимметричных электродах резко выражен эффект полярности. Отношение разрядных напряжений промежутка стержень — плоскость при отрицательной и положительной полярностях стержия составляет от 2,3 до 2,9.

5-6. РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Коммутационные перенапряжения имеют весьма разнообразную форму и длительность, составляющую от сотен микросекунд до нескольких периодов промышленной частоты. По этой причине в настоя-

щее время отсутствует какая-либо стандартизованная испытательная волна, предназначенная для лабораторного исследования прочности высоковольтной изоляции при внутренних перенапряжениях. В отечественной практике широкое применение получили испытательные волны в виде затухающих колебаний (частотой $10^2 - 10^3 \ eventsubulkering)$, наложенных на низкочастотную составляющую — напряжение промышленной частоты (рис. 5-11,*a*). В ряде лабораторий мира в качестве испытательной коммутационной волны применяют униполярные импульсы с фронтом длиной порядка 0,5 *мсек* и волной длиной 3—4 *мсек* (рис. 5-11,*б*). Такая волна рекомендована комитетом МЭК.

Так как фронты коммутационных волн пологи и времена разряда t_p велики, то в измерении u-t характеристик большей частью нет не-

обходимости, и разрядные напряжения промежутков достаточно полно характеризуются кривыми эффекта, методика снятия которых была рассмотрена в § 5-3. На рис. 5-12 показаны кривые эффекта для промежутка стержень — плоскость длиной от 2 до 7 *м*, полученные при воздействии испытательного импульса положительной полярности с формой, сходной с формой импульса на рис. 5-11,*a* с частотой $f = 55 \div 125 \ eq$. На том же рисунке пунктиром показаны значения разрядного напряжения при промышленной частоте. Как видно из кривых, 50%-ное разрядное





а — колебательный импульс. образованный наложением затухающих колебаний на медленно спадающую составляющую; б — апериодический импульс 0,5/2—3 мсек.





напряжение промежутков при коммутационных импульсах практически совпадает с разрядным напряжением при длительном воздействии промышленной частоты. Соответственно зависимости $\overline{U}_p = f(s)$, снятые на промыш-

ленной частоте, в частности кривые на рис. 5-9, пригодны и для определения $U_{_{5,9}}$, при коммутационных импульсах.

Существенной особенностью разряда в длинных промежутках при коммутационных импульсах является значительный разброс разрядных напряжений около значения U_{50%}, как это видно из кривых на рис. 5-12. Стандарт разброса σ доходит до 6—8% $U_{59\%}$. Физическая природа столь значительного разброса связана с протеканием лидерной стадии разряда в длинных промежутках. Как уже указывалось в § 4-9, продвижению положительного лидера предшествует стример, внедряющий в промежуток положительный объемный заряд. Чем больше этот заряд, тем более выравнивается поле и тем больше разрядное напряжение промежутка и наоборот. Так как образование объемного заряда подчинено статистическим закономерностям, то статистический разброс наблюдается и в отношении разрядных напряжений промежутков.

При медленном подъеме напряжения промышленной частоты разброс разрядных напряжений незначителен вследствие того, что с течением времени из ряда случайных сосредоточений объемных зарядов складывается одно устойчивое распределение, которое и определяет почти стабильную величину разрядного напряжения. При грозовых импульсах объемный заряд в промежутке не успевает образоваться, так что в этом случае разброс разрядных напряжений связан с разбросом времени запаздывания разряда.



Рис. 5-13. Зависимости 50%-ного разрядного напряжения $U_{50\%}$ от времени разряда $t_{\rm p}$ для промежутка стержень — плоскость длиной *s* при воздействии косоугольного импульса положительной полярности (по И. С. Стекольникову, Е. Н. Браго, Э. М. Базеляну). 1-s=1 м; 2-s=2 м; 3-s=3 м; 4-s=4 м; 5-s=5 м; 6-s=59 м.

Физическая картина разряда подсказывает, что длинные промежутки должны иметь наименьшие значения разрядного напряжения при коммутационных импульсах с таким относительно крутым фронтом, при котором объемный заряд на фронте волны еще не успевает образоваться, но время уже настолько разряда велико, что процессы развития лавин, стримеров и лидерного разряда практически не сказываются на величине разрядного Такой эфнапряжения. фект, действительно, был обнаружен. На рис. 5-13 показаны и-t характеристики промежутка стержень — плоскость, снятые

при воздействии косоугольных волн. Как следует из рис. 5-13, в области $t_p = 150 \div 300$ мксек разрядные напряжения промежутка снижаются на 15—20%.

5-7. РАЗРЯД В ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

Физические особенности протекания ионизационных процессов приво-

дят к разбросу разрядных напряжений промежутков при импульсах. в электрических сетях ИМПУЛЬС обычно воздействует одновременно на большое число параллельно включенных промежутков. Например, грозовой импульс воздействует на все промежутки опор сети, число которых достигает сотен и даже тысяч.

Предположим для простоты, что разрядное напряжение каждого промежутка задано одной и той же кривой вероятности $P_p\{U\}$, показанной на рис. 5-14 (кривая 1). Какова будет кривая вероятности возникновения перекрытия в системе из *n* параллельно включенных промежутков? Теория вероятности дает на это следующий ответ. Если при напряжении *U* вероятность разряда в одном промежутке равна $P_p^{'}$ {*U*}, то вероятность разряда хотя бы в одном из *n* параллельных промежут-



Рис. 5-14. Влияние числа параллельно включенных промежутков на ход кривой эффекта.

ков определяется формулой

$$P_{n}^{n}\left\{U\right\} = 1 - [1 - P_{n}^{1}\left\{U\right\}]^{n}.$$
(5-7)

Пусть, например, n = 100. Тогда при $P_p^1 \{U\} = 0.05 P_p^n \{U\} = 1 - (1 - 0.05)^{100} = 1 - 0.95^{100} \approx 1$. Это означает, что хотя разряд в одном промежутке и маловероятен, но в системе из сотен промежутков вероятность разряда практически равна $100^0/_{0}$.

Из формулы (5-7) следует, что увеличение числа параллельно включенных промежутков сдвигает кривую вероятности разряда в область меньших значений U. Если предположить, что кривая распределения вероятности $P_p^1\{U\}$ подчинена закону Гаусса [формула (5-1)] при любых U, то кривые вероятности для n, равного 100, 1000 и 10000, перемещаются в область очень малых напряжений, как это видно из кривых 2—4 (рис. 5-14). Однако опытные данные не дают оснований предполагать справедливость закона Гаусса при U, отклоняющихся от $\overline{U}_{\rm I}$ более чем на $\pm 3 \sigma$. Поэтому более правильно считать, что при U< $<\overline{U}_{\rm P}-3\sigma P_p^1\{U\}=0$, и тогда $P_p^n\{U\}$ также равно нулю. В этом случае при $n \to \infty$ кривая вероятности разряда приобретает вид вертикальной линии, проходящей на оси абсцисс через точку $U_{500/a}-3\sigma$ (абс. ед.).

Значительное снижение разрядных напряжений системы из большого числа параллельно включенных промежутков является важным фактором при выборе изоляции в электропередачах СВН.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Приведите схему и укажите методику снятия вольт-секундной характеристики искрового промежутка. Чем вызван разброс времен разряда t_p при заданной амплитуде волны U?

2. Объясните различие в ходе u - t характеристик: а) шарового промежутка, $s = 1 \ cm$; б) стержневого промежутка, $s = 50 \ cm$.

3. Изоляция трансформатора 110 кв допускает воздействие импульсного напряжения U=425 кв при полной волне и U=485 кв при $t_p=2$ мксек. Подберите стержневой промежуток, еще защищающий трансформатор и укажите, как необходимо ограничить амплитуду воздействующей волны.

4. Покажите и объясните взаимное расположение кривых $U_{50\%} = f(s)$ для промежутков стержень — стержень и стержень — плоскость при положительной и отрица-. тельной полярности импульсной волны 1,5/40 *мксек*.

5. Для изоляционного и защитного промежутков сняты характеристики $P_p\{U\}$ при коммутационных импульсах. Для изоляционного промежутка значение $U_{50\%} = 800$ кв, $\sigma = 8\%$; для защитного промежутка $\overline{U_p} = 500$ кв, $\sigma = 4\%$. Приближенно постройте кри-

G=8%; для защитного промежутка $U_p=500$ кв, G=4%. Приолиженно построите кравые $P_p\{U\}$ для обоих промежутков и оцените, будет ли эффективна защита изоляционного промежутка.

6. Покажите взаимное расположение кривых $U_{51\%} = f(s)$ для промежутков стержень — стержень — плоскость при коммутационных импульсах положительной полярности. Как будет располагаться (относительно этих кривых) кривая $U_{50\%} = f(s)$ для промежутка стержень — сфера (диаметром 3 м)?

Глава шестая

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО Диэлектрика

6-1. ЗНАЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ТВН

Любая изоляционная конструкция имеет участки, в которых твердый диэлектрик граничит с газовым, в частности с атмосферой. На этой границе разряд может происходить в самом твердом диэлектрике или 7—641 в газовом слое, прилегающем к твердому диэлектрику. Первый вид разряда описан в гл. 7. В настоящей главе рассматривается второй вид разряда.

Поверхностный газовый разряд сохраняет все свойства газового разряда, изложенные в гл. 4 и 5. Разряд по поверхности твердого диэлектрика имеет в то же время ряд особенностей, связанных с влиянием твердого диэлектрика на структуру поля и протекание разряда. Как правило, введение в воздушный промежуток поверхности твердого диэлектрика приводит к снижению разрядного напряжения.

6-2. РАЗРЯД ПО СУХОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРА. Сухоразрядное напряжение

В большинстве точек земного шара сухая погода является преобладающей по продолжительности. Поэтому изучение разряда по сухой поверхности изолятора дает представление о его поведении в течение большей части периода эксплуатации. С этой целью все нормы и стандарты на внешнюю высоковольтную изоляцию предусматривают измерение разрядного (либо выдерживаемого) напряжения по поверхности сухих изоляторов при воздействии напряжения промышленной частоты. Измеренное напряжение для краткости называют сухоразрядными $U_{\rm cp}$ либо сухим выдерживаемым $U_{\rm c.в.}$; обычно считают, что $U_{\rm c.в.}=0.9 U_{\rm cp}$.

У большинства изоляционных конструкций поверхностный газовый разряд протекает в резко неравномерном поле. Типовая изоляционная конструкция с таким полем приведена на рис. 6-1. В § 2-5 было показано, что вдоль поверхности изолятора типа приведенного на рис. 6-1, электрическое поле распределяется тем более неравномерно чем больше удельная поверхностная емкость изолятора C_0 . С увеличением неравномерности поля растет продольная напряженность поля E_x у электрода и облегчается возникновение разряда по поверхности изолятора.

Поверхностная емкость C_0 влияет также на само протекание газового разряда. Это влияние можно проследить по рис. 6-1, на котором вдоль поверхности изолятора показан развивающийся стример. Ток стримера, протекающий под действием продольной составляющей напряженности поля, замыкается током смещения в емкости $C_0 \Delta s$ (Δs – площадка под головкой стримера). Чем больше эта емкость, тем больших значений может достигать ток стримера, а следовательно, тем более возрастает проводимость стримера и возрастает потенциал головки стримера, что в конечном счете способствует развитию разряда. Таким образом, возрастание C_0 ведет к снижению разрядного напряжения по поверхности.

Влияние C_0 на протекание разряда, очевидно, тем значительнее, чем выше частота тока, а следовательно, больше емкостная проводимость $\omega C_0 \Delta s$. С ростом частоты приложенного напряжения стример, следуя пути с максимальной проводимостью, стремится прижаться к поверхности изолятора. Стримеры, развивающиеся вдоль поверхности изолятора, называют скользящими разрядами.

Сухоразрядное напряжение изолятора удается существенно повысить, сделав его поверхность ребристой. Особенно эффективны ребра вблизи электродов, где напряженность поля максимальная (рис. 6-2). Ребра снижают в месте их расположения поверхностную емкость C_0 и создают барьер для развивающегося стримера. При наличии ребер разряд может частично развиваться по поверхности изолятора и частично по воздуху, а при большом числе сильно выступающих ребер — почти полностью по воздуху. Такой характер разряда имеет то достоинство, что силовая дуга, следующая за импульсным перекрытием, не соприкасается и не обжигает поверхность изолятора.

Поверхностное разрядное напряжение повышают также путем выравнивания электрического поля вдоль поверхности изолятора, т. е. снижения продольных градиентов. Методы выравнивания электрического поля (экраны, полупроводящие покрытия) рассматривались в § 2-5, 2-6. Выравнивание поля может быть достигнуто также устройством коронирующего электрода, присоединяемого к электроду под напряжением. Коронирование ведет к образованию вблизи электрода плазмы низкой проводимости, выполняющей роль полупроводящего покрытия вдоль поверхности изолятора. Такие устройства, однако, эффективны только при напряжении промышленной частоты и могут оказаться вредными при импульсных воздействиях.



Рис. 6-1. Развитие стримера вдоль поверхности изолятора. 1, 2 – электроды: 3 – стрямер.





При решении практических задач часто возникает необходимость в быстрой, хотя бы и приближенной, оценке сухоразрядного напряжения изоляционной конструкции. Для этой оценки используется величина так называемого сухоразрядного расстояния L_{cp} — кратчайшего расстояния между электродами изоляционной конструкции, примерно равного строительной высоте изоляции lcr. Определение Ucp производят по кривым разрядного напряжения воздушных промежутков стерженьстержень или стержень — плоскость при промышленной частоте (рис. 5-10), принимая let в качестве расстояния с между электродами. Для изоляции, расположенной на металлическом баке (вводы), более подходит эквивалентный промежуток стержень — плоскость; для изоляции с более симметричными электродами, например гирлянды линейных изоляторов, U_{ср} следует находить как среднее (арифметическое) между $U_{\rm p}$ обоих типов промежутков.

6-3. РАЗРЯД ПО УВЛАЖНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРА. Мокроразрядное напряжение

Увлажнение поверхности изолятора может происходить в результате выпадения дождя, росы или при возникновении тумана. При возникновении сплошной пленки влаги между электродами (рис. 6-3,*a*) через пленку протекает ток, обусловленный ее проводимостью. В зависимости от толщины водяной пленки и удельной электропроводности воды величина тока утечки колеблется обычно от 5 до 100 *ма*. В местах с наибольшей плотностью тока, наблюдаемой у электрода с минимальным раднусом (например, у пестика подвесного изолятора или штыря штыревого изолятора), происходит концентрированное выделение тепловой энергин. Тепловая мощность, приходящаяся в этих местах на 1 *см*² поверхности изолятора, может в десятки и сотни раз превысить среднее для изолятора значение. Под действием концентри-7* рованно выделяющегося тепла происходит подсушивание поверхности изолятора, что приводит к резкому возрастанию падения напряження на подсушенном участке и его перекрытию (рис. 6-3,6). При этом опорная точка дуги, имеющая весьма высокую температуру, располагается на краю водяной пленки и перемещается по мере ее высушивания.

Для образовавшейся цепи справедливо равенство

$$E_{\rm fl}(i_{\rm YT}) \, l + i_{\rm YT} R = U_0, \tag{6-1}$$

где $E_{a}(i_{yt})$ — градиент напряжения на дуге, являющийся функцией текущего через нее тока i_{yt} ;

l - длина дуги, примерно равная ширине подсушенной зоны; $<math>R = f(L_{yT} - l) - сопротивление неперекрытой водяной пленки;$

*L*_{ут} — длина пути утечки.



Рис. 6-3. Образование частичной дужки на увлажненной поверхности изолятора. а — по увлажненной поверхности изолятора протекает ток утечки: 6 — высушенная зона перекрыта частичной дугой; 1, 2 — электролы; 3 — водяная пленка; 4 — частичная дуга.

Если производная $di_{yT}/dl>0$, т. е. с увеличением длины l подсушенного участка ток в луге i_{yT} возрастет, опорная точка дуги будет двигаться к противоположному электроду 2 вплоть до полного завершения перекрытия изоляционного промежутка. Если же $di_{yT}/dl<0$, то дуга оборвется, после чего подсушенный участок вновь увлажнится, вновь произойдет подсушка, образование дужки и т. д. Вдоль поверхности изолятора наблюдается перемежающаяся дужка (или несколько дужек): явление сопровождается характерным потрескиванием.

Рассмотренный механизм перекрытия носит тепловой характер и, следовательно, развивается во времени относительно медленно. В частиости, этот механизм наблюдается при длительном приложении к изоляции рабочего напряжения, а также при ее испытании плавным подъемом напряжения промышленной частоты.

Разрядное напряжение по поверхности изолятора при дожде называют мокроразрядным напряжением $U_{\rm Mp}$. Согласно существующим ГОСТ испытания по определению $U_{\rm Mp}$ производятся при силе дождя 3 *мм/мин* и при удельном сопротивлении воды 10⁴ ом см, измеренном при $t=20^{\circ}$ С. Дождь должен падать на изолятор под углом 45° к горизонтали с тем, чтобы воспроизвести влияние порывов ветра, вследствие которых изолятор смачивается не только сверху, но и сбоку.

Мокроразрядное напряжение изолятора тем ниже, чем меньше сопротивление водяной пленки по пути тока утечки. До возникновения частичной дужки это сопротивление может быть выражено формулой

$$R_{\mathbf{y}\mathbf{r}} = \rho_{\mathbf{B}} \int_{0}^{L_{\mathbf{y}\mathbf{r}}} \frac{dl}{\pi D(l)\,\delta(l)} = \rho_{\mathbf{B}} F, \qquad (6-2)$$

где рв — удельное поверхностное сопротивление водяной пленки;

L_{ут} — длина пути утечки;

dl — элементарный отрезок по пути тока утечки;

D(l) — диаметр изолятора, соответствующий расстоянию l;

δ(l) — толщина водяной пленки;

F — коэффициент формы, характеризующий изолятор.

Коэффициент формы F, а вместе с ним н $U_{\rm мр}$ снижаются при возрастании D. Следовательно, чем больше диаметр изолятора, тем ниже разрядное напряжение по увлажненной поверхности. Разрядное напряжение повышается при возрастании длины (или пути) утечки $L_{\rm yr}$. Ребра позволяют значительно увеличивать $L_{\rm yr}$ изоляторов без увеличения их строительной длины. Увеличение числа ребер позволяет приблизить мокроразрядное напряжение изолятора к разрядному напряжению воздушного промежутка с длиной, равной строительной высоте изолятора.



Рис. 6-4. Влияние интенсивности дождя (а) и проводимости воды (б) на мокроразрядное напряжение линейных изоляторов. За единицу принято мокроразрядное напряжение при стандартной интенсивности дождя 5 мм/мии и стандартной электропроводности воды 100 мксим/см.

Обычно изоляторы выполняют такой формы, чтобы ребра ограждали часть поверхности изолятора от дождя. Наличие сухих участков повышает разрядное напряжение по поверхности изолятора. Низкая проводимость сухих участков ведет к резкому снижению *i*ут, что препятствует подсушиванию и образованию дужек на увлажненной поверхности. Это служит дополнительным фактором, повышающим U_{мр}.

Как следует из формулы (6-2), на $U_{\rm Mp}$ должны влиять удельное сопротивление воды и интенсивность дождя, от которой зависит толщина водяной пленки. Обычно естественный дождь имеет меньшую иптенсивность и электропроводность, чем применяемый при мокроразрядных испытаниях. На рис. 6-4 представлены зависимости $U_{\rm Mp}$ от интенсивности дождя *h* и проводимости воды γ , измеренные на линейных изоляторах. Кривые показывают, что при малых *h* и γ наблюдается существенное повышение мокроразрядных напряжений.

Мокроразрядное напряжение изоляционных конструкций примерно пропорционально их строительной высоте $l_{\rm cr}$. Следовательно, мокроразрядный градиент $E_{\rm NP} = U_{\rm MP}/l_{\rm cr}$ не зависит от высоты и является технической характеристикой изоляционной конструкции. Неизменность мокроразрядного градиента объясняется значительным током утечки по увлажненной поверхности изоляции, обеспечивающим практически равномерное распределение приложенного напряжения по ее высоте. Поскольку с увеличением длины изоляции средний сухоразрядный градиент убывает, а мокроразрядный граднент не изменяется, при больших длинах изоляции ее мокроразрядное напряжение может оказаться выше сухоразрядного.

В ориентировочных расчетах, можно принимать $E_{\rm Mp}$ в пределах 2,1—2,4 кв/см в зависимости от развитости ребер.

6-4. РАЗРЯД ПО ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРА ПРИ ВОЗДЕИСТВИИ Коммутационных импульсов

При воздействии коммутационных импульсов на изолятор с сухой поверхностью формирование перекрытия происходит в соответствии с механизмом, описанным в § 6-1. Поскольку длительность такого нмпульса во много раз превышает время, необходимое для формирования искрового разряда, разрядное напряжение сухого изолятора при воздействии коммутационной волны практически совпадает с амплитудой его сухоразрядного напряжения (см. § 5-5).

При воздействии на увлажненный изолятор коммутационных волн $(t_p = 0.5 \div 5 \ \text{мсек})$ перекрытие осуществляется через частичную дугу,



Рис. 6-5. Развитие скользящего разряда по увлажненной поверхности при коммутационном импульсе (обозначения см. на рис. 6-3).

опорная точка которой перемещается к противоположному электроду. Однако с укорочением предразрядного времени t_p тепловая энергия, выделяющаяся в водяной пленке на увлажненном изоляторе, быстро убывает. При $t_p < 0,1$ сек этой энергии оказывается недостаточно для высушивания не только широких областей на поверхности изолятора, но даже минимальной полоски вдоль пути формирующегося

перекрытия. Поэтому, в отличие от случая длительного приложения напряжения, при воздействии коммутационного импульса перемещение опорной точки дугу происходит по ненарушенному водяному слою, как это показано на рис. 6-5. При этом остаются справедливыми уравнение (6-1) и условие распространения скользящего разряда по увлажненной поверхности diyt/dl>0. Скорость движения опорной составляет 20—25 м/сек. При воздейточки ПО поверхности импульсов разряд по изоляторам можег ствии коммутационных завершиться только на хвосте волны. При изоляционных pacстояниях в несколько метров скользящий разряд не успевает пересечь весь промежуток и разрядное напряжение при коммутационных ямпульсах приближается к Ucp; аналогичен процесс сближения Uмp и Ucp.

Разрядное напряжение при коммутационных импульсах может быть представлено в виде

$$U_{\rm MJ} = k_{\rm T} U_{\rm MJ},$$

где k, — коэффициент импульса, равный или больший единицы.

Величина k_{τ} тем ближе к 1, чем больше продолжительность воздей. ствия коммутационного перенапряжения и чем ближе $U_{\rm MI}$ к $U_{\rm cl}$; при $U_{\rm Mp} \approx U_{\rm cl}$ разряд происходит по воздуху и $k_{\tau} = 1$. Для обычной длительности импульсов коммутационных перенапряжений $\tau = 3 + 5$ мсек коэффициент k_{τ} выражается следующей эмпирической формулой:

$$k_{\tau} = 1 + 0.5 \left(\frac{U_{\rm cp}}{U_{\rm Mp}} - 1 \right). \tag{6-3}$$

Эта формула справедлива при $U_{c_1} \ge U_{M_1}$.

6-5. РАЗРЯД ПО ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРА ПРИ ВОЗДЕИСТВИИ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИИ

С грозовым импульсом связаны высокие скорости изменения напряжения и, следовательно, большие токи смещения, замыкающиеся через поверхностную емкость изолятора. Поэтому поверхностный разряд при грозовом импульсе прижимается к поверхности изолятора тем теснее, чем круче нарастание напряжения, т. е. чем меньше время разряда. При t_p до 2—3 *мксек* путь разряда следует всем изгибам (включая ребра) поверхности изолятора.

Кратковременность грозовых импульсов исключает возможность завершения процесса распространения по увлажненному слою скользящего разряда, наблюдаемого при коммутационных импульсах, и тем более исключены тепловые процессы, возникающие при длительном повышении напряжения. Поэтому дождь и вообще увлажнение слабо влияют на поверхностное разрядное напряжение при грозовых импульсах. По имеющимся измерениям, под искусственным дождем импульснос разрядное напряжение изоляторов снижается не более чем на 5—10%. Незначительное изменение импульсной прочности изоляции при воздействии дождя может быть объяснено некоторым изменением распределения напряжения по изоляции при ее увлажнении. Поскольку при высокой частоте, характерной для грозового импульса, емкостная проводимость изолятора превышает активную проводимость водяной пленки, влияние последней на распределение напряжения по изолятору оказывается небольшим.

Приближенная оценка импульсной прочности изоляционных конструкций может быть выполнена по кривым импульсной прочности воздушных промежутков стержень—стержень и стержень—плоскость (рнс. 5-9), при этом строительная высота изоляции $l_{\rm cr}$ принимается в качестве длины промежутка *s*

Импульсное поверхностное разрядное напряжение может существенно снизиться при последовательном воздействии двух импульсов обратной полярности. Механизм этого явления таков. Предположим, что напряжение первого положительного импульса ниже напряжения разрядного напряжения по поверхности, но достаточно для образования скользящего разряда, который оставляет на поверхности изолятора положительные ионы. При воздействии второго отрицательного импульса эти прилипшие ионы усиливают электрическое поле и ведут к снижению разрядного напряжения. Это явление пока изучено только с качественной стороны.

6-6. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯ НА РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ По поверхности изоляторов

Сухоразрядные напряжения изоляторов зависят от атмосферного давления, температуры и влажности. Влияние этих факторов аналогично описанному в § 4-14 для воздушных промежутков и учитывается по формуле (4-15) в зависимости от коэффициента δ/K . Обобщение многочисленных регистраций метеорологических условий в разных точках Советского Союза позволило установить зависимость от высоты поправочного коэффициента δ/K от высоты h. Такие зависимости были получены для различных вероятностей неблагоприятного сочетания метеорологических условий.

Для практических целей обычно пользуются зависимостью δ/K от высоты, соответствующей вероятности около 5%. Такая зависимость показана на рис. 6-6. Она используется при выборе изоляции. Особенностью разряда по поверхности изоляторов является резкое снижение $U_{\rm cp}$ при возрастании относительной влажности и сверх величины, соответствующей началу конденсации влаги на поверхности изолятора (для стекла 60—70%, для фарфора 70—80%). В зоне высокой влажности разрядные напряжения имеют значительный разброс,



Рис. 6-6. Зависимости коэффициентов δ/K и k_p от высоты местности h над уровнем моря.

имеют значительный разорос, обусловленный нестабильностью условий образования водяной пленки. Заметим, что высокие влажности обычны для субтропических и тропических зон земного шара.

При развитии разряда по поверхности изолятора под дождем температура воздуха и его влажность практически не оказывают влияния на величину разрядного напряжения, так что последняя оказывается зависящей лишь от атмосферного давления. С некоторым запасом для всех типов изоляторов может быть использована формула

$$U_{\rm Mp} = U_{\rm Mp, n} R_p$$
, (6-1)
где поправочный коэффициент
 $k_n = 0.5 \left(1^{\frac{1}{2}} - \frac{p}{p} \right)$: (6-4a)

$$k_p = 0.5 \left(1 + \frac{p}{760} \right);$$
 (6-4a)

U_{мр} — мокроразрядное напряжение при давлении р;

 $U_{\rm Mp, H}$ — то же при стандартном давлении $p = 760 \, \text{мм рт. ст.}$

На мокроразрядные напряжения гирлянд влияют сила дождя и удельная проводимость дождевой воды. Согласно ГОСТ при определении мокроразрядного напряжения изоляторов нормируется сила дождя в 3 им/иии ± 20% и удельная проводимости и = 100 10-5 ¹ ³

в 3 *мм/мин* ± 20% и удельная проводимость $\gamma = 100 \cdot 10^{-6} \frac{1}{om \cdot cm}$

Сила и проводимость дождя являются статистическими величинами, для которых можно построить кривые вероятности. Проведенные в Советском Союзе (ВНИИЭ) исследования ливневых дождей показали следующее распределение интенсивности дождей (в течение одного года):

3 мм/мин и болсе — 0,5—1 мин;

2 *мм/мин* и более — 3—5 *мин*;

1 *мм/мин* и более — 20—50 *мин*;

0,1 мм/мин и более — 2000—4000 мин.

Из этих данных видно, что нормируемая интенсивность 3 *мм/мин* даже в ливневом дожде чрезвычайно редка. В большинстве случаев интенсивность дождя не превышает десятых долей миллиметров в минуту (*мм/мин*). Только в отдельных районах часто встречаются и более сильные дожди.

Нормируемая ГОСТ удельная проводимость дождя $\gamma = 100 \cdot 10^{-6} \times \frac{1}{om \cdot cm}$ также превышает обычно наблюдаемые значения. По данным измерений среднее значение γ в районах, удаленных от морей, составляет $(30 \div 40) \, 10^{-6} \frac{1}{om \cdot cm}$.

С уменьшением силы дождя и понижением проводимости мокроразрядное напряжение изоляторов повышается. Это повышение для эксплуатационных условий обычно учитывается поправочным коэффициектом $k_r = 1,1$.

6-7. РАЗРЯД ПО ЗАГРЯЗНЕННОИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ

Загрязнение поверхности изоляторов полупроводящими осадками является одной из главных причин перекрытия изоляторов при рабочем напряжении. Поэтому проблема выбора изоляции и профилактических мер в районах с загрязненной атмосферой имеет важнейшее значение в ТВН.

Условия разряда по загрязненной поверхности таковы. Загрязнение в сухом состоянии обычно не снижает U_p . Однако под действием влаги слой загрязнения приобретает ионную проводимость. Проводимость этого слоя значительно выше проводимости дождевой воды. Механизм разряда по загрязненной поверхности аналогичен разряду по увлажненной поверхности: под действием токов, протекающих по проводящей пленке, подсушиваются отдельные участки поверхности, что создает резко неравномерное распределение напряжения по поверхности и приводит к образованию дужек, растягивающихся вплоть до искрового перекрытия изолятора. Вследствие высокой проводимости загрязняющего слоя, все эти явления резко усиливаются по сравнению с явлениями при увлажнении незагрязненного изолятора, и поверхностное разрядное напряжение снижается тем в большей степени, чем больше степень загрязнения изолятора.

Увлажнение слоя загрязнения происходит особенно интенсивно во время туманов, росы, моросящего дождя, таяния снега и гололеда. Напротив, интенсивные дожди смывают слой загрязнения (либо вымывают из него проводящую фракцию) и очищают изоляторы. Благоприятные условия для отложения загрязнений имеют место при небольших скоростях ветра, не превышающих 1—4 *м/сек*. Весьма часты перекрытия изоляции в ранние утренние часы, когда при восходящем солнце на изоляторах выпадает роса. Поскольку перекрытия происходят при загрязнениях и увлажнениях, говорят о грязеразрядном U_{гр} или влагоразрядном U_{вр} напряжениях изоляторов.

Особенно опасными для изоляции являются уносы котельных; химических, металлургических, цементных заводов; брызги морской воды и пыль почвы, обильно содержащей соли (например, солончаков). Радиус зоны интенсивного загрязнения, если считать от источника, составляет примерно 1—2 км, а для химических заводов доходит до 2,5 км. В крупных промышленных центрах и их предместьях атмосфера загрязнена продуктами отработки множества предприятий, транспорта с паровозной тягой, тепловых станций на больших площадях.

В полевых условиях возникают загрязнения изоляции вследствие выветривания почвы (так называемые полевые загрязнения).

Анализ материала, изложенного в § 6-3, показывает, что основным конструктивным фактором, влияющим на разрядное напряжение увлажненного изолятора, является длина его пути утечки, которая может сравнительно просто регулироваться в широких пределах. Поэтому обычным путем борьбы с перекрытиями, вызванными загрязнением изоляции, является нормирование достаточных длин пути утечки, величина которых может быть поставлена в связь с проводимостью загрязняющего слоя, т. е. с его толщиной и удельной электропроводностью.

6-1
a
Ħ
z
5
9
9
÷

Допустимая удельная длина пути утечки изоляторов по отношению к наибольшему рабочему фазному напряжению

			Agr. CM/	^{ка} действ	
Сте- Пень		Ликећная	Кзоляция	Подстанци	онная изо- Ция
загряз- Исния	Характеристика района загрязиення	Сеть с эф. фектавно ваземлен- ной нейт- ралью	Сеть с изоли- рованной нейтралью	Сеть с эф- фективно заземлен- кой нейт- ралью	Сеть с изоли- рованной нейтралью
-	Особо чистые районы; полевое загряз- нение (сельские, лесистые и горные местности при отсутствии солончаков,	2,1	2,1	1	ł
11	промышленное загрязнение отсутствует) Слабое промышленное загрязнение (слабопроводящие промышленные загряз- нения, характерные для городов и окра- ин больших промышленных районов)	2,25	2,95	2,6	2,95
Ξ	Сильное промышленное загрязнение (районы с большой плотностью промыш- ленных предприятий, дающих большое количество уносов), не содержащее со- левых уносов	9,9	4,5	o, c	4,5
N	Очень интенсивное промышленное за- грязнение (зоны, непосредственно при- легающие к крупным тепловым электро- станциям, химическим, металлургическим заводам), не содержащее солевой пыли	5,2	6,0	ł	ł

Нормируются минимально допустимые удельные длины пути утечки изоляции λ_{yT} . Необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$\frac{L_{\mathbf{y}_{\tau},\mathbf{y}_{\Phi}\phi}}{U_{\Phi}} > \lambda_{\mathbf{y}_{\tau}},\tag{6-5}$$

где $L_{y_{7,3}\phi\phi}$ — эффективная длина пути утечки изоляции (отличающаяся от истинной поправочным коэффициентом $k_{y_{7}} \leq 1$);

*U*_ф — рабочее фазное напряжение.

Действующие в СССР нормы на удельную длину пути утечки приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1 не охватывает прибрежных морских районов, где опасны соляные отложения. Для таких районов принимают $\lambda_{yT} = 4,0 \div 5,2 \ cm/\kappa B_{\rm deйств}$.

В сетях с изолированной нейтралью возможно длительное существование замыкания фазы на землю, при котором напряжение на здоровых фазах возрастает до линейного. Казалось бы, что для таких сетей нормы на удельную длину пути утечки должны соответственно в $\sqrt{3}$ раз превышать нормативы для сетей с эффективно заземленной нейтралью. Однако, как видно из табл. 6-1, действующими нормами признается достаточным увеличение удельной длины пути утечки всего на 15—30%. Последнее объясняется небольшой вероятностью совпадения существования однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью и наиболее неблагоприятных погодных условий.

Как видно, из табл. 6-1, для подстанционной изоляции, имеющей обычно больший диаметр изоляторов *D*, чем линейная изоляция, желательно иметь несколько бо́льшую длину пути утечки. Эта рекомендация согласуется с выводами, вытекающими из формулы (6-2).

В районах так называемых полевых загрязнений нормируемый путь утечки минимален. Этот путь утечки не рассчитан на скольконибудь интенсивное загрязнение. Между тем, в таких районах иногда встречаются (в основном на линиях электропередачи) зоны интенсивного загрязнения изоляторов птицами, садящимися на конструкции опор. Опыт эксплуатации показывает, что этот вид загрязнений нередко является причиной поверхностного разряда по изоляторам.

Хотя загрязнение поверхности изоляторов в основном сказывается на снижении разрядных напряжений при рабочем напряжении, интенсивные загрязнения ведут также к существенному снижению $U_{\rm p}$ при коммутационных импульсах и незначительно снижают $U_{\rm p}$ при грозовых импульсах.

6-8. МЕРЫ, ПРЕДОТВРАЩАЮЩИЕ ПЕРЕКРЫТИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ ВСЛЕДСТВИЕ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

К числу таких мер относятся прежде всего общее очищение атмосферы вблизи крупных промышленных центров путем устройства золоуловителей и фильтров для выходящих газов, повышения высоты дымовых труб, перехода на более качественное, например газовое, топливо, применение электрической энергии для транспорта, металлургической промышленности и другие аналогичные меры. Естественно, что основной целью применения всех этих мер является оздоровление жизненных условий населения, а снижение загрязняемости изоляции электрических установок является следствием. В местах умеренного и интенсивного промышленного загрязнения вполне надежная работа изоляции обычно достигается доведением длин пути утечки до нормативов табл. 6-1. Наиболее простой мерой достижения нужной длины $L_{\rm yr.3\Phi\Phi}$ является увеличение числа изоляторов в гирлянде или в опорной колонке. Однако этот путь не является экономичным. Увеличение $L_{\rm yr.3\Phi\Phi}$ более дешевым путем достигается в специальных конструкциях изоляторов с увеличенным числом ребер (так называемые туманностойкие изоляторы), либо увеличенным вылетом ребер, располагаемых так, чтобы защитить часть поверхности изолятора от оседания слоя загрязнения. Конструкции таких изоляторов будут рассмотрены в гл. 11.

В районах с очень интенсивным промышленным или солевым загрязнением обеспечение надежной работы изоляции за счет увеличения $L_{yт.эф\phi}$ оказывается экономически невыгодным, а иногда и технически затруднительным. Радикальным средством борьбы с перекрытиями в таких местах является переход на закрытые распределительные устройства и кабельные линии. Такая мера, однако, очень дорога.

На подстанциях, находящихся в зонах интенсивных загрязнений, обычно ведутся систематические очистки изоляции со снятием или без снятия напряжения. В последние годы стала применяться очистка изоляторов струей сжатого воздуха. Выше уже указывалось, что интенсивный дождь смывает загрязнение с изоляторов. Поэтому в районах тяжелых, но хорошо смываемых загрязнений эффективным средством может явиться периодическая обмывка изоляторов струей воды под высоким давлением. Иногда с помощью специального устройства-отсекателя такой струе придают импульсный характер, что уменьшает опасность поражения персонала током, текущим по струе воды. С этой же целью устанавливаются сравнительно жесткие нормативы на удельную электропроводность воды, применяемой для обмывки. Для особо ответственных изоляторов (например, вводы в закрытые распредустройства) может быть использовано кепрерывное дождевание слабыми струями воды.

Весьма эффективно применение на изоляторах гидрофобных покрытий типа кремнийорганических паст. Твердые частицы оседают на такой пасте и не образуют сплошных проводящих мостиков при увлажнении поверхности. Вследствие гидрофобности паст влага на поверхности накапливается в виде отдаленных друг от друга капель, которые хорошо скатываются с поверхности вместе с твердыми частицами. Недостатком существующих гидрофобных паст является необходимость их смены каждые 3—6 мес. Тем не менее такие пасты целесообразно применять на подстанциях, подвергаемых очень сильным загрязнениям.

Для своевременной очистки или обмывки изоляторов важно определение интенсивности загрязнения в эксплуатации. Эта задача может быть решена путем измерения тока утечки по изолятору под рабочим напряжением. Для каждого типа изоляции может быть установлено предельное значение тока утечки $i_{y\tau}$, при котором уже необходима очистка изоляторов.

6-9. ПОВЕРХНОСТНЫЙ РАЗРЯД В РАВНОМЕРНОМ ПОЛЕ

В некоторых изоляционных конструкциях поверхность изолятора расположена вдоль силовых линий равномерного поля (рис. 6-7). Хотя изолятор не искажает электрического поля, тем не менее разрядное напряжение изоляционной конструкции существенно снижается. Одной
Рис. 6-7. Зависимость среднего сухоразрядного напряжения по поверхности в равномерном поле от расстояния между электродами.

I — воздушный промежуток; 2 фарфор; 3 — стекло (более гигроскопично, чем фарфор); 4 — фар фор и стекло при неплотном прилегании электродов к диэлектрику.



из причин этого снижения является гигроскопичность изоляционных материалов, приводящая к образованию на их поверхности микроскопически тонкого слоя влаги. Образование такой пленки ведет к снижению U_p по причине, рассмотренной в § 6-3. Как видно, из сравнения кривых 2 и 3, с ростом гигроскопичности изоляционного материала разрядное напряжение изолятора снижается.

Второй причиной снижения разрядного напряжения может явиться ионизация в воздушных прослойках, образующихся при неплотном прилегании электродов к торцам диэлектрика (кривая 4). Исключение воздушных прослоек в изоляционных конструкциях достигается тщательным соединением электродов с изолятором с помощью цемента, обладающего высокой механической прочностью, плотностью и достаточной электропроводностью.

6-10. ПОВЕРХНОСТНЫЙ РАЗРЯД ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Отличительной особенностью работы изоляции на постоянном напряжении является регулирование электрического поля проводимостями, а не емкостями, как на переменном напряжении. Поэтому на поверхностное разрядное напряжение решающее влияние оказывает проводимость поверхностного слоя. Возможно резкое снижение разрядного напряжения в случае частичного смачивания или загрязнения изоляции, когда возникает резкая неравномерность распределения напряжения по изоляции. Принципиально эффективным средством повышения разрядного напряжения является применение изоляторов, изготовленных из полупроводящей массы или имеющих полупроводящую глазурь. Однако технология изготовления таких изоляторов пока еще несовершенна.

Так как при длительном приложении напряжения к увлажняемой дождем поверхности диэлектрика разряд развивается вследствие тепловых явлений в водяном слое (§ 6-3), мокроразрядное напряжение при постоянном напряжении примерно равно эффективному значению мокроразрядного напряжения при переменном напряжении.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Как изменится разрядное напряжение по поверхности изолятора рис. 6-1, если увеличить диэлектрическую постоянную твердого диэлектрика е?

2. Как влияет частота или скорость изменения напряжения на величину разрядного напряжения по поверхности изолятора; на путь развивающегося перекрытия?

3. Объясните влияние интенсивности дождя и проводимости воды на величину U_{Mp} . Почему при грозовых импульсах дождь оказывает малое влияние на разрядное напряжение по поверхности изолятора?

4. Какие требования можно выдвинуть к конструкции изоляторов с точки зрения увеличения U_{ср} и U_{жр}?

5. Оцените величину коэффициента импульса при воздействии коммутационных перенапряжений на находящийся под ливневым дождем ввод 110 кв с U_{ep} =315 кв, U_{mp} =220 кв.

Ответ: ~1,2.

6. Определите величину мокроразрядного напряжения указанного в задаче 5 ввода при атмосферном давлении 600 мм рт. ст.

Ответ: 197 кв.

7. Перечислите экономически приемлемые меры по защите изоляции от загрязнений и повышению U_{rp} при загрязнениях на подстанциях и линиях электропередачи.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ И КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ

Внутренняя изоляция электрических машин, аппаратов и изоляторов обычно содержит твердые или твердые и жидкие диэлектрики. Эти диэлектрики обладают высокой электрической прочностью, что позволяет выполнять изоляционные конструкции относительно малых размеров. Усилия конструкторов и технологов постоянно направлены на повышение электрической прочности используемых диэлектриков путем как улучшения технологии их изготовления, так и применения новых материалов.

К внутренней изоляции предъявляется также требование хорошего отвода тепла, выделяемого в проводниках при протекании тока и в самой изоляции вследствие диэлектрических потерь. Поэтому важной характеристикой твердых диэлектриков является теплопроводность. В жидких диэлектриках эффективный перенос тепла осуществляется путем конвекции. Во многих устройствах, например, трансформаторах, маслонаполненных вводах, практически все выделяющееся тепло отводится через конвекцию жидкого диэлектрика (масла).

Внутренняя изоляция обычно несет также некоторую механическую нагрузку, которая может резко возрасти во время коротких замыканий в системе, резких температурных изменений. Механическую нагрузку воспринимает твердая изоляция, которая должна в связи с этим обладать необходимой механической прочностью.

В отличие от внешней — воздушной изоляции внутренняя изоляция подвержена старению, в результате которого снижается электрическая и механическая прочность диэлектриков. Поэтому важную роль в эксплуатации высоковольтных устройств с внутренней изоляцией имеет систематический контроль изоляции.

Глава седьмая

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТВЕРДОЙ, ЖИДКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

7-1. ТВЕРДОЕ И ЖИДКОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Как известно, любое вещество может находиться в газообразном, жидком или твердом состоянии. В твердом диэлектрике, как и вообще в твердом веществе, атомы и молекулы сильно сближены и плотно упакованы, что обеспечивает сохранность формы образца. Тепловое движение атомов проявляется в их колебаниях около положения равновесня. Твердые вещества, в частности диэлектрики, подразделяются на кристаллические и аморфные. Первые отличаются упорядоченным расположением атомов, образующих кристаллическую решетку. В аморфных телах атомы расположены хаотично. В жидких диэлектриках связи между молекулами допускают их взаимное перемещение при сохранении среднего расстояния между молекулами.

Границы между рассматриваемыми состояниями вещества задаются критическими температурами плавления и газообразования, которые в свою очередь зависят от давления. Аморфные вещества не имеют резко выраженной температуры плавления. По мере повышения температуры аморфное твердое тело постепенно размягчается; обратный переход происходит также постепенно путем загустения жидкости.

Жидкость при нормальной температуре можно формально представлять как газ, сжатый при давлении около 2000 ат. Это, между прочим, дает наглядное объяснение явлению «несжимаемости» жидкости: давления в десятки и даже сотни атмосфер малы по сравнению с силами сцепления молекул в жидкости. Аморфное твердое тело с его неупорядоченной атомной структурой можно формально представлять как переохлажденную жидкость. Существуют вещества типа смол и компаундов, которые занимают промежуточное положение между жидкостью и твердым телом: они сохраняют свою форму в течение некоторого промежутка времени, но растекаются в течение длительного времени под действием собственного веса. В технике высоких напряжений широко распространены также изоляционные твердые (волокнистые) материалы, пропитанные изолирующей жидкостью (маслом) или газом. Все эти примеры показывают, что подразделение диэлектриков на твердые, жидкие и газообразные весьма условно и может служить только для установления некоторых предельных физических и технологических характеристик изоляционных веществ. В дальнейшем будет показано, что закономерности электрического пробоя в реальных технических диэлектриках большей частью также проявляются в смешанной форме, т. е. в форме, присущей всем трем агрегатным состояниям вещества.

Физико-химические и технологические свойства диэлектриков подробно изучались в курсе «Электротехнические материалы». Подробные данные изложены в «Справочнике по электротехническим материалам» под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева (Госэнергоиздат, 1958). Важнейшими характеристиками диэлектриков являются:

1) электрическая прочность при одноминутном испытании $E_{\rm пр}$ ($\kappa_{\it B}/c_{\it M}$); 2) относительная диэлектрическая проницаемость ε' ; 3) тангенс угла диэлектрических потерь tg δ ; 4) удельное сопротивление ρ ($Mo_{\it M} \cdot c_{\it M}$) или удельная проводимость γ ($1/Mo_{\it M} \cdot c_{\it M}$); 5) класс нагревостойкости, характеризующий максимальную длительную температуру, допустимую для изоляции в эксплуатации. Приняты следующие классы нагревостойкости:

Класс нагрево- стойкости	Y	A	E	в	F	Н	с
Максимальная ра- бочая темпера- тура, С°	90	105	120	130	155	180	Выше 180

Электрическая прочность диэлектриков определяется в равномерном поле между электродами специальной формы при определенном

нормированном расстоянии между ними. Если толщина диэлектрика, т. е. расстояние между электродами, равна $d(c_{\mathcal{M}})$ и пробивное напряжение диэлектрика $U_{\mathbf{n}_{i}}(\kappa_{\theta})$, то электрическая прочность $E_{\mathbf{n}_{i}} = \frac{U_{\mathbf{n}_{i}}}{d}$, $\kappa_{\theta}/c_{\mathcal{M}}$.

Электрическая прочность $E_{\rm np}$ есть характеристика, используемая в основном для сравнительной оценки диэлектриков. В изоляционных конструкциях, в которых изоляционные промежутки имеют самые разнообразные формы и геометрические размеры, пробой может наступать при разрядных напряженностях поля (или разрядных градиентах) $E_{\rm p}$, существенно отличных от электрической прочности $E_{\rm np}$.

7-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В твердых диэлектриках, как и в газах, электрический пробой связан с ускорением электронов под воздействием электрического поля. В твердом теле электроны частично связаны с индивидуальными атомами, а частично с группами атомов. Наиболее слабо электроны связаны с атомами в местах структурной неоднородности материала. В диэлектриках имеются также свободные электроны или электроны проводимости, однако число их при обычных температурах невелико. Показателем числа свободных электронов является ток проводимости (или сопротивление изоляции) при постоянном напряжении.

Мерой хаотического движения электронов проводимости является температура электронного «газа» Т. С повышением температуры T_2 и напря-женности электрического поля E энергня электронов проводимости W возрастает, как это показано кривыми А на рис. 7-1. С повышением температуры T_э растет также энергия, передаваемая электроном кристаллической решетке диэлектрика и рассеиваемая в его толще (кривая B). Равновесное состояние характеризуется пересечением кривых А и В в точках 1 и 2. При напряженности внешнего поля $E_{\rm пр}$, которому соответствует касание кривых A и B, происходит нарушение равновесия; возникает непрерывный рост электронной температуры, что приводит к пробою диэлектрика. Критическая напря-



Рис. 7-1. Зависимости энергии, накопленной электроном (кривая A) и передаваемой решетке (кривая B), от температуры электронного газа T₀ при разных напряженностях поля E.

женность $E_{\rm mp}$ является электрической прочностью диэлектриков. Таким образом, электрический пробой твердых диэлектриков есть проявление температурной неустойчивости на электронном уровне.

Приведенная физическая картина пробоя твердых диэлектриков следует теории Фрелиха — теории, в настоящее время общепризнанной, хотя и не раскрывающей всех сторон явления пробоя. Строгое изложение теории Фрелиха основывается на квантовомеханических закономерностях.

С повышением температуры диэлектрика T_0 кривая B сдвигается вправо и напряженность $E_{\rm пр}$ должна снижаться. Такая зависимость действительно наблюдается для технических твердых диэлектриков. 8—641 Поэтому электрическая прочность диэлектриков часто проверяется во всем диапазоне рабочих температур.

По изложенной теории также следует, что можно ожидать повышения электрической прочности диэлектриков при устранении дефектов их структуры. Опыт показал, что микроскопические дефекты, от которых трудно освободить материал, незначительно влияют на электрическую прочность, если только основная структура материала сохраняется. Такой материал является технически чистым. Макроскопические





Рис. 7-2. Осциллограммы напряжения при последовательном пробое кабельной бумаги.

дефекты сильно снижают электрическую прочность диэлектриков.

• Электрическая прочность твердых диэлектриков почти не зависит от толщины образца, т. е. пробивное напряжение растет пропорционально толще диэлектрика. Отступление от этой закономерности наблюдается только при очень тонкослойных диэлектриках, порядка микрон; при таких толщинах электрическая прочность $E_{пр}$ резко возрастает.

Резкое возрастание $E_{\rm пр}$ в тонких слоях заманчиво использовать для создания высокопрочной изоляции, состоящей из тонких слоев. Такая тонкослойная изоляция предлагалась в прошлом академиком

А. Ф. Иоффе. Однако из-за технологических трудностей выполнения однородных тонких слоев высокой чистоты эта идея была на долгие годы оставлена. Но в настоящее время в связи с новой, молекулярной технологией изготовления тонких пленок идея А. Ф. Иоффе вновь стала привлекать внимание исследователей.

В неоднородном поле условия электрического пробоя выполняются прежде всего у электрода с большей кривизной, с которого начинается прорастание разрядного канала. Канал переносит высокие напряженности поля в глубь промежутка, в результате чего происходит прорастание канала, завершающееся пробоем изоляции. Аналогично газовым промежуткам в твердой изоляции действует барьерный эффект из тонких высокопрочных пленок, заложенных в материал вблизи электрода с большей крутизной (этот эффект был открыт в ТПИ Д. Д. Румянцевым и Н. М. Торбиным).

Характерной особенностью электрического импульсного пробоя твердой изоляции является возможность частичных разрядов, приводящих к необратимым частичным разрушениям материала и постепенному снижению электрической прочности изоляции. Осциллограммы последовательного пробоя изоляции (кабельной бумаги) показаны на рис. 7-2. Первый импульс вызвал частичный пробой, обнаруживаемый по излому кривой напряжения вблизи амплитуды. Второй импульс усилил этот излом. Третий импульс привел почти к полному срезу напряжения. Пробой достиг завершающей стадии и четвертый импульс дал только незначительный подъем напряжения на образце. Явление пробоя изоляции под действием ряда импульсов названо кумулятивным эффектом. Кумулятивный эффект имеет важное значение при импульсных испытаниях высоковольтного оборудования.

7-3. ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

При сравнительно длительном воздействии напряжения на диэлектрик возможно значительное снижение его пробивного напряжения, связанное с выделением тепла в его толще. В этом случае пробой называется тепловым. Тепловой пробой может возникнуть, в частности, при длительном воздействии рабочего напряжения.



Рис. 7-3. К расчету теплового пробоя диэлектрика в однородном поле. *а* — расчетная схема; *б* — распределение температуры по толще диэлектрика.

Под действием переменного напряжения через диэлектрик протекает емкостный ток (ток смещения) I_c и активный ток I_a , обусловленный диэлектрическими потерями в образце. Отношение $I_a/I_c = tg \delta$ называется коэффициентом диэлектрических потерь в изоляции. Для газовой изоляции при докоронных напряжениях $tg \delta$ практически равен нулю. Для твердых и жидких диэлектриков $tg \delta$ обычно лежит в пределах 0,01—0,03. С ростом температуры $tg \delta$ растет примерно по экспонснциальному закону

$$(\operatorname{tg} \delta)_{T} = (\operatorname{tg} \delta)_{T} e^{a (T - T_{0})}, \qquad (7-1)$$

где *Т* и *T*₀ — температуры, при которых определяется величина tg ð; *а* — постоянная.

Выделяющееся в диэлектрике тепло расходуется на его нагрев. Основные закономерности наиболее просто удается рассчитать для плоского конденсатора с однородным диэлектриком (рис. 7-3,*a*), тепловой поток в котором направлен от центрального сечения диэлектрика к электродам, имеющим, как предполагается, постоянную температуру. Рассмотрим объем Sdx диэлектрика (S — площадь пластины конденса-8* тора) на расстоянии x от оси конденсатора. В этом объеме выделяется мощность

$$\Delta P = \Delta U I_{a} = E \, dx \, I_{p} \, \mathrm{tg} \, \delta,$$

HO

$$I_{\rm p} = \omega \Delta C \Delta U = \omega \varepsilon \frac{S}{dx} E \ dx = \omega \varepsilon S E,$$

Подставляя Ір, получаем:

$$\Delta P = E^2 \,\omega \varepsilon \, \mathrm{tg} \,\delta \, Sdx.$$

Распространение тепла в твердом диэлектрике обусловлено напряженностью температурного поля $G = d\vartheta/dn$, где n — координата в направлении наибольшего возрастания температуры. В конденсаторе на рпс. 7-3, $a \ G = d\vartheta/dx$. Тепловой поток (выраженный в ваттах), проходящий в единицу времени через поверхность S, равен P = kGS, где k — коэффициент внутренней тепловодности диэлектрика.

Тепловой поток, входящий в объем S dx через сечение x, равен $P_1 = kGS$, а выходящий из этого объема через сечение x + dx равен $P_2 = k \left(G + \frac{\partial G}{\partial x} dx\right)S$. Их разность даст значение теплового потока, выходящего из объема S dx:

$$\Delta P_{1-2} = P_1 - P_2 = -k \frac{\partial G}{\partial x} dx S = -k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} S dx.$$

Тепловое равновесие наступит, если этот поток будет равен мощности диэлектрических потерь в том же объеме ΔW . Из этого условия находим уравнение теплового баланса:

$$k\frac{d^2\theta}{dx^2} + \varpi E^2 \operatorname{tg} \delta = 0.$$

Подставив в это уравнение зависимость (7-1), получаем:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{\omega \epsilon E^2 \operatorname{tg} \delta}{k} e^{a \left(\theta - \theta_0\right)} = 0.$$
(7-2)

На границе $x = \frac{d}{2}$ перепад температуры ϑ равен:

$$\lambda \left(\vartheta_{x=\frac{d}{2}} - \vartheta_{0}\right) = kG_{x=\frac{d}{2}},\tag{7-3}$$

- где λ коэффициент теплопроводности между диэлектриком и электродом;
 - Фо температура электродов, которая практически равна температуре окружающей среды (воздух, масло и т. п.).

Решение уравнений (7-2) и (7-3) выражается функцией $\vartheta = f(x)$, ход которой показан на рис. 7-3,6. Температура максимальна в среднем сечении. Чем выше напряженность *E* при заданных tg δ_0 и *a*, тем выше температура $\vartheta_{\text{макс}}$. Эта зависимость показана на рис. 7-4. При некоторой напряженности $E_{\text{пр}\vartheta}$ касательная $\frac{d\vartheta_{\text{макс}}}{dE} \rightarrow \infty$. Это н есть условие тепловой неустойчивости. При сколь угодно малом приращении *E* температура $\vartheta_{\text{макс}}$ будет расти неограниченно, что в конечном счете приведет к пробою изоляции. Пробивную напряженность $E_{\text{пр}\vartheta}$ можно определить из уравнения (7-2) по условию $dE/d\vartheta_{\text{макс}}=0$ для точек x=0, где температура максимальна. Из изложенного следует, что § 7-3]

тепловой пробой твердого диэлектрика есть проявление температурной неустойчивости на молекулярном уровне (в отличие от электрического пробоя).

Не останавливаясь на промежуточных, довольно сложных математических выкладках, приведем окончательные выражения для $U_{\rm пp\theta}$ твердого диэлектрика в плоском, а также цилиндрическом конденсаторах:

а) в плоском конденсаторе

$$U_{np\theta} = 3,79 \cdot 10^{\circ} \sqrt{\frac{k}{af\epsilon' \operatorname{tg} \delta_{\circ}}} \,\varphi(c), \, \kappa \theta; \qquad (7-4)$$

б) в цилиндрическом конденсаторе

$$U_{\rm np\vartheta} = 1,9 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{k}{af\epsilon' \, {\rm tg} \, \delta_0}} \, \varphi(c), \ \kappa \theta.$$
 (7-4a)



Рис. 7-4. Зависимость максимальной температуры диэлектрика от напряженности поля.



В этих формулах: k — коэффициент внутренней теплопроводности диэлектрика, $bT/cM^3 \cdot C$;

a — температурный коэффициент tg δ , $rpa\partial^{-1}$;

f — частота переменного тока, гц;

ε' — относительная диэлектрическая постоянная;

tg δ_0 — начальное значение tg δ (при $\vartheta = \vartheta_0$);

 $\varphi(c) - \varphi$ ункция параметра $c = \alpha \lambda/2k$, показанная на рис. 7-5;

 $\alpha = d$ — в плоском конденсаторе и $\alpha = 2r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}$ — в цилиндрическом

конденсаторе; d и r — в сантиметрах;

 λ — коэффициент внешней теплопроводности между диэлектриком и электродом, ${\it bt}/{\it cm^2} \cdot {\rm ^oC}$.

Изложенная теория теплового пробоя была разработана акад. В. А. Фоком.

Пример 7-1. Рассчитать пробивное напряжение стеклянной пластины толщиной *d* в пределах 1—4 см.

В пределах 1—4 см. Коэффициент внутренней теплопроводности k для стекла равен 0,01 вт/см² · °С, коэффициент внешней теплопроводности равен 0,017 вт/см² · °С. Примем Ф₀=20°С (или 293° K). Значение tg ð₀=0,01, и температурный коэффициент а=0,0184 · (°С⁻¹). Для стекла ε'=6. Параметр $c = \alpha \lambda / 2k$ при *d*, равном 1 и 4 *см*, будет соответственно равен:

$$c (d = 1 \ cM) = \frac{1 \cdot 0.017}{2 \cdot 0.01} = 0.85; \ c (d = 4 \ cM) = 3.4.$$

По рис. 7-5 находим значения

$$\varphi(c)_{d=1} c_{M} = 0,35$$
 H $\varphi(c)_{d=4} c_{M} = 0,52.$

Подставив числовые значения в формулу (7-4), получим:

$$U_{np\theta}(d = 1 \ c_{M}) = 3,79 \cdot 10^{3} \sqrt{\frac{0,01}{0,0184 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 0,01}} \ 0,35 = 560 \ \kappa_{\theta};$$
$$U_{np\theta}(d = 4 \ c_{M}) = 830 \ \kappa_{\theta}.$$

Произведя аналогичные расчеты для разных значений *d*, можно построить зависимость от *d* для величины среднего пробивного градиента

$$E_{np\vartheta} = \frac{U_{np\vartheta}}{d}.$$

Пробивные градиенты падают с увеличением толщины образца, что объясняется ухудшением условий теплоотвода. Наоборот, малым толщинам должны соответствовать высокие $E_{np}\vartheta$. Однако в этом случае прочность диэлектрика определяется условиями электрического пробоя.

Пробивное напряжение снижается с повышением tg δ . Поэтому величина tg δ_0 , которая обычно относится к температуре 20° С, служит показателем прочности диэлектрика в отношении теплового пробоя. Резкое повышение tg δ_0 наблюдается при увлажнении диэлектрика. Поэтому увлажнение является наиболее вероятной причиной теплового пробоя. В наиболее тяжелых условиях находится изоляция (например трансформаторные вводы), нормально находящаяся при высокой температуре ϑ_0 и вследствие этого имеющая относительно высокий tg δ_0 . К этой изоляции предъявляются повышенные требования в отношении значения при $\vartheta_0 = 20^\circ$ С.

Важной особенностью теплового пробоя служит зависимость $U_{\rm прb}$ от температуры окружающей среды ϑ_0 . С ростом температуры $U_{\rm пpb}$ снижается. Однако в § 7-2 было показано, что зависимость $U_{\rm np}$ от температуры характерна также для электрического пробоя. Поэтому наличие такой зависимости еще не позволяет установить форму пробоя. Отличительной особенностью теплового пробоя является медленное его развитие, связанное с необходимостью разогрева диэлектрика под действием приложенного напряжения. Время пробоя снижается при возрастании U сверх $U_{\rm npo}$, однако даже в худших случаях это время — порядка минут. При U, близких к $U_{\rm npb}$, время пробоя исчисляется часами. Тепловой пробой наиболее вероятен в области наихудшего теплоотвода в изоляции. Электрический же пробой наиболее вероятен в области максимальных напряженностей поля на краях электродов.

Отметим еще, что сам термин «тепловой пробой» не вполне точен. Пробой всегда имеет электрическую природу. Суть дела в том, что в результате тепловой нестабильности температура образца достигает значений, при которых возникает электропроводящий канал.

На постоянном напряжении потери в диэлектрике обусловлены только омической проводимостью материала, которая в здоровой изо-

ляции очень мала. Поэтому на постоянном напряжении тепловой пробой указанного вида хотя принципиально и возможен, но в здоровой изоляции практически не возникает.

7-4. ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ В КАНАЛЕ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

В предыдущем параграфе при изучении теплового пробоя предполагалось, что диэлектрик в плоском или цилиндрическом конденсаторе однороден в отношении диэлектрических потерь. Это справедливо для здоровой изоляции. Но если изоляция дефектная, то возможно образование каналов с высокой активной проводимостью (рис. 7-6). В таком канале выделяющееся тепло будет создавать тепловой поток, направление которого показано стрелками на рис. 7-6.



Рис. 7-6. Схема для расчета теплового пробоя диэлектрика с каналом высокой проводимости.



Рис. 7-7. Зависимость мощности, выделяемой в канале (кривые A) и рассеиваемой в толще диэлектрика (прямая B), от разности температур.

С ростом разности температур $\vartheta - \vartheta_0$ активная проводимость канала растет по показательному закону [формула (7-1)]. Соответственно растет также и мощность $P = U^2 g$, выделяемая в канале. С другой стороны, мощность теплового потока от канала растет пропорционально $\vartheta - \vartheta_0$. Указанные зависимости показаны на рис. 7-7; пересечение кривых в точке 1 определяет устойчивое тепловое равновесие. При значении приложенного напряжения $U > U_{\rm пр\vartheta}$ возникает тепловая нестабильность, температура канала неограниченно растет и происходит пробой диэлектрика. Времена пробоя могут быть очень малы.

Подобный вид теплового пробоя может возникать и на постоянном напряжении; в этом случае выделяющаяся в канале мощность определяется только его ионной проводимостью.

Обнаружение развивающихся каналов высокой проводимости и тем самым предотвращение теплового пробоя данной формы является одной из задач испытания изоляции.

7-5. ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Электрический пробой жидких диэлектриков имеет много общих черт с пробоем газов. Под действием приложенного напряжения возникает эмиссия электронов из катода и «размножение» их в результате ударной ионизации нейтральных молекул жидкости. Искажение поля способствует появлению вторичных электронов и поддержанию самостоятельного разряда в виде стримеров. В технических жидких диэлектриках всегда содержится растворенный газ, который под действием приложенного напряжения имест тенденцию собираться в маленькие пузырьки. Кроме того, выделяющаяся при развитии разряда теплота ведет к образованию новых пузырьков за счет испарения жидкого диэлектрика. Поэтому путь разряда в жидкости включает не только жидкую, но и газообразную фазу, что способствует развитию разряда.

Коронный разряд в изолирующих жидкостях протекает в форме стримеров, неустойчивых в пространстве и времени. В трансформаторном масле коронный разряд заметным образом не влияет на качество



7-8. Pitc. Типичная зависимость электрической прочности трансформаторного масла от процентного содержания влаги масла, однако в присутствии твердой органической изоляции коронный разряд может привести к резкому снижению электрической прочности изоляционной конструкции. Когда стример пересечет весь разрядный про-

межуток, возникнет искровой разряд. Температура разрядного канала резко повышается, и в результате испарения весь канал оказывается заполненным сильно ионизированным газом (плазмой). Окружающая жидкая среда оказывает на разрядный канал сильное деионизирующее действие. Если пробой промежутка происходит под действием короткого импульса перенапряжения, то вероятность перехода импульсного разряда в устойчивую дугу мала и промежуток частично восстанавливает свою первоначальную электрическую прочность. Образовавшиеся в результате разложения масла искровым разрядом частички угля и пузырьки газа постепенно рассеиваются в объеме масла, не сказываясь сколько-нибудь существенно на его дальнейшей электрической прочности. Подобная способность к «самозалечиванию» является характерной особенностью жидких диэлектриков с малой вязкостью.

Жидкости при давлениях до нескольких десят-

(по Шпату).

ков атмосфер практически несжимаемы. Поэтому давление не может оказать влияния на разрядное напряжение идсально обезгаженной жидкости. В технических жидких диэлектриках содержится растворенный газ и давление передается через жидкость этому газу. С увеличением давления возрастает прочность газовых пузырьков и соответственно общая электрическая прочность жидкости.

Электрическая прочность Enp жидких диэлектриков и, в частности, изолирующих масел резко снижается при различного рода загрязнениях и особенно при увлажнении. Под действием электрического поля частицы загрязнения или капельки влаги, обычно обладающие большей относительной диэлектрической проницаемостью, чем жидкий диэлектрик, втягиваются в зону повышенных градиентов, образуя цепочки, направленные вдоль силовых линий. При перекрытии вдоль такой цепочки разрядное напряжение резко снижается.

В минеральных маслах вода может находиться в трех состояниях: а) в молекулярно-растворенном; б) в форме эмульсии, т. е. капелек диаметром около 10 мк, и в) в виде отстоя на дне резервуара с маслом. В растворенном состоянии вода не оказывает существенного влияния на E_{пр}. Резкое спадение E_{пр} наблюдается в масле с водной эмульсией (рис. 7-8). Водный отстой сам по себе не влияет на $E_{
m mp}$ масла, но при увеличении температуры возможен его переход в эмульсионное состояние. Водный отстой является, таким образом, показателем резкого снижения изоляционных характеристик масла.

Особенно значительно влияние влаги в присутствии частиц высокой гигроскопичности, например B0.10кон твердой органической изоляции. В этом случае влага может пропитывать волокна, повышая их эквивалентное значение є' и тем способобразованию из ствуя них цепочек, резко снижающих пробивное напряжение. При нагреве влага от волокон переходит в изолирующую жидкость, что сопровождается повышением электрической прочности.

В жидких диэлектриках наблюдается существенная зависимость



Рис. 7-9. Вольт-секундная характеристика (нижияя огибающая разрядных напряжений) технически чистого трансформаторного масла в промежутке s= =6 см с резко неоднородным полем (по Панову).

разрядного напряжения от времени приложения напряжения (рис. 7-9). Подъем разрядного напряжения при временах, меньших 10 мксек, объясняется запаздыванием развития стримерного разряда аналогично запаздыванию разряда в газах. Снижение разрядного напряжения при



Рис. 7-10. Зависимость среднего пробивного напряжения технически чистого трансформаторного масла от расстояния между электродами стержень — плоскость.

1 — импульсная волна 1,5/40 *мксек* отрицательной полярности; 2 — то же положительной полярности; 3 плавный подъем напряжения промышленной частоты. 4 — одноминутное воздействие напряжения промышленной частоты.

временах, больших 10⁴ мксек (0,01 сек), связано с влиянием примесей; образование цепочек частиц, снижающих электрическую прочность масла, происходит относительно медленно. По этой причине примеся, в том числе увлажнение, практически не влияют на электрическую прочность масла при грозовых импульсах. С изменением формы и размера разрядного промежутка ход вольт-секундной характеристики может несколько изменяться.

На рис. 7-10 приведены зависимости разрядного напряжения (среднего значения) от длины промежутка стержень плоскость. Разрядные напряжения при положительной полярности ниже, чем при отрица-

тельной. Этот эффект полярности объясняется аналогией в развитии положительного и отрицательного стримера в жидкостях и газах. При приложении переменного напряжения разряд происходит в полупернод положительной полярности. При плавном подъеме напряжения промышленной частоты пробивные напряжения заметно выше, чем при одноминутном его воздействии. Как и в газах, средний разрядный граднент у жидких диэлектриков возрастает с уменьшением разрядного промежутка. Этот эффект особенно заметен в тонких слоях изолирующих жидкостей.

Пробивные напряжения жидких диэлектриков характеризуются весьма значительным разбросом относительно средних значений. Такой разброс при повторных пробоях связан в первую очередь с хаотическим характером процесса построения частиц примесей в цепочке вдоль силовых линий электрического поля. Кривая распределения $E_{\rm пp}$ около среднего значения $E_{\rm пp\,5}$, следует нормальному закону, выражаемому формулой (5-1). Чем больше примесей в изолирующей жидкости, тем больше должен быть разброс $E_{\rm пp}$. Это подтверждается следующими цифрами: неочищенное трансформаторное масло имеет разброс значений $E_{\rm пp}$ от 30 до 50%, а при очистке масла центрифугой разброс снижается до 5—10%. Таким образом, разброс $E_{\rm пp}$ может также служить показателем чистоты масла.

В жидких диэлектриках при плохом теплоотводе возможна и тепловая форма пробоя, аналогичная пробою твердых диэлектриков. Такая форма, естественно, исключена в тех конструкциях (например, трансформаторы), в которых обеспечена циркуляция жидкости.

7-6. МАСЛЯНО-БАРЬЕРНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Во многих изоляционных конструкциях (трансформаторы, вводы) используется изоляция, в которой промежутки с изоляционной жидкостью, обычно с трансформаторным маслом, перегорожены барьерами из твердой изоляции. Действие барьера различно в однородных и неоднородных полях. В равномерном или слабонеравномерном поле барьер препятствует возникновению проводящих цепочек в изолирую-



Рис. 7-11. Влияние тонкого барьера на пробивное напряжение (50 *гц*) трансформаторного масла в резко неоднородном поле (по А. В. Панову и П. В. Борисоглебскому). щей жидкости между электродами. Барьер, установленный вблизи электрода с большей напряженностью поля, повышает разрядное напряжение при длительном приложении промышленной частоты на 30—35% (рис. 7-11). Аналогичное действие оказывает поверхностное покрытие твердым диэлектриком электрода, обладающего большей кривизной.

При импульсах проводящие цепочки не успевают образоваться, поэтому барьеры в слабонеравномерных полях не повышают импульсного напряжения. Это заключение, однако, относится к чистым промежуткам в масле. В реальных конструкциях масляно-барьерной изоляции, как будет показано

в гл. 16, барьеры оказываются всегда эффективными.

В резко неравномерном поле действие барьера в жидком диэлектрике аналогично действию барьера в газовом промежутке (см. § 4-15): заряды, возникающие в стадии короны, растекаясь по барьеру, выравнивают поле между барьером и плоскостью. Как видно из рис. 7-11, установка барьера повышает $U_{\rm пр}$ промежутка с неравномерным полем в 2—2,5 раза. Наивысшие разрядные напряжения достигаются при установке барьера вблизи стержня на расстоянии 0,1—0,25*d*. Коронный разряд в масле, возникающий в резконеравномерном поле при напряжении много меньше пробивного, может охватить весь промежуток между электродом и барьером. При грозовых и коммутационных импульсах коронный разряд не приводит к порче барьера, но при длительном приложении напряжения корона постепенно разрушает барьер, что приводит к снижению пробивного напряжения всего промежутка. Поэтому возникновение коронного разряда при рабочем напряжении недопустимо. Так как наличие барьера не влияет на коронное напряжение, то в неравномерном поле барьеры не влияют на допустимую величину длительно приложенного напряжения.

7-7. БУМАЖНО-МАСЛЯНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Бумажно-масляная изоляция состоит из ряда последовательных слоев пропитанной маслом бумаги и масляных прослоек между слоями бумаги. Технологически эта изоляция выполняется путем намотки бумажного остова и последующей пропитки изоляции маслом. Поэтому бумажно-масляная изоляция называется также бумажно-пропитанной изоляцией. В настоящее время бумажно-масляная изоляция по праву считается изоляцией высшего качества, используемой в конструкциях с наиболее высокими напряжениями электрического поля.

Эквивалентная схема для бумажно-масляной изоляции показана на рис. 7-12. В этой схеме через δ_6 и $\delta_{\rm M}$ обозначены толщины бумаги и масла. Отношение $\frac{E_{\rm M}}{E_6} = \frac{\epsilon_6}{\epsilon_{\rm M}} \approx 1,7$; электрическая прочность масла ниже прочности бумаги. Поэтому в целом пробивная напряженность бумажно-масляной изоляции определяется пробивной напряженностью масляных прослоек.

Если к двухслойному диэлектрику (рис. 7-12) приложено напряжение U, то напряженность поля в масляной прослойке

$$E_{\rm M} = \frac{UC_6}{\delta_{\rm M} \left(C_{\rm M} + C_6\right)} = \frac{U\epsilon_6}{\epsilon_{\rm M}\delta_6 + \epsilon_6\delta_{\rm M}}.$$
(7-5)

Обозначим через Еср среднюю напряженность поля в диэлектрике:

$$E_{c_1} = \frac{U}{\delta_6 + \delta_{M}}.$$

Тогда отношение

$$\frac{E_{\mathbf{M}}}{E_{6}} = \frac{\epsilon_{6} \left(1 + \frac{\delta_{\mathbf{M}}}{\delta_{6}}\right)}{\epsilon_{\mathbf{M}} + \epsilon_{6} \frac{\delta_{\mathbf{M}}}{\delta_{6}}}.$$
(7-6)

В разнообразных изоляционных конструкциях отношение $\delta_{\rm M}/\delta_6$ остается примерно постоянным ($\delta_{\rm M}/\delta_6 \approx 1 \div 1,7$). Из выражения (7-6) следует, что при постоянстве $\delta_{\rm M}/\delta_6$ неизменно и отношение $E_{\rm M}/E_{\rm cp}$. С другой стороны, при уменьшении $\delta_{\rm M}$ пробивная напряженность масляных прослоек растет. Поэтому применение тонкослойной изоляции (на основе более тонкой бумаги) позволяет поднять критическую напряженность поля бумажно-масляной изоляции и осуществить изоляцию СВН при не слишком большой ее толщине. Типичная зависимость $E_{\rm mp}$ от тол-

щины бумаги показана на рис. 7-13. При очень малых об, когда бумага может содержать сквозные масляные каналы, напряженность $E_{\rm np}$ падает со снижением δ_6 . Отметим также, что с уменьшением δ_6 возрастает стоимость бумажно-масляной изоляции.

Увеличение плотности бумаги ведет к возрастанию ее электрической прочности; одновременно вследствие возрастания го повышается напряженность поля Ем в масляных прослойках. Плотность бумаги

ĸ8/.н.м



50 Enp 40 30 $\delta_{\bar{\delta}}$ 20 0.05 0.10 115 MM О

Рис. 7-12. Эквивалентная схема бумажно-масляной изоляции.

Рис. 7-13. Зависимость пробивной напряженности электрического поля для бумажно-масляной изоляции от толщины листа бумаги.

различно сказывается на кратковременной и длительной электрической прочности изоляции. С ростом плотности бумаги кратковременная прочность повышается, а длительная снижается.

7-8. ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПРОБОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В технической изоляции могут возникать газовые включения. В этих включениях напряженность поля возрастает (см. пример в § 2-3), электрическая же прочность газовой среды ниже прочности твердого



Рис. 7-14. Схема замещения изоляции с газовым включением на переменном напряжении.

диэлектрика. Поэтому в газовых включениях возникает нонизация, которая оказывает на окружающий диэлектрик электрическое, механическое и химическое воздействие. При неблагоприятных обстоятельствах в изоляции возникает медленное развитие дефекта, приводящее в конечном счете к пробою изоляции. Такой пробой называется ионизационным.

Особенности ионизационных про-

цессов удобно проследить по схеме замещения изоляции, показанной на рис. 7-14. Емкость газового включения С₁ соединена последовательно с емкостью, оставшейся под газовым пузырьком толщи диэлектрика С2; основная масса диэлектрика C_1C_2 - Разряд в газовом включении имитирован имеет емкость С≫ $\overline{C_1 + C_2}$

пробоем искрового промежутка ИП, включенного параллельно С1. В отсутствие пробоя ИП переменное напряжение U₀ распределяется обратно пропорционально С1 и С2. Синусоидальная кривая напряжения на емкости С1 показана на рис. 7-15 пунктиром. Пусть напряжение пробоя ИП (газового включения) равно Unp. В точке 1 происходит пробой $И\Pi$ и срез напряжения на емкости до некоторого малого остаточного напряжения, сливающегося на рис. 7-19 с нулевой линией. Но вследствие малого значения емкости C_2 мал и ток в $И\Pi$, и искра, не переходя в дуговой разряд сразу же гаснет. Начинается восстановление напряжения на емкости C_1 по кривой, эквидистантной пунктирной синусоиде. Как только напряжение на $И\Pi$ достигает $U_{\rm пр}$, вновь происходит его пробой, гашение искры, восстановление напряжения и т. д. Кривая напряжения на C_1 приобретает форму, показанную на рис. 7-15 сплошной линией.



Рис. 7-15. Кривая напряжения на емкости C₁ (газовом включении) в схеме на рис. 7-14. *1* – при отсутствии пробоя ИП; 2 – при пробое ИП.

При каждом срезе напряжения нейтрализуется заряд $\Delta Q = C_1 U_{np}$. Это приводит к скачкообразным снижениям напряжения на емкости C, равным

$$\Delta U = \frac{C_2}{C + C_2} U_{\pi\nu} \approx \frac{C_2}{C_0} \cdot \frac{\Delta Q}{C_1}, \qquad (7-7)$$

где C₀ — общая емкость диэлектрика, приближенно равная C+C₂.

Так как величины C₁ и C₂ неизвестны, для характеристики процесса удобно ввести величину кажущейся интенсивности ионизации

$$\Delta Q_0 = \Delta Q \, \frac{C_3}{C_1}.\tag{7-8}$$

Используя эту величину, из формулы (7-7) находим:

$$\Delta Q_{\mathbf{0}} = C_{\mathbf{0}} \Delta U_{\mathbf{0}}. \tag{7-9}$$

Измеряя ΔU_0 , можно определить и значение ΔQ_0 .

Как видно из кривой на рис. 7-19, серия разрядов в воздушном включении повторяется каждые полпериода. Следовательно, число их пропорционально частоте приложенного напряжения. С увеличением амплитуды приложенного напряжения число разрядов за полупериод возрастает.

Проследим теперь за дальнейшим развитием процесса. Нейтрализация заряда ΔQ связана с рассенванием энергии $\frac{l}{2}C_1\Delta Q$, переходящей в тепло. В твердой синтетической изоляции, например полиэтилене или полистироле, возникает микроскопическая эрозия материала, расширяющая объем газового включения. Постепенно возникает канал, по мере удлинения которого рассеиваемая энергия возрастает, способствуя еще большей скорости эрозии материала. Под действием высокой температуры в канале часто образуются вещества типа смолы; зачастую при этом канал обуглероживается и становится проводящим. В этих случаях разряды прекращаются, но возникает новая — электрическая или тепловая форма пробоя. Ионизационный пробой характерен для бумажно-масляной и масляно-барьерной изоляции. Газовые включения в изоляции могут находиться там с момента изготовления конструкции или появиться вследствие нагрева остаточной влаги или других примесей. Тепло, выделяющееся в газовом включении при разряде, вызывает разложение масла и образование новых пузырьков газа (водорода). Микроскопические исследования показали, что этот процесс имеет характер кипения масла. По мере роста газовых пузырьков, вытесняющих масло,



Рис. 7-16. Ветвистый разряд на слоях бумаги.

растут и ионизационные процессы, пока продукты разложения жидкой и твердой фаз изоляции не заполнят образующиеся газовые включения. В твердой изоляции возникают каналы, заполненные смолистыми веществами с низкими изоляционными СВОЙствами, или обуглероженные каналы высокой проводимости. Высокие напряженности поля на конце этих каналов ведут к новому образованию газовых пузырьков и дальнейшему прорастанию разряда. Обычно возникают основной и побочные пути роста углеродистых дорожек, так что в целом разряд напоминает ствол дерева с ветвями. Поэтому такой разряд часто называют ветвистым. Фотография ветвистого разряда показана на рис. 7-16. Разряд развивается в течение многих дней и даже месяцев и лет.

Часто ветвистый разряд поражает лишь небольшой участок поверхности диэлектрика в изоляционной конструкции.

Ионизационный пробой обычно начинается в местах с наиболее высокой напряженностью поля. Особенно опасны тангенциальные составляющие поля вдоль слоев бумаги. Поэтому в изоляционных конструкциях стремятся избежать высоких тангенциальных составляющих.

Ионизационный пробой развивается во времени очень медленно. Поэтому наличие газовых включений практически не сказывается на прочности изоляции при импульсных воздействиях. Однако каждый импульс высокой амплитуды вызывает разряд в газовых включениях и оставляет хотя и малый, но необратимый след. По этой причине у ионизационного пробоя ярко выражен кумулятивный эффект: электрическая прочность существенно понижается при большом числе импульсных воздействий.

Характеристикой изоляции в отношении ионизационных явлений служит напряжение ионизации, т. е. такое приложение напряжения рабочей частоты, при котором в изоляции начинает возникать ионизация, обнаруживаемая с помощью специальных схем (см. § 8-7) Различают следующие ионизационные характеристики изоляции (согласно работам Г. С. Кучинского):

критическое напряжение ионизации U_{кр.и} — напряжение, при котором возникают разряды значительной интенсивности, способные вызвать ионизационный пробой изоляции за относительно короткий срок;

начальное напряжение ионизации U_{н.и} — наименьшее напряжение, при котором возникают слабые разряды, вызывающие ионизационное старение изоляции (см. § 7-12).

Испытательное напряжение изоляции не должно превышать критического напряжения ионизации; рабочее напряжение изоляции не должно превышать начального напряжения ионизации. Исключение могут составлять только локальные участки вблизи электродов с острыми краями, например на краях конденсаторных обкладок, где напряженность поля очень высока и начальная напряженность $U_{\rm н.и.}$ ниже $U_{\rm pa6}$.

В бумажно-масляной и масляно-барьерной изоляции повышение напряжений ионизации достигается тщательной очисткой масла, пропиткой твердой волокнистой изоляции под вакуумом и вакуумной сушкой изоляции, применением высококачественных волокнистых мате-

риалов (бумаги, картона, дерева и пр.), применением литых изделий из целлюлозы или пластмасс.

Изложенные выше особенности ионизационного пробоя относились к переменному напряжению или повторным импульсам. При постоянном напряжении ионизационные процессы в газовых включениях протекают иначе. Как было показано в § 2-7, распределение постоянного напряжения по элементам изоляции происходит в соответствии с проводимостями этих элементов. По-



Рис. 7-17. Схема замещения изоляции с газовым включением на постоянном напряжении.

этому схема замещения изоляции с газовыми включениями имеет вид, показанный на рис. 7-17. В этой схеме R_1 и R_2 — сопротивления изоляции газового включения и последовательно включенного участка здоровой изоляции, а R — сопротивление остальной массы изоляции.

В момент пробоя ИП напряжение на емкости C_2 (емкости газового включения) снижается до нуля, после чего искра с ИП гаснет. Восстановление напряжения на C_2 в схеме рис. 7-17 происходит с постоянной времени $T = R_9C_9$, где $R_9 = R_1 || R_2$ и $C_9 = C_1 || C_2$. Вследствие высоких значений R_9 T измеряется секундами или даже минутами. Поэтому повторные пробои газовых включений происходят редко. По этой причине на постоянном напряжении изоляционные конструкции допускают значительно большие рабочие напряженности поля, чем на переменном напряжении. Особенно это относится к бумажно-масляной изоляции.

7-9. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ

Пробивные напряжения обычно определяются на образцах, моделирующих реальные изоляционные конструкции. Как показывает опыт, величины пробивных напряжений (например, одноминутных) подвержены статистическому разбросу. Для определения интегральной кривой вероятности пробоя $P_{\rm up}{U}$ требуеся испытывать большое количество образцов, так как после пробоя образец уже непригоден для дальнейших испытаний. Как показывают эксперименты, кривая $P_{\rm up}{U}$ хорошо выражается нормальным законом (5-1).

В § 5-7 было показано, что с увеличением числа параллельно включенных объектов интегральная кривая вероятности разряда на них смещается в область меньших значений U. Это явление имеет практическое значение также для пробоя конденсаторов или кабелей, площадь изоляции которых весьма велика. Можно представить, что эта площадь состоит из большого числа параллельно включенных образцов. Поэтому для всей изоляционной конструкции следует считаться с возможностью снижения пробивного напряжения до $U_{59\%}$ —Зо, где $U_{50\%}$ —среднее пробивное напряжение единичного образца, а σ —стандарт распределения (абс. ед.).

7-10. СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

Термин «старение» используется для обозначения целого ряда медленных процессов, возникающих в изоляции в процессе ее эксплуатации. К этим процессам относятся общее изменение структуры изоляцки под действием высоких температур и высоких напряженностей поля, развитие местных дефектов в результате ионизационных процессов, поверхностных разрядов, электротепловых явлений. Сюда же относятся понижение электрической и механической прочности в результате растрескивания, увлажнения, загрязнения и прочих грубых дефектов. Процесс разрушения изоляции особенно ускоряется при увлажнении и высоких температурах. Так, например, увеличение содержания влаги в хлопчатобумажной изоляции с 0,5 до 1,1% сокращает срок службы изоляции в 6 раз.

Снижение электрической прочности в результате естественного старения происходит годами. Отразить это снижение в виде вольт-временных характеристик затруднительно вследствие трудности получения опытных точек. Поэтому на практике изоляционные материалы и изоляционные конструкции (обычно модели) испытываются на ускоренное старение путем воздействия более высоких температур и напряженностей поля. Нередко также опытные образцы помещают в ухудшенные внешние атмосферные условия. Это, в частности, особенно важно для изоляции, рассчитанной на работу в тропиках.

При постоянном высоком напряжении ионизационные и электротепловые явления выражены слабо, однако возникает новый вид старения изоляции — химическое старение. Сущность его заключается в том, что под действием постоянного высокого напряжения в диэлектриках возникают электролитические явления, которые постепенно приводят к химическому перерождению вещества диэлектрика, росту токов проводимости и в конечном счете к пробою диэлектрика (электрическому или тепловому). Электролиз возникает в веществах с повышенной ионной проводимостью. К таким веществам относятся стекло, бумажно-масляная изоляция. Химическое старение резко возрастает при увлажнении изоляции и загрязнении ее веществами ионного характера (битумные компаунды и др.).

К старению изоляции как на переменном, так и на постоянном напряжении не следует относиться фатально. Старение изоляции непосредственно зависит от качества изоляционных материалов, совершенства изоляционной конструкции и технологии ее изготовления, культуры эксплуатации. Наилучшие образцы изоляционных изделий работают без видимого старения и даже без капитальных ремонтов десятки лет.

Старение здоровой изоляции идет наиболее интенсивно под действием высоких температур. Поэтому за температурным режимом изоляции в эксплуатации необходимо устанавливать особое наблюдение. Этот вопрос подробно рассматривается в § 7-11. Старение трансформаторного масла задерживается присадкой специальных веществ — ингибиторов, устройством азотной защиты, устраняющей контакт масла с кислородом, систематической очисткой (регенерацией) масла.

7-11. РАСЧЕТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для изоляции класса А, имеющей наибольшее распространение в электрических машинах и аппаратах, зависимость среднего срока службы изоляции от температуры выражается, как показал Монтзингер, эмпирической формулой

$$\tau_{\vartheta} = \tau_{\vartheta_{\vartheta}} \cdot 2^{\frac{\vartheta_{\vartheta} - \vartheta}{\vartheta_{\vartheta}}}, \tag{7-10}$$

где т — срок службы изоляции при температуре 🕈 (°С), годы;

т_{е н} — нормированный срок службы изоляции при максимальной нор-

мированной температуре 🕁,

Δθ — постоянная, численно равная величине приращения θ, при корой срок службы τ_я изменяется вдвое.

Для изоляции класса А $\vartheta_{M} = 105^{\circ}$ С, $\tau_{105} \approx 7$ лет, а $\Delta \vartheta$ в среднем принимают равным 8°С (для различных видов изоляции класса А $\Delta \vartheta$ изменяется в пределах 5—12°С).

Логарифмируя (7-10), получаем:

$$\lg \tau_{\vartheta} - \lg \tau_{\vartheta_{\mathsf{M}}} = \frac{\lg 2}{\Delta \vartheta} (\vartheta_{\mathsf{M}} - \vartheta). \tag{7-10a}$$

Эта зависимость для $\tau_{\theta_{1}} = 7$ лет показана на рис. 7-18.

Резкая зависимость срока службы изоляции от температуры указывает на необходимость тщательного расчета тепловых режимов электрических машин и аппаратов.

С внедрением новых изоляционных материалов возникает необходимость в проверке формулы (7-10) в отношении как ее общей структуры, так и числовых значений ее параметров.

7-12. ОБОБЩЕННАЯ ВОЛЬТ-ВРЕМЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗОЛЯЦИИ

Соответственно различным формам пробоя изоляции можно построить ее обобщенную вольт-временную характеристику, охватывающую времена от микросекунд до многих лет. Такая характеристика



Рис. 7-18. Логарифм срока службы изоляции класса А в функции температуры.

для типовой масляно-барьерной или бумажно-масляной изоляции с примерным указанием диапазона времен приведена на рис. 7-19. Область / этой характеристики — это область импульсного электрического пробоя, для которого характерен подъем пробивного напряжения при предразрядных временах порядка микросекунд. При коммутационных импульсах длительностью в несколько миллисекунд (область *II*) пробивное напряжение составляет примерно 0,85 пробивного напряжения при грозовых импульсах 1,5/40 *мксек*. Относительно длительные повышения напряжения отражены в области *III*. В этой области, также характеризуемой электрической формой пробоя, наблюдается дальнейшее снижение пробивного напряжения. Область *IV* соответствует тепловому





пробою в твердой изоляции : пробою вследствие ориентации частиц примесей в маслянобарьерной изоляции. Область V — это область ионизационного пробоя при значительном развитии ионизационных процессов. В области VI наблюдается только общее старение изоляции, постепенно приводяк снижению электричещее ской прочности. На графике пунктиром показаны уровни критического и начального напряжений ионизации. Так как ионизация в конечном счете приводит к пробою изоляции,

то пунктирные прямые доводятся до пересечения с кривой пробивных напряжений. Значения $U_{исп}$ и $U_{раб}$ располагаются ниже $U_{кр.н}$ н $U_{н.n.}$

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Объясните протекание и укажите характерные признаки (зависимость от температуры, времени приложения напряжения): а) электрического пробоя, б) теплового пробоя.

2. Рассчитайте напряжение теплового пробоя цилиндрического конденсатора (проходного изолятора) с внешним и внутренним радиусами электродов $r_2=3,1$ см, $r_1==2,1$ см. Материал диэлектрика — бакелизированная бумага, обладающая внутренней теплопроводностью k=0,029 ${\it st/cm} \cdot ^{\circ}$ С. Угол диэлектрических потерь изоляции при $\vartheta=20^{\circ}$ С равен 1%. Изолятор используется в качестве проходного в трансформаторе с температурой верхних слоев масла, доходящей до 90°С. Коэффициент внешней теплопродности принять равным 0,017 ${\it st/cm^2} \cdot ^{\circ}$ С; температурный коэффициент a для tg ϑ равен 0,05; относительная диэлектрическая проницаемость бумаги 4,5.

Ответ: 53 кв.

3. Укажите отличительные признаки поверхностного газового разряда и поверхностного теплового разряда.

4. Какую опасность представляет проникновение влаги в изоляцию?

5. В схеме замещения на рис. 7-14 $C_1 = 5 n\phi$, $C_2 = 2 n\phi$, $C = 200 n\phi$. Напряжение ионизации воздушного включения $U_{\pi p} = 1 \kappa s$. Приложенное напряжение составляет 10 κs . Нарисуйте ход кривых напряжения на емкости C_1 и вычислите значения ΔU_0 н ΔQ_0 .

Ответ: 10 в и 0,002 мкк.

6. Опишите стадии развития ионизационного пробоя бумажно-масляной изоляции. 7. Максимальное рабочее (линейное) напряжение изоляции 110 кв равно 126 кв, испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты 200 кв_{действ}. Каких значений могут достигать начальное и критическое напряжения ионизации?

8. Какими конструктивными и технологическими средствами можно повысить напряжения ионизации бумажно-масляной и масляно-барьерной изоляции?

9. Рассчитайте срок службы изоляции класса А при температуре $\vartheta = 90^{\circ}$ С. Ответ: 25,6 года.

10. Нарисуйте обобщенную вольт-временную характеристику пробивной прочности изоляции и укажите особенности каждого вида пробоя с точки зрения времени разряда. Какой уровень относительно этой характеристики должны иметь значения $U_{\rm pa6}$ и $U_{\rm ncn}$?

Глава восьмая

контроль изоляции

8-1. НАЗНАЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

На заводах контроль изоляции производится при изготовлении и выпуске изделий с целью проверки качества промежуточных технологических операций и соответствия изоляционных характеристик изделий требованиям ГОСТ или заводским нормам. Часто на заводах измеряются изоляционные характеристики изделий, которые не нормированы, но важны в качестве исходных данных для последующего контроля за состоянием изоляционных конструкций. По мере расширения наших знаний о связи срока службы изоляции с теми или иными нзоляционными характеристиками последние могут включаться в нормы и даже ГОСТы.

Контроль изоляции в эксплутации, обозначаемый часто термином «профилактика изоляции», служит для выявления дефектов в изоляционных конструкциях и последующей их замены или восстановления на месте.

Развитие дефектов в изоляции большей частью связано с проникновением в нее влаги. Попадание влаги обычно связано с механическими повреждениями изоляционных конструкций и изменением температурных условий. Процесс образования дефекта и разрушения изоляции протекает вначале весьма медленно и только на последних стадиях имеет скачкообразный характер, заканчиваясь пробоем изоляции.

Технически правильная эксплуатация, предотвращающая вредные воздействия на изоляцию, служит обязательным условием надежной работы высоковольтного оборудования. Срок службы изоляции в существенной степени зависит от постановки эксплуатационного надзора и контроля за изоляцией. Профилактика изоляции является только одним из элементов этого контроля. В задачу профилактики входит также установление типичных для тех или иных изоляционных конструкций дефектов, разработка эффективных способов устранения этих дефектов и рекомендации по разработке рациональных изоляционных конструкций на заводах.

Все методы контроля изоляции можно разделить на разрушающие и неразрушающие. К первым принадлежит испытание повышенным напряжением, ко вторым — все остальные методы, которые проводятся без приложения к изоляции напряжений, способных привести к пробою. Но по этой же причине все неразрушающие испытания являются в известной мере косвенными.

Для выявления возникающих в изоляции дефектов разработаны и применяются следующие методы неразрушающих испытаний изоляции:

а) измерение сопротивления изоляции или измерение тока сквозной проводимости;

б) измерение угла диэлектрических потерь;

- в) измерение емкости;
- г) измерение распределения напряжения;
- д) измерение частичных разрядов в изоляции;

е) просвечивание рентгеновскими лучами или ультразвуком.

Вначале изучаются методы неразрушающих испытаний, а затем рассматриваются испытания повышенным напряжением.

8-2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Рассмотрим процессы, которые возникают в изоляции при приложении толчком постоянного напряжения U. За очень короткий промежуток времени, много меньший периода промышленной частоты, заряжается емкость, определяемая геометрическими размерами изоляционной конструкции и значением диэлектрической постоянной материала є, измеренной на высокой частоте. Эта емкость обозначается C_{∞} . Затем возникают поляризационные явления, которые ведут к дальнейшему накоплению заряда на емкости. Различают следующие виды поляризации: электронную, ионную, дипольную и межслоевую. Первые два вида



Рис. 8-1. Схемы возникновения дипольной (а) и межслоевой (б) поляризации.

(электронная и ионная поляризации) протекают за время порядка 10^{-12} сек и ниже и поэтому не проявляются даже при очень высоких частотах — порядка мегагерц. При промышленной частоте проявляется дипольная и межслоевая поляризация. Сущность дипольной поляризации заключается в ориентации дипольных молекул в направлении силовых линий электрического поля, как это показано на рис. 8-1, а. В результате этой ориентации на поверхности диэлектрика возникает избыточный заряд, который подтягивает на электроды заряд противоположного знака. Так как поворот дипольных молекул происходит в вязкой среде, то процесс поляризации происходит с запаздыванием. Внешне эффект поляризации проявляется в том, что после заряда емкости C_{∞} к электродам продолжает подтекать поляризационный ток. Ток спадает по экспоненциальному закону с постоянной времени T порядка миллисекунд. Дипольной поляризацией обладают дипольные диэлектрики, вода и спирты являются наиболее ярко выраженными их представителями.

Межслоевая поляризация обусловлена неоднородностью структуры изоляции. Представим, что в основное вещество диэлектрика вкраплены включения повышенной проводимостя. Тогда ток смещения в изоляции протекает частично по проводимостям включений (рис. 8-1,6). Поэтому при включении диэлектрика на постоянное напряжение U в токе позникает составляющая, обусловленная зарядом емкостей C через сопротивления r. Внешне этот процесс протекает аналогично дипольной поляризации — и в том и в другом случае поляризационный ток примерно следует экспоненциальному закону. Постоянная времени межслоевой поляризации лежит в широких пределах — от миллисекунд до десятков секунд и даже значительно бо́льших отрезков времени. В наших целях удобно виды поляризации разделить не по физическому признаку, а по значению постоянной времени T — на быструю и медленную поляризацию. Быстрая поляризация имеет T порядка миллисекунд, медленная — порядка секунд и выше.

Для обонх видов поляризаций можно ввести схему замещения изоляции, показанную на рис. 8-2. В этой схеме одна ветвь состоит из емкости C_{∞} , другая ветвь, содержащая емкость $C = C_0 - C_{\infty}$ и сопротивление *r*, отражает поляризационные процессы в изоляции. (Смысл индексов 0 и ∞ будет разъяснен в дальнейшем). Суммарная емкость схемы равна $C_{\infty} + (C_0 - C_{\infty}) = C_0$. Эта емкость определяет полный за-



Рис. 8-2. Схема замещения изоляции.

Рис. 8-3. Изменение во времени тока через изоляцию и ее сопротивления при включении на постоянное напряжение.

ряд, который может накопиться на электродах изоляционной конструкции после завершения поляризационных процессов. Кроме этих ветвей, в схему замещения включено также сопротивление изоляции R, обусловленное сквозными путями утечки в изоляции при образовании в изоляции сквозного мостика из частиц повышенной проводимости.

Если к схеме замещения на рис. 8-2 приложить толчком постоянное напряжение U, то ток в источнике будет иметь следующие составляющие, показанные на рис. 8-2: а) импульс тока i_{∞} заряда емкости C_{∞} ; б) поляризационный (или абсорбционный) ток $i_{abc} = \frac{U}{r} e^{-t/T}$,

изменяющийся с постоянной времени T, и в) ток сквозной проводимости $i_{np} = U/R$. На основе введенной схемы замещения можно рассмотреть многие из методов контроля изоляции.

Поляризационные явления, равно как и сквозные каналы повышенной проводимости, связаны в основном с увлажнением изоляции. Поэтому характеристики качества изоляции, основанные на схеме замещения по рис. 8-2, являются преимущественно показателями увлажненности изоляции.

8-3. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО ЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЮ ИЛИ ТОКУ ПРОВОДИМОСТИ

Измерение сопротивления изоляции обычно осуществляется стрелочными приборами, и, следовательно, на показание приборов влияют только процессы медленной поляризации. На рис. 8-3 пунктиром наВеличина *R* определяет, как указывалось, наличие сквозных проводящих путей в изоляции. Резкое падение *R* показывает на далеко зашедшее развитие дефекта в изоляции. Обычно суждение об изоляции составляется на основании сравнения с результатами предыдущих измерений *R* или заводских данных.

Изоляция может характеризоваться также поляризационным спадом тока или нарастанием сопротивления изоляции во времени. Это нарастание выражается отношением R_{t_s}/R_{t_1} , где R_{t_2} и R_{t_1} — сопротивления изоляции, измеренные при двух моментах времени t_2 и t_1 (обычно $t_2=60$ сек и $t_1=15$ сек). Чем больше изоляция содержит посторонних включений, в частности чем больше увлажнена изоляция, тем меньше отношение R_{60}/R_{15} .

Измерение сопротивления изоляции осуществляется мегомметрами, состоящими из маломощного генератора постоянного тока напряжением 0,5-2,5 кв (с ручным приводом) и стрелочного прибора.

8-4. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО УГЛУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Протекание через диэлектрик поляризационных токов ведет к пазогреву изоляции. Связанные с этим потери энергии называются диэлектрическими. Диэлектрические потери при промышленной частоте возникают в основном за счет явлений быстрой поляризации.

При приложении к схеме замещения изоляции (рис. 8-2) переменного напряжения установившийся ток поляризации будет протекать по ветви *rC* и *R*. Суммарный активный ток, протекающий в схеме, равен:

$$I_{a} = U\left[\frac{1}{R} + \omega C \frac{\omega T}{1 + (\omega T)^{2}}\right], \qquad (8-1)$$

где T = rC; $\omega = 314$ (при f = 50 ги).

Суммарный емкостный ток, протекающий в схеме, равен:

$$I_{c} = U \left[\omega C_{\infty} + \omega C \frac{1}{1 + (\omega^{T})^{2}} \right].$$
(8-2)

На рис. 8-4 построена векторная диаграмма токов I_a и I_c . Отношение $I_a/I_c = tg \delta$ служит для характеристики диэлектрических потерь в изоляции, которые равны

$$W = UI \cos \varphi \approx UI \operatorname{tg} \delta. \tag{8-3}$$

Так как угол δ мал, то tg $\delta \approx \delta$ и поэтому часто говорят об измерении не тангенса, а просто угла диэлектрических потерь.

Обычно ток сквозной проводимости U/R много меньше тока поляризации $U\omega C \frac{\omega T}{1 + (\omega T)^2}$.

Следовательно, измерением угла диэлектрических потерь в основном контролируется ветвь rC схемы замещения изоляции (рис. 8-2). Поэтому угол диэлектрических потерь является в первую очередь показателем наличия в изоляции посторонних включений, в частности увлажнения изоляции.

Полагая R = ∞, найдем из (8-1) и (8-2)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\left(\frac{C_{\bullet}}{C_{\infty}} - 1\right)\omega T}{\frac{C_{\bullet}}{C_{\infty}} + (\omega T)^{2}}.$$
(8-4)

Из этого выражения видно, что $\lg \delta$ не зависит от абсолютного значения емкости объекта, а только от отношения емкостей C_0/C_{∞} . Поэтому $\lg \delta$ служит универсальным показателем ка-

чества изоляции для объектов самой различной емкости, т. е. габаритов.

Абсолютное значение tg δ для объектов с небольшой емкостью (до 200-300 nф), например для вводов трансформаторов тока, может не только характеризовать общее состояние изоляции, но также отмечать развивающиеся местные дефекты. Предельные значения tg o для различного оборудования приведены в табл. 8-1. Для объектов с большей емкостью (например, для крупных генераторов, электродвигателей, трансформаторов, кабелей, конденсаторов и т. п.) значение диэлектрических потерь может указывать на такие дефекты в изоляции, как увлажнение, общее старение, разрушение и т. п., но не может выявлять местных дефектов изоляции, за исключением весьма развитых.



Рис. 8-4. Векторная диаграмма напряжения и тока в изоляции, находящейся под напряжением промышленной частоты.

По этой причине для индикации ветви *R* (рис. 8-2), обусловленной сквозными мостиками повышенной проводимости, т. е. обнаружения местных дефектов, лучше служит измерение сопротивления изоляции на постоянном токе.

Таблица 8-1

	tg à npu $t = 20^{\circ}$ C, %			
Вед езоляцие	при вводе в эксплуа- тацию	в эксплуатации		
Трансформаторы тока:				
бумажно-масляные	1,0-2,5	1,5-4,5		
бакелитово-бумажные	2,0-3,0	5,0-12,0		
Проходные изоляторы (вводы):				
бумажно-масляные	0,7—1,0	1,0-1,5		
масляно-барьерные	1,0-3,0	2,0-8,0		
бумажно-бакелитовые	2,0-3,0	5,0-12,0		
Конденсаторы бумажно-масляные	0,3—0,4	1,0		
Трансформаторы силовые до 110 кв	1,0-2,0	4,0—5,5		
Трансформаторы силовые 110 кв и выше	1,3	1,3—2,5		

Нормируемые предельные значения tg д изоляции в эксплуатации

Величины tg δ и сквозной проводимости R растут с возрастанием температуры. Особенно быстрый рост наблюдается при $t>40^{\circ}$ С. Поэтому нормируемые величины tg δ и R относят к определенной температуре, обычно 20° С. Измерение tg δ изоляции, а также емкости высоковольтного оборудования осуществляется высоковольтным мостом (Шеринга), принципиальная схема которого изображена на рис. 8-5 и 8-6. Мост состоит из высоковольтного эталонного конденсатора C_N , практически не имеющего потерь (диэлектрик — сжатый газ), переменного сопротивления R_3 и постоянного сопротивления R_4 , переменной емкости C_4 и нуль-индикатора U. Испытываемый объект изображен в виде емкости C_x . Питание моста осуществляется при помощи повысительного трансформатора.



Рис. 8-5. Принципиальная схема моста Шеринга при нормальной схеме измерения tg о и емкости изоляции C_x.

Так называемая нормальная схема измерения мостом Шеринга (рис. 8-5) применяется в случаях, когда испытываемая изоляция C_x может быть изолирована от земли. По нормальной схеме обычно выполняются измерения в лаборатории, а также измерения междуфазной изоляции. При нормальной схеме высокое напряжение от трансформатора *Tp* проводится к точке *A* моста, а точка *B* заземляется. При этом все части моста, в которых оператор выполняет переключения (R_3 , C_4 и *H*), находятся под низким напряжением. Защита оператора от высокого напряжения, появляющегося на элементах моста в случае пробоя испытываемой изоляции, обеспечивается защитными разрядниками *P*, включенными в точках *C* и *D* схемы. Для защиты от наводок, обусловленных паразитными емкостями схемы на высоковольтные цепи (см. стрелки на рис. 8-5), все части моста, находящиеся под низким напряжением, а также эталонный конденсатор укрыты заземленным

Для равновесия моста необходимо, чтобы ток эталонного конденсатора I_N , разветвляясь в точке C по ветвям R_4 и C_4 , создавал в этой точке напряжение U_4 , равное по величине и фазе напряжению $U_3 = I_x R_3$. Показателем равновесия моста является нулевое показание индикатора H. Равновесие моста достигается регулировкой сопротивления R_3 и емкости C_4 .

По значениям R₃, C₄ и R₄ в положении равновесия моста определяются искомые характеристики измеряемого объекта:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4; \ C_x = \frac{R_4}{R_z} C_N. \tag{8-5}$$

И

При частоте 50 гц, когда $\omega = 314$, удобно величину R_4 выбрать равной 1 000/ π или 10 000/ π , а C_4 выражать в микрофарадах. Тогда формула для tg δ упрощается и принимает вид:

tg
$$\delta = 0, 1C_4$$
 при $R_4 = \frac{1000}{\pi}$
tg $\delta = C_4$ при $R_4 = \frac{10000}{\pi}$. (8-5a)

При измерении tg δ и C_x оборудования с одним заземленным электродом используется перевернутая схема высоковольтного моста (рис. 8-6). Эта схема отличается от предыдущей тем, что высокое на-



Рис. 8-6. Принципиальная схема моста Шеринга при перевернутой схеме измерения tg о и емкости изоляции C_x.

пряжение подается к точке B моста, в то время как точка A заземляется. Таким образом, вся измерительная часть схемы оказывается под высоким напряжением, и регулирование R_3 , C_4 , а также чувствительности индикатора H должно осуществляться с помощью изолирующих ручек. В перевернутой схеме моста экранируется по-прежнему измерительная часть схемы и экран остается присоединенным к точке B. Экран отводит от измерительной части схемы паразитные емкостные токи по пути, указанному на рис. 8-6 стрелками.

Как видно из сравнения рис. 8-5 и 8-6, один и тот же мост путем перенесения заземления может быть использован как в нормальной, так и в перевернутой схемах.

Для измерения диэлектрических потерь и емкости высоковольтного оборудования в эксплуатационных условиях применяется малогабаритный мост типа МД-16. Рабочее напряжение этого моста лежит в пределах 5—10 кв.

8-5. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО ЕМКОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Емкость объекта при неизменной температуре и частоте есть величина постоянная. Поэтому скачкообразное изменение емкости свидетельствует о крупных дефектах в изоляции — появлении больших по Для оценки увлажненности изоляции крупных объектов (например, трансформаторов) используется зависимость емкости от частоты. Емкость C_{∞} , измеренная на частоте ω , для схемы на рис. 8-2 определяется соотношением

$$C_{\omega} = C_{\infty} + C \frac{1}{1 + (\omega T)^2}.$$
 (8-6)

Зависимость $C_{\omega} = f(\omega)$ приведена на рис. 8-7. При $\omega \to \infty$ емкость объекта минимальна и равна C_{∞} . При нулевой частоте емкость объекта максимальна и равна C_0 .

Чем больше изоляция содержит посторонних включений, в частности чем больше изоляция увлажнена, тем выше значение емкости C =





Рис. 8-7. Зависимость емкости изоляции от частоты приложенного напряжения.



 $=C_0-C_{\infty}$. С другой стороны, посторонние включения практически не влияют на емкость C_{∞} . Следовательно, измерение емкости объекта при двух (низкой и высокой) частотах f_1 и f_2 позволяет судить о наличии ь изоляции посторонних включений, в частности от увлажнения изоляции. Практически измерение емкости ведется на частотах $f_1=2$ ги и $f_2=50$ ги. Показателем качества изоляции служит отношение C_2/C_{50} . Чем это отношение меньше, тем изоляция доброкачественнее. Для сухой изоляции отношение $C_2/C_{50}=1,2\div1,3$. По мере увлажнения отношение C_2/C_{50} возрастает.

Для измерения отношения C_2/C_{50} используется прибор, принципиальная схема которого показана на рис. 8-8. В левом положении переключателя Π испытываемая изоляция C_x заряжается от источника постоянного напряжения U (порядка нескольких сотен вольт); в правом положении Π происходит разряд C_x на гальванометр G. Переключение происходит периодически с частотами $f_1=2$ ги и $f_2=50$ ги. Средний ток разряда емкости изоляции равен $i=qf=UC_{\omega}f$. При указанных двух частотах

$$\frac{i_2}{i_{50}} = \frac{C_2 \cdot 2}{C_{50} \cdot 50}.$$

Измеряя на гальванометре отношение токов, находят и отношение C_2/C_{50} . Для большей точности измерения применяется компенсационный метод измерения токов i_2 и i_{50} . Компенсация осуществляется от источника постоянного напряжения, питающего C_x . Указанный метод измерения получил название «емкость — частота».

Еще более прост метод измерения абсорбционной емкости, получивший название «емкость — время». В этом методе измеряются мгновенные значения емкостей изоляции через время ~ 1 мсек и время 0,5-1 сек после приложения зарядного напряжения или, наоборот, после разряда. В первом измерении определяется геометрическая емкость изоляции C_{∞} , во втором измерении измеряется емкость C_0 . Отношение

$$\frac{\Delta C}{C_{\infty}} = \frac{C_{\bullet} - C_{\infty}}{C_{\infty}}$$

служит характеристикой изоляции.

8-6. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ На элементах конструкции

В изоляционных конструкциях, состоящих из ряда элементов, например в гирляндах изоляторов, колонках опорных изоляторов и др. рабочее напряжение распределяется по емкостям элементов конструк-





ляторов. 1 — искровой промежуток; 2 — игольчатый электрод промежутка; 3 — плоский электрод промежутка; 4 щупы; 5 — конденсатор для ограничения тока замыкания; 6 — шкала; 7 — сторлка.

ции, а также частичным емкостям относительно земли и токоведущих частей (см. § 2-4).

При резком понижении сопротивления изоляции отдельных элементов распределение напряжения по всей конструкции будет искажено по сравнению с нормальным. Следовательно, измерение распределения напряжения по конструкции может быть использовано для выявления дефектных элементов. Для практического применения метода необходимо знать нормальное распределение напряжения по изоляционной конструкции в рабочем состоянии. Метод измерения распределения напряжения позволяет производить контроль за состоянием изоляции под рабочим напряжением. Измерение производится под рабочим напряжением с помощью измерительной штанги, принципиальная схема которой показана на рис. 8-9.

На электроды изолятора накладываются щупы, к которым подсоединен измерительный прибор или регулируемый «искровой» промежуток. Перенося щупы штанги с одного изолятора на другой, поочередно измеряют напряжения на изоляторах. Сравнение с нормальным распределением указывает на дефектные изоляторы.

8-7. ОБНАРУЖЕНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗОЛЯЦИИ

В § 7-9 было показано, что при развитии в изоляции понизационных процессов происходит дополнительное рассеивание энергии, связанное



Рис. 8-10. Зависимость tg δ изоляции от приложенного напряжения U (кривая ионизации).

с нейтрализацией зарядов на емкости газовых включений. По этой причине развитие ионизационных процессов должно повышать tg δ изоляции. Ионизационные процессы в изоляции могут быть обнаружены путем снятия зависимости tg δ от напряжения, приложенного к изоляции. Такая зависимость получила название кривой ионизации (рис. 8-10). В интервале $U < U_{\mu}$ tg δ остается практически неизменным. В точке A, называемой точкой ионизации, наблюдается излом кривой, и в дальнейшем tg δ резко возрастает с напряжением. Очевидно, что при напряжении U_{μ} в изоляции возникают ионизационные явления.

Другой метод обнаружения ионизационных процессов основан на непосредственном измерении частичных разрядов в газовых включе-

ниях. Как было показано в § 7-8, при возникновении в изоляции частичных разрядов в кривой напряжения появляются высокочастотные колебания с амплитудой ΔU_0 . Схема обнаружения и количественной оценки частичных разрядов показана на рис. 8-11. Индикатор частичных разрядов ИЧР подключен к испытываемому объекту через разделительную емкость $C_{\text{разд}}$, которая служит заграждающим фильтром



Рис. 8-11. Принципиальная схема измерения частичных разрядов в изоляции с помощью индикатора частичных разрядов.

для токов рабочей частоты. При возникновении частичных разрядов в C_x хаотические колебания напряжения на испытываемом объекте возбуж-

дают в ИЧР незатухающие периодические колебания с частотой, соответствующей собственному периоду колебаний контура $T = 2\pi V \overline{LC}$ (при $C \gg C_{\text{разд}}$). Частота настройки ИЧР обычно принимается порядка нескольких десятков килогерц. Амплитуда высокочастотных колебаний ΔU измеряется гальванометром Γ , включенным через усилитель и выпрямитель. По значению ΔU по формуле (7-9) определяется кажущаяся интенсивность ионизации.

Для обнаружения частичных разрядов можно использовать также высокочастотное электромагнитное поле, возбуждаемое ими в контуре, который образустся протяженными электродами изоляции. Например, для подвешенной на опоре гирлянды изоляторов такой контур образуется проводом линии и землей. Излучаемые этим контуром электромагнитные волны могут быть приняты антенной прибора, называемого дефектоскопом (рис. 8-12) и представляющего собой регенеративный приемник прямого усиления, на выход которого включен катодный вольтметр либо миллиамперметр. Частота настройки дефектоскопов обычно принимается в интервале 1-2 Мгц, в котором не работают ралностанции.

Частичные разряды создают в жидкой среде звуковые и ультразвуковые колебания. В настоящее время разрабатываются методы обнаружения частичных разрядов





в маслонаполненной аппаратуре (трансформаторы, конденсаторы) на основе звуковой дефектоскопии.

8-8. ИСПЫТАНИЕ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Испытание на переменном токе. Испытания повышенным напряжением производятся для проверки наличия необходимого запаса электрической прочности изоляции. Так как понижение электрической прочности вызывается, как правило, местными дефектами в изоляции, то испытание повышенным напряжением есть также способ обнаружения в изоляции местных дефектов. Испытание повышенным напряжением гарантирует также, что изоляция оборудования имеет нужный уровень прочности по отношению к перенапряжениям, возникающим в эксплуатации.

При выпуске изделий с завода испытание повышенным напряжением является основным видом испытания изоляции. Испытательные напряжения для разных типов оборудования определены действующими ГОСТ.

Испытательное напряжение должно прикладываться к изоляции в течение времени, достаточного для развития частичных разрядов или даже развития разряда до пробоя. Практика показала, что для этого достаточно приложение испытательного напряжения в течение 1 мин. Чрезмерно длительное приложение напряжения нежелательно, так как ведет к порче органической изоляции ионизационными процессами.

Изоляция считается выдержавшей испытание повышенным напряжением переменного тока, если в изоляции отсутствуют разряды, отмечаемые на слух или по колебаниям стрелки вольтметра, измеряющего напряжение в первичной цепи. После испытания повышенным напряжением изоляция не должна иметь местных нагревов. Для наиболее ответственного оборудования современная техника требует контроля с помощью ИЧР, причем испытательное напряжение должно быть ниже критического напряжения ионизации (см. § 7-3).

Испытание на постоянном напряжении. Испытание повышенным напряжением постоянного тока применяется для объектов большой емкости (например, кабелей), требующих при переменном токе слишком большой мощности испытательных трансформаторов.

При приложении выпрямленного напряжения в изоляции не протекают поляризационные токи и, следовательно, потери в изоляции малы. Отсутствие емкостного тока препятствует значительному развитию частичных разрядов в изоляции. Поэтому пробивное напряжение изоляции на выпрямленном токе существенно выше, чем на переменном. Коэффициент упрочнения изоляции достигает 3—4. В силу этого испытательные напряжения выпрямленного тока повышаются по сравнению с испытательными напряжениями переменного тока.

Коэффициент упрочнения для доброкачественной изоляции выше, чем для дефектной. Это обстоятельство делает испытание на выпрямленном напряжении избирательным к выявлению ряда возникающих в изоляции дефектов. В этом заключается существенное преимущество испытания изоляции выпрямленным напряжением. Кроме того, в этом испытании можно вести контроль за состоянием изоляции путем измерения токов проводимости.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. В чем назначение неразрушающих видов испытаний изоляции и испытаний повышенным напряжением? Какие мероприятия должны последовать после того, как изоляция забракована по результатам измерения tg o или другого показателя качества?

2. Измерения емкости изоляции на низкой и высокой частотах показали значения $C_0 = 1500 \ n\phi$, $C_{\infty} = 1000 \ n\phi$. При измерении на постоянном напряжении $U = 1000 \ s$ постоянная времени спада кривой тока абсорбции определена равной $T = 0,1 \ ce\kappa$, а установившийся ток проводимости равным 10 *мка*. По указанным данным определите параметры схемы замещения изоляции.

3. Для схемы замещения изоляции с параметрами, найденными в задаче 2, постройте кривые $C_{\omega} = f(\omega)$ и tg $\delta = f(\omega)$ в диапазоне частот $f_1 = \frac{1}{4} T$ и $f_2 = 4 T$.

4. Покажите характер изменения: а) емкости от частоты, б) емкости от температуры для доброкачественной и недоброкачественной изоляции.

5. Нарисуйте схему измерения частичных разрядов в изоляции и объясните ее действие. Какое влияние на результат измерения может оказать коронирование в подводящих проводах? Как устранить это влияние?

6. Сравните преимущества и недостатки испытаний повышенным напряжением переменного и постоянного тока.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Линии электропередачи разделяются на воздушные (ВЛ) и кабельные. У воздушных линий основной изоляцией служит атмосферный воздух, обладающий сравнительно низкой электрической прочностью. Поэтому изоляционные расстояния ВЛ высоки. На проводах линий при рабочем напряжении может возникать коронный разряд. В районах с загрязненной атмосферой изоляция ВЛ (гирлянд) существенно снижается и может быть перекрыта под воздействием рабочего напряжения.

Особенностью ВЛ является подверженность их грозовым разрядам, которые даже при надлежащей грозозащите ВЛ могут, с некоторой вероятностью, вызывать перекрытия изоляции. С другой стороны, разряды на изоляции ВЛ обычно не связаны с необратимыми поврежденнями изоляции и нормальная работа ВЛ легко восстанавливается автоматическим повторным включением.

Изоляция кабельных линий обладает высокой электрической прочностью, что позволяет выполнять эту изоляцию, и следовательно, сечение кабеля достаточно малыми для того, чтобы применение кабельных линий было экономически оправдано. Кабельные линии непосредственно не подвержены грозовым разрядам. Коронный разряд на кабельных линиях отсутствует. В то же время кабельная изоляция подвержена старению и механическим повреждениях, в результате которых возможны пробои изоляции на рабочем напряжении.

Из указанного краткого сопоставления следует специфика задач ТВН в отношении к линиям того и другого типа. Для ВЛ важное значение имеет изучение разрядных характеристик внешней изоляции при различных формах воздействующих напряжений (напряжение рабочей частоты, коммутационные и грозовые импульсы), изучение форм коронного, искрового и дугового разрядов на изоляции. Для кабельных линий основное значение наряду с изучением свойств изоляционных материалов и их электрической прочности приобретает изучение конструкций и технологии изоляции кабельных линий и методов их испытаний.

Глава девятая

ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

9-1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ЛИНИИ

Линии электропередачи монтируются на металлических, железобетонных, деревянных и смешанного типа опорах. В отношении изоляционных характеристик металлические и железобетонные опоры вполне равноценны, поэтому в дальнейшем под металлическими опорами будут подразумеваться также железобетонные. Линии СВН (330 кв и выше) строятся почти исключительно на металлических опорах. Для линий 110 кв и ниже также широко применяется дерево. Изоляция линий на деревянных опорах рассматривается в отдельном параграфе.



Рис. 9-1. Эскиз одноцепной линии на портальных опорах.

На линиях СВН наиболее распространены портальные опоры с горизонтальным расположением проводов. Схема расположения проводов и изоляции на опорах показана на рис. 9-1.



Рис. 9-2. Эскизы одностоечных опор одноцепной (a) и двухцепной (б) линии.

Изоляция на опорах состоит из гирлянд изоляторов, поддерживающих провода, и промежутков s₁ между проводами и телом опоры или оттяжками. В пролете изоляция определяется воздушными проме-
жутками s₂ между фазамн и s₃ между фазой и землей. Промежуток s₃ обычно минимален в середине пролета. Обычно на линиях с металлическими опорами подвешивается грозозащитный трос (его роль будет подробно рассмотрена во второй части учебника). Воздушный промежуток s₄ между проводом и тросом также определяет изоляцию линии. При этом в расчет принимается величина промежутка s₄ в середине пролета, где амплитуда атмосферных перенапряжений оказывается нанбольшей.

Выбор промежутков s_2 , s_3 и s_4 диктуется не только соображениями изоляции. Например, величина промежутка s_2 определяется также условиями безопасности при подъеме человека по стойке опоры для проведения ремонта под напряжением и условиями схлестывания проводов в пролете при несинхронном их качании. Промежутки s_4 между проводами и тросами (по вертикали) должны удовлетворять условиям изоляции, грозозащиты и, кроме того, иметь достаточную величину для предотвращения схлестывания проводов и тросов при сбросе гололеда и пляске проводов. Промежуток s_3 на линиях до 500 кв включительно выбирается с учетом возможного проезда транспорта под линией. Нормируемые ПУЭ минимальные значения промежутков s_2 , s_3 , s_4 установлены на основе длительного опыта эксплуатации линий.

Изоляция на опорах выбирается исходя из воздействующих напряжений. При выборе промежутка s_1 учитывается отклонение провода под действием ветра. Следует отметить, что выбор промежутка s_2 накладывает ограничение и на выбор s_1 , так как из рис. 9-1 следует, что $s_2=2s_1+2l_r\sin\beta+\Delta$, где l_r — длина гирлянды; β — угол ее отклонения ветром; Δ — толщина стойки опоры.

На линиях напряжением до 220 κ_B наиболее распространены одностоечные опоры с вертикальным расположением проводов (рис. 9-2). В этих случаях следует брать в расчет также изоляционные промежутки между проводом и нижней траверсой s_6 и габарит между проводами в пролете s_7 . Промежуток s_6 выбирается так же как и промежуток s_1 , исходя из воздействующих напряжений. Для промежутка s_7 ПУЭ устанавливает такие же минимальные значения, как и для промежутка провод — трос s_4 .

9-2. МАТЕРИАЛ И КОНСТРУКЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Материал, используемый для изготовления изоляторов, должен обладать высокой электрической и механической прочностью. Практически применяются два материала: электротехнический фарфор и закаленное стекло. Электротехнический фарфор обладает высокими изоляционными свойствами, механическая жё прочность фарфора зависит от вида деформации: фарфор допускает высокие нагрузки на сжатие, но недостаточно прочен при изгибающих и растягивающих нагрузках. За счет улучшения технологии изготовления фарфоровой массы (понижения щелочности, увеличения количества кварца, повышения дисперсности материалов) удается изготовлять высокопрочные фарфоровые изоляторы, обладающие повышенной электрической и механической прочностью.

Электротехническое стекло также обладает высокими изоляционными свойствами и в настоящее время успешно конкурирует с фарфором в качестве материала для изоляторов. Стекло, как и фарфор, обладает высокой прочностью на сжатие. Путем закалки можно существенно повысить также прочность стекла на изгиб и растяжение. При закалке изолятор нагревается до температуры 650—780°С (соответственно для щелочного и малощелочного стекла) и затем охлаждается в струе холодного воздуха. Верхние слои изолятора затвердевают быстрее, чем внутренние слои, которые, остывая, стремятся сократиться в объеме. В результате во внутренних слоях возникают растягивающие, а в наружных слоях — сжимающие упругие напряжения. Внешнюю нагрузку воспринимают наружные слои, в которых под действием растягивающей нагрузки происходит ослабление сжимающих напряжений, а под действием сжимающих нагрузок — усиление напряжений. В ре-



Рис. 9-3. Линейный штыревой изолятор на напряжение 10 кв.



Рис. 9-4. Линейный тарельчатый фарфоровый изолятор типа ПФЕ-4,5.

зультате прочность стекла на растяжение и изгиб резко повышается, а прочность на сжатие, достаточно высокая, незначительно понижается.

В конструктивном отношении линейные изоляторы подразделяются на штыревые и подвесные. Штыревые изоляторы обычно применяются на линиях до 10 кв и в более редких случаях на линиях 20—35 кв. Подвесные изоляторы обычно применяются на линиях 35 кв и выше и иногда на линиях более низкого напряжения.

Штыревые изоляторы. Конструкция штыревого изолятора на напряжение 6—10 кв показана на рис. 9-3. Изолятор навертывается В вертикальном положении на штырь или крюк, обмотанные паклей. Пакля пропитывается суриком, который, засыхая, прикреплению необходимую дает жесткость. Провод крепится в верхней или боковой борозде изолятора с помощью проволочной вязки.

Штыревые изоляторы выполняются с резко выступающими ребрами, обращенными книзу. Впадины между ребрами защищены от дождя, что повышает мокроразрядное напряжение изолятора.

Подвесные тарельчатые изоляторы. Типовая конструкция тарельчатых изоляторов с конусной головкой показана на рис. 9-4. Головка изолирующего тела («тарелки») изолятора армирована снаружи металлической шапкой. Изнутри в головку введен и закреплен стальной стержень, называемый пестиком. Для армировки шапки и пестика используется портландцемент высокого качества, имеющий температурный коэффициент расширения (ТКР), близкий к ТКР фарфора. Внутренняя и внешняя поверхности изоляционного корпуса глазурованы. С такой поверхностью цемент не схватывается, и возможны малые перемещения цементной массы в корпусе, предотвращающие опасные термомеханические напряжения в изоляторе при колебаниях температуры.

В рабочем состоянии к шапке и пестику изолятора приложена только растягивающая нагрузка. Под действием этой нагрузки шапка и пестик с прилегающей к ним цементной массой создают в нижних сечениях конусной головки изолятора сжимающие усилия. Так как фарфор воспринимает высокие нагрузки на сжатие, то тем самым обеспечиваются и высокие допустимые нагрузки на подвесные изоляторы данного типа.

Цементная масса после приложения нагрузки не должна заклиниваться в головке, что было бы опасно с точки зрения термомеханических напряжений. Для предотвращения такого заклинивания угол конусности головки должен быть до-

нусности толовки должен оыть достаточно велик для того, чтобы силы давления клина, преодолевая силы трения, возвращали стержень с цементной массой в исходное положение.

В последние годы широкое распространение находят изоляторы типа ПС из закаленного стекла (рис. 9-5). Изоляторы выпускаются малогабаритными, с меньшей конусностью головки, а следовательно, и с меньшим диаметром шапки, что улучшает их электрические характеристики. При малой конусности на изоляционный корпус воздействуют



Рис. 9-5. Линейный тарельчатый стеклянный изолятор типа ПС-4-5.

изгибающие усилия, допустимые благодаря высокой прочности закаленного стекла на разрыв. Производство стеклянных изоляторов может быть полностью механизировано и даже частично автоматизировано. Исходное сырье — дешево. Поэтому стеклянные изоляторы дешевле фарфоровых.

Тарельчатая конструкция подвесных изоляторов удлиняет путь поверхностного разряда, что ведет и к повышению сухо- и особенно мо-



Рис. 9-6. Подвесные изоляторы для районов интенсивного загрязнения. *а* – английский «противотуманный» изолятор: *б* – изолятор типа ПСГ.

кроразрядного напряжения. При вертикальном положении изолятора верхняя поверхность тарелки смачивается дождем, а нижняя остается сухой. Напряжение, приложенное под дождем, в основном падает на нижнюю сухую часть изолятора. Поэтому нижняя поверхность тарелки выполняется ребристой, а верхняя — гладкой.

В районах повышенного загрязнения атмосферы применяются изоляторы с увеличенной длиной пути утечки, защищенной от прямого увлажнения (рис. 9-6,*a*), либо с резко улучшенной способностью к самоочистке — типа ПСГ (рис. 9-6,*б*).

10*

Основные типы выпускаемых в СССР тарельчатых изоляторов и их характеристики приведены в табл. 9-1. Цифра в названии изолятора указывает его испытательную одночасовую электромеханическую на-

Таблица 9-1

Характеристика изолятора	Тиа изолятора	Высота h, см	Два- метр D, см	Эффективная Длена пути утечки ¹ ут. действ, <i>См</i>	Мокрораз- рядный градвент в гирлянде Емј., кв _{макс} /сж
Фарфоровый для районов полевого загрязнения	П-4,5 П-7 П-8,5 П-11	17 18,5 20,3 21,5	27 30 32 35	$ \begin{array}{c} 25 \\ 30 \\ 34 \\ 34 \\ 34 \end{array} \right\} $	2,95
То же с уменьшенной строительной высотой	ПМ-4,5 ПМ-8,5	14 18,5	27 31,5	$\left. \begin{smallmatrix} 25 \\ 34,5 \end{smallmatrix} \right\}$	3,50
Стеклянный для полевого загрязне- ния	ПС-4,5 ПС-8,5	13 15	25,5 29	$\left. \begin{smallmatrix} 25\\28\end{smallmatrix} \right\}$	3,70
То же для линий 750 <i>кв</i>	ЛС-30	21,5	32	37	2,8
Фарфоровый усовершенствованный для районов полевого загрязнения	ПФЕ-4,5 ПФЕ-11 ПФЕ-16	14 18,3 19,4	27 32 35	28 34 38	3,70 3,50 3,30
Стеклянный для загрязняемых рай- онов	ПСГ-4,5	13	25,5	29	4,0
Фарфоровый для загрязняемых рай- онов	H3-6	21,4	30	35	—
Стержневой фарфоровый	СП- <u>110</u> 4,5	127	7,5	185	3,60

Одиночные подвесные изоляторы применяются только на линиях до 10 кв включительно. На более высоких напряжениях подвесные изоляторы соединяются в гирлянды. Свойства гирлянд изоляторов будут рассмотрены в § 9-3.

На линиях передачи, особенно линиях СВН, изоляторы несут высокие механические нагрузки — от собственного веса провода и давления ветра на провод, покрытого гололедом, что ведет к изгибу гирлянды (в частности, при пляске проводов) и вращению пестика в теле изолятора. Под действием механических нагрузок в изоляторах невысокого качества могут возникать растрескивание изоляционного материала и пробой под шапкой. Такой изолятор, не держащий напряжения, называется нулевым. Когда в гирлянде появляется несколько нулевых изоляторов, то длина пути утечки существенно снижается и становится возможным перекрытие гирлянды под рабочим напряжением, особенно в периоды моросящих дождей.

На перекрытой гирлянде дуга короткого замыкания проходит через тело нулевых изоляторов и может вызвать полное разрушение изолирующего материала, в результате чего изолятор теряет свои механические свойства, гирлянда обрывается и провод падает на землю. Подобные аварии не возникают (во всяком случае часто) при высоких электромеханических свойствах изоляторов и их систематических профилактических испытаниях. Для изоляторов, предназначаемых для линий СВН, целесообразно в типовых испытаниях проверять способность

грузку в тоннах.

нулевого изолятора сохранять механическую прочность после протекания тока короткого замыкания.

Стержневые подвесные изоляторы. Такие изоляторы (рис. 9-7) представляют собой фарфоровый (или стеклянный) стержень с концентри-

ческими или винтовыми ребрами. Концы стержня имеют конусность, которая обеспечивает высокую механическую прочность заделки, аналогичной приведенной на рис. 9-4. Изоляторы с винтовыми ребрами технологичны в изготовлении и обладают способностью к самоочищению под дождем.

Стержневые изоляторы в одной единице предназначены на номинальное напряжение 35 и 110 кв. Это приводит к значительному сокращению длины и веса изоляции по сравнению с весом и длиной гирлянды тарельчатых изоляторов. Однако стержневые изоляторы более дороги и сложны в изготовлении. Поэтому стержневые изоляторы рекомендуются в ряде стран для участков ВЛ со стесненной трассой. В стержневых изоляторах совершенно исключена возможность 🖉 пробоя в толще фарфора между электродами, иногда наблюдаемая (особенно при воздействии крутых импульсных волн) у подвесных тарельчатых изоля-. торов. Вместе с тем существенным недостатком стержневых изоляторов является возможность их полного разрушения и падения провода при длительном воздействии дуги короткого замыкания.

За рубежом стержневые подвесные изоляторы применяются на линиях напряжением до 380 кв. При 🥸 напряжениях выше 110 кв необходимый уровень изоляции получают, сочленяя такие изоляторы в гирлянды. В районах с загрязненной атмосферой используют 🏻 стержневые изоляторы, имеющие при той же строительной высоте большее число ребер.

9-3. ГИРЛЯНДЫ ИЗОЛЯТОРОВ

Как уже указывалось, на линиях 35 *кв* и выше лодвесные изоляторы соединяются в гирлянды. Соединение осуществляется путем закладки пестика верхнего элемента в замковое отверстие шапки нижнего элемента. Строительная высота гирлянды

$$l_{\rm r} = hn$$
,

где h — строительная высота изолятора (табл. 9-1);

п — число элементов (изоляторов) в гирлянде. Благодаря шарнирному соединению изоляторов вся гирлянда приобретает гибкость, которая способствует снижению нагрузок на изоляторы при значительных ветровых отклонениях и обрывах проводов.

Гирлянды выполняются поддерживающими на промежуточных опорах и натяжными на анкерных, угловых и концевых опорах. В натяжных гирляндах изоляторы расположены горизонтально. При подвеске особо тяжелых проводов применяются сдвоенные или даже строенные гирлянды (в натяжных гирляндах — до четырех — шести параллельных цепей).

Гирлянду изоляторов можно представить в виде цепочки емкостей (рис. 9-8,а), в которой продольные емкости К имитируют емкость самих



напряжение

110 кв.

(9-1)



§ 9-3]

изоляторов, а емкости C' и C'' изображают емкости между шапкой каждого изолятора и металлическим телом опоры (землей) или проводом. Как было показано в § 2-4, напряжения ΔU на емкостях K (изоля-





и нормальное распределение напряжения; 2 — распределе ние напряжения при дефектном пятом изоляторе.

тивна конструкция, схематически показанная на рис. 9-9, б. В этой конструкции подтянутые к гирлянде расщепленные провода фазы играют роль защитной арматуры.

9-4. РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ И ПРИ КОММУТАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСАХ

Разрядные характеристики воздушных промежутков. В гл. 5 было показано, что воздушные промежутки в отношении их разрядных характеристик можно подразделить на две группы: промежутки с симметричными электродами типа стержень — стержень и промежутки с резко

распределяются торах) вдоль цепочки резко неравномерно. Наибольшие приходятся напряжения на элементы вблизи провода, далее напряжения резко спадают и вновь несколько повышаются вблизи опоры. Типовые графики $\Delta U_i = f(i)$, где i номер элемента, считая от провода, приведены на рис. 9-8, б. Высокие напряженности поля на изоляторах вблизи провода могут приводить к коронированию, вызывающему старение изоляционного тела изолятора и окислительные процессы на металлической арматуре. Опыт показал, что по указанной причине максимальное напряжение на изоляторе не должно превышать 25—30 кв. Для выравнивания кривой напряжения вдоль гирлянды и снижения напряжений на ближайших к проводу изоляторах на линиях 330—750 *кв* применяется защитная арматура, показанная на рис. 9-9,а. Ее применение приводит к увеличению емкостей между изоляторами и проводом, что эквивалентно выравниванию электрического поля вдоль гирлянды. Весьма эффекнесимметричными электродами типа стержень — плоскость. Разрядные характеристики этих промежутков являются предельными. На рис. 9-10 приведены разрядные характеристики типовых воздушных промежутков линий электропередачи при коммутационных импульсах. На опоре промежутком, определяющим уровень изоляции линии, является про-



межуток s₁ прэвод — стойка опоры при отклоненной под действием ветра гирлянде (см. рис. 9-1). У гирлянд СВН, снабженных защитной арматурой, промежуток s₁ образован арматурой и стойкой опоры или траверсой. Указанный промежуток по симметрии электродов занимает среднее положение между крайними типами стержень — стержень и стержень — плоскость. Поэтому кривая разрядных напряжений для



таких промежутков также занимает среднее положение (кривая 3 на рис. 9-10).

В пролете уровень изоляции линии определяется промежутками провод — провод s₂ и провод — земля s₃ (см. рис. 9-1). Промежуток провод — провод симметричен, и для него действительна кривая 1. Разрядное напряжение промежутка провод — земля определяется по кривой 4. При оценке необходимых в отношении уровня изоляции габаритов линии следует считаться с появлением в пролете возвышающихся предметов (комбайнов, автомашин и пр.). В качестве расчетного в этом случае принимается промежуток провод — стержень, возвышающийся над землей на 4 м (кривая 5).

Кривые $\overline{U}_{p} = f(s)$ на рис. 9-10 определяют 50%-ные разрядные напряжения при коммутационных импульсах, которые, как было установлено в гл. 5, близки к значениям разрядных напряжений на промышленной частоте. В то же время при коммутационных импульсах

GARA 2 GARA 2 GARA 2 GARA 2 GARA 2

Рис. 9-11. Возможные пути перекрытия гирлянды изоляторов.

же время при коммутационных импульсах наблюдается существенный разброс разрядных напряжений, вследствие которого с вероятностью порядка 0,025 можно ожидать снижения разрядных напряжений до 0,85 U_p .

Сухоразрядные и мокроразрядные характеристики гирлянд изоляторов. Для разряда по гирлянде могут быть намечены три возможных пути (рис. 9-11); путь вдоль всех изгибов фарфорового тела изоляторов 1, кратчайший путь между шапками изоляторов 2 и кратчайший для всей гирлянды путь 3. Направление развития канала разряда зависит, как отмечено в § 6-2, от предразрядного тока и частоты воздействующего напряжения.

На частотах порядка десятков и сотен герц и при сухой поверхности гирлянды разряд развивается только по путям 2 или 3 в зависимости от отношения длины пути утечки l_{yT} к высоте изолятора h. Опыт показал, что если $l_{yT}/h \ge 1,3$, разряд развивается на пути 3, т. е. целиком по воздуху. При меньшем отношении l_{yT}/h более слабым участком оказывается путь 2. При заданной длине гирлянды путь 3 соответствует максимально возможному сухоразрядному напряжению. Поэтому при конструнровании изоляторов стремятся соблюсти условие $l_{yT}/h \ge 1,3$ путем увеличения диаметра тарелки или, что более экономично, путем снижения диаметра шапки изолятора.

Условие *l*_{ут}/*h*≥1,3 соблюдается для современных изоляторов, поэтому сухоразрядное напряжение гирлянды практически полностью

определяется разрядным напряжением воздушного промежутка 3 и не зависит от типа изоляторов. Значения сухоразрядного напряжения гирлянд в зависимости от их строительной длины приведены на рис. 9-12. На опорах портального типа с большей площадью металлических конструкций разрядное напряжение гирлянд снижается. При наличии арматуры длина l_r берется равной промежутку в свету между арматурой и траверсой. Кривые на рис. 9-12 относятся к поддерживающим гирляндам. Разрядные напряжения натяжных гирлянд повышаются примерно на 10%.

При дожде путь разряда прилегает к поверхности фарфора значительно плотнее. На относительно коротких гирляндах разряд развивается по пути 1 (рис. 9-11); на более длинных гирляндах (110 кв и выше) он приближается к пути 2. Распределение напряжения по изоляторам при дожде почти равномерно, вследствие чего мокроразрядное напряжение гирлянды $U_{\rm MP}$ пропорционально числу изоляторов *n*:

$$U_{\rm MP} = E_{\rm MP} nh, \qquad (9-2)$$

где Е_{мр} — мокроразрядный градиент, усредненное значение которого указано в табл. 9-1.

Как видно из табл. 9-1, малогабаритные изоляторы обладают повышенным мокроразрядным градиентом. Это объясняется меньшими значениями токов утечки по водяной пленке. В § 6-3 было показано, что эта особенность ведет к повышению мокроразрядного напряжения изоляторов.

Указанные в табл. 9-1 значения мокроразрядного градиента соответствуют нормальному атмосферному давлению и стандартным условиям дождевания. При отличии давления от стандартного осуществляется пересчет по формуле (6-4). Влияние интенсивности и в электропроводности дождя было рассмотрено в § 6-6.

При горизонтальном положении, характерном для натяжных гирлянд, водяная пленка равномерно покрывает всю поверхность тарелки изолятора. Это приводит к повышению мокроразрядного напряжения примерно на 10% по сравнению с напряжением в поддерживающей гирлянде.

При воздействии коммутационных импульсов сухоразрядное напряжение гирлянд практически не отличается от измеренного на промышленной частоте, лишь у длинных гирлянд отмечено небольшое увеличение U_{cp}. Мокроразрядное же напряжение на ком-



Рис. 9-12. Сухоразрядные напряжения поддерживающих гирлянд изоляторов в функции строительной длины.

1 — гирлянды без защитной арматуры ВЛ до 220 кв; 2 — гирлянды с защитной арматурой ВЛ 330—750 кв.

мутационных волнах может заметно превышать определенное на промышленной частоте. Значение коэффициента импульса для гирлянд под дождем вычисляется по формуле (6-3).

9-5. РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕИНОЙ ИЗОЛЯЦИИ При грозовых импульсах

Импульсную прочность воздушных промежутков на линиях электропередачи вычисляют по кривым разрядных напряжений промежутков стержень — стержень либо стержень — плоскость, приведенным на рис. 5-9. При этом промежутки провод — опора, провод — земля уподобляют промежутку стержень — плоскость, а промежутки провод — провод, провод — трос — промежутку стержень — стержень.

При воздействии полной импульсной волны на гирлянду изоляторов канал перекрытия развивается по пути 3 (рис. 9-11). Поэтому тип изолятора оказывает незначительное влияние на величину 50%-ного импульсного разрядного напряжения, которое в основном определяется длиной гирлянды (рис. 9-13). При малых временах воздействия ($t_p \approx \approx 2 \ {\rm мксек}$ и менее) канал разряда развивается по путям 2 и 1, вследствие чего тип изолятора оказывает заметное влияние на разрядное напряжение гирлянды. Заметим, что перекрытие по пути 1 иногда удается обнаружить по характерным пятнам ожога всех изоляторов дугой, возникающей по следу импульсного перекрытия. Это наблюдение позволяет сделать вывод о грозовом перекрытии гирлянды при воздействии волны с крутым фронтом (малые t_p).

9-6. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАЗМЕРОВ ОПОРЫ

Давление ветра на провода линии вызывает отклонение гирлянды, вследствие которого провод приближается к стойке опоры. В результа-



Рис. 9-13. 50%-ные импульсные разрядные напряжения.

1. 2 — для гирлянд без защитной арматуры (при положительной и отрицательной полярности) для изоляторов типа П (кривая 1) и малогабаритных изоляторов типа ПМ, ПС, ПФЕ (кривая 2); 3, 4 для гирлянд с защитной арматурой с изоляторами всех типов при положительной полярности (кривая 3) и отрицательной полярности (кривая 4). те изоляционный промежуток s₁ (рис. 9-1) оказывается значительно меньше половины расстояния между фазами линии. Ветер оказывает, таким образом, существенное влияние на выбор междуфазного габарита опоры.

Давление ветра на провод зависит от его диаметра, наличия толщины стенки гололеда и И скорости ветра. Скорость ветра и гололедные отложения являются статистическими величинами, которые можно характеризовать кривыми распределения для каждого географического района. Имеющиеся сейчас сведения, однако, недостаточны для построения статистических характеристик этих факторов, вследствие чего учет совместного действия гололеда, ветра и возможных воздействий напряжения производится очень приближенно — на основе длительного успешного эксплуатационного опыта.

Максимальные измерения на линии скорости ветра могут, очевидно, сочетаться с длительным воздействием рабочего напряжения. Поэтому при определении размеров опоры по воздействию рабочего напряжения в качестве расчетной принимают так называемую максимальную скорость ветра $v_{\rm M}$, наблюдаемую на трассе линии с повторяемостью примерно 1 раз в 10 лет.

Ветер и коммутационное перенапряжение в сети являются независимыми статистическими событиями, и потому не следует принимать в расчет одновременность воздействия практически максимальных, так называемых расчетных внутренних перенапряжений (см. § 9-7) и максимальной скорости ветра. Более целесообразно в расчетах изоляции по коммутационным перенапряжениям расчетные внутренние перенапряжения сочетать со скоростью ветра порядка 0,4v_м.

При грозах скорость ветра обычно невелика. В качестве расчетной принимается скорость $v = 10 \ m/сек$.

9-7. ВЫБОР ИЗОЛЯЦИИ НА ЛИНИЯХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ

В настоящее время установилась практика выбора изоляции линий электропередачи по коммутационным перенапряжениям и максимальному рабочему напряжению. Необходимый уровень грозоупорности § 9.7]

линий устанавливается не путем усиления изоляции, а путем защиты линий хорошо заземленными тросами или другими мероприятиями, которые будут изучаться во второй части учебного пособия. Коммутационные перенапряжения U_к задаются расчетной крат-

Коммутационные перенапряжения U_k задаются расчетной кратностью k по отношению к амплитудному значению фазового рабочего напряжения U_{Φ} :

$$U_{\rm K} = k U_{\rm C}. \tag{9-3}$$

Кратность коммутационных перенапряжений зависит от режима нейтрали в системе, свойств электропередачи, в частности ее длины и резонансных характеристик, свойств выключателей, наличия реакторов и продольной компенсации, характеристик разрядников и других факторов. Процесс развития коммутационных перенапряжений и их ограничение будут подробно изучаться во второй части учебного пособия. Здесь же приведем лишь значения расчетных кратностей k для сетей разных напряжений:

при
$$U_{\rm H} = 35 \ \kappa s \ k = 3,5;$$
 при $U_{\rm H} = 110 - 220 \ \kappa s \ k = 3,0;$
при $U_{\rm H} = 330 \ \kappa s \ k = 2,7;$ при $U_{\rm H} = 500 \ \kappa s \ k = 2,5;$
при $U_{\rm H} = 750 \ \kappa s \ k = 2,1.$

При выборе линейной изоляции по коммутационным перенапряжениям используются средние разрядные характеристики изоляции, приведенные в § 9-4. Известно, что разряд при коммутационных импульсах имеет значительный статистический разброс, характеризуемый величиной σ . Поэтому вводится понятие о выдерживаемом напряжении, которое должно быть ниже нижнего предела кривой распределения разрядного напряжения. Количественно переход от $\overline{U}_{\rm p}$ к выдерживаемому напряжению осуществляется умножением $\overline{U}_{\rm p}$ на коэффициент $k_{\rm s} = 1 - 2\sigma \approx 0.85$.

В современной проектной практике используется следующая методика выбора линейной изоляции.

а) По значению U_{κ} определяют необходимое среднее мокроразрядное напряжение гирлянды U_{MD} :

$$U_{\rm Mp} = \frac{U_{\rm K}}{k_{\rm g} k_{\rm p} k_{\rm \chi} k_{\rm \chi}}, \qquad (9-4)$$

где k_p — поправка на возможное отличие давления от стандартного;

к₁ — поправка на возможную загрязненность поверхности изолятора и отличие электропроводности и интенсивности дождя от стандартных;

k — коэффициент импульса.

В проектных разработках обычно принимают $k_{\tau} = 1,1$. Величина k_{τ} определяется по формуле (6-3). В среднем можно принять следующие значения k_{τ} для различных номинальных напряжений ВЛ:

U _н , кв	110 — 154	220 330	5)0	75) в выше
k ₁	1,15	1,1	1,05	1

Величина k_p определяется по формуле (6-4а). В частности, для нанбольшей высоты 1 000 *м* над уровнем моря $k_p = 0.94$; для 500 *м* $k_p = 0.96$.

6) По значению U_{мр} с помощью формулы (9-2) определяют необходимое число изоляторов в гирлянде *n*. в) Для учета возможности образования в поддерживающей гирлянде дефектных (нулевых) изоляторов вычисленное значение n увеличивается на один элемент для линий 35—330 кв и на два элемента для линий 500—750 кв.

г) Найденное полное число изоляторов в гирлянде N проверяют на длину пути утечки при рабочем напряжении. Согласно соотношению



Рис. 9-14. Определение расстояния от точки крепления гирлянды до стойки опоры. *I* - положение гирлянды при скорости ветра *v*_M; 2 - то же при 0.4*v*_w; 3 - то же при *v*=10 *м*'с*e*. (6-5) необходимо, чтобы удовлетворялось неравенство

$$\frac{Nl_{y\tau}}{U_{\Phi}} \ge \lambda_{y\tau}. \tag{9-5}$$

Длина пути утечки изоляторов l_{yT} указана в табл. 11-1, а допустимые удельные длины λ_{yT} для разных районов загрязнения атмосферы приведены в табл. 6-1. Заметим, что в нормированных значениях λ_{yT} учтена возможность появления дефектного изолятора в гирлянде.

Если полученная удельная длина пути утечки будет незначительно уступать допустимой, число изоляторов N следует соответственно увеличить; если же отличие l_{yT} от λ_{yT} значительно, целесообразно перейти к использованию специальных грязестойких изоляторов, имеющих резко увеличенную длину пути утечки.

д) Определяется величина минимального изоляционного промежутка провод (либо арматура) — опора s₁, необходимая по условию воздействия рабочего напряжения. Для этого вычисляется расчетное значение среднего разрядного напряжения промежутка:

$$\boldsymbol{U}_{\mathbf{p}} = \frac{\boldsymbol{U}_{\mathbf{\phi}}}{\boldsymbol{k}_{\sigma}\delta/K} \tag{9-6}$$

где δ/K — поправка на отличие плотности и влажности воздуха от стандартных. Величина δ/K принимается по данным рис. 6-5 для вероятности около 5%. В частности, для высоты до 1 000 *м* над уровнем моря $\delta/K = 0.84$, для 500 *м* — 0.89.

По найденному значению $\overline{U}_{\mathcal{V}_{n}}$ и кривой на рис. 9-10 вычисляется необходимый изоляционный промежуток s_1 .

е) Определяется величина изоляционного промежутка s_1 , необходимая по условию воздействия коммутационных перенапряжений. Расчетное значение $\overline{U}_{p,\kappa}$ равно:

$$\overline{U}_{\mathbf{p},\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{k_{\sigma}\delta/K}.$$
(9-7)

По найденному значению U_{р.к} и кривой на рис. 9-10 определяется необходимый изоляционный промежуток s_{1к}.

ж) Осуществляется координация импульсной прочности промежутка провод — опора и гирлянды. В основу координации кладется требование об их импульсной равнопрочности. Импульсное 50%-ное разрядное напряжение выбранной гирлянды (с учетом всех изоляторов в гирлянде) определяется по рис. 9-13. По найденному значению разрядного напряжения и кривым на рис. 5-9 определяется необходимый изоляционный промежуток *s*_{1и}.

з) При отклоненных положениях гирлянды, соответствующих скоростям ветра $v_{\rm M}$, 0,4 $v_{\rm M}$ и 10 *м/сек*, вычерчиваются изоляционные зоны радиусом, соответственно равным s_1 , $s_{1\kappa}$, s_{1w} (см. § 9-6). С помощью этих зон устанавливается необходимое расстояние от точки подвеса гирлянды до стойки опоры, как это показано на рис. 9-14.

и) Найденное по п. «з» расстояние между фазами сравнивается с нормируемым ПУЭ по условию сближения проводов в пролете (s₂ является функцией длины пролета), и в качестве окончательного значения принимается наибольшая величина.

Пример 9-1. По описанной методике рассчитать изоляцию линии 330 ка на железобетонной опоре с оттяжками. Предполагается применить гирлянды изоляторов П-8,5. Район загрязнения — первый. Высота трассы до 1 000 ж над уровнем моря.

 По формуле (9-3) определяем расчетное значение коммутационных перенапряжений:

$$U_{\rm K} = k U_{\Phi} = 2.7 \cdot \frac{363 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 800 \ \kappa \theta_{\rm MaKc}.$$

2) По формуле (9-4) находим среднее мокроразрядное напряжение гирлянды (для ВЛ 330 кв k_x = 1,1):

$$U_{\rm MP} = \frac{800}{0,85\cdot0,94\cdot1,1\cdot1,1} = 825 \ \kappa_{\beta_{\rm MBKC}}.$$

3) Используя данные табл. 9-1, с помощью формулы (9-2) определяем необходимое число изоляторов П-8,5 в гирлянде 330 кв:

$$n = \frac{825}{2,95 \cdot 20,3} = 13,7 \approx 14$$
 mt.

 Прибавив один запасной элемент, определяем полное число изоляторов П-8,5 в поддерживающей и натяжной гирлянде:

$$N = n + 1 = 15$$
 mT.

5) Вычисленное число изоляторов N проверяем на достаточность обеспечиваемой им удельной длины пути утечки:

$$\frac{Nl_{yT}}{U_{\phi}} = \frac{15 \cdot 34, 5}{\sqrt{3}} = 2,45 \ \text{CM}, \text{KB}_{\text{def}CTB},$$

что превышает норматив, установленный для первого района и приведенный в табл. 6-1 (2,25 см/квдейств).

6) По формулам (9-5) и (9-6) определяем расчетные значения разрядных напря жений, необходимые для определения промежутков s1 и s1к:

$$\overline{U}_{p,\star} = \frac{U_{\phi}}{k_{s}\delta_{k}k} = \frac{\frac{363 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{3}}{0.85 \cdot 0.84}} = 415 \text{ kG}_{\text{make}};$$

$$\overline{U}_{p,\star} = \frac{U_{\kappa}}{k_{s}\delta/k} = \frac{800}{0.85 \cdot 0.84} = 1.120 \text{ kG}_{\text{make}}.$$

7) По кривой на рис. 9-10 для найденных U_p и $U_{p,\kappa}$ определяем величины изоляционных промежутков:

$$s_1 = 78 \ cm; \ s_{1R} = 220 \ cm.$$

8) Вычисляем по данным рис. 9-13 импульсную прочность выбранной гирлянды 15×П-8,5 ($l_2=15\cdot 20,3=3,04$ м), снабженной защитной арматурой,

после чего по кривой на рис. 5-8 определяем изоляционный промежуток:

 $s_{1H} = 268 \ CM.$

Последующий расчет, в ходе которого вычисляются углы отклонения гирлянды и строятся изоляционные зоны для s_{12} , s_{1R} и s_{1R} , как это показано на рис. 9-14, здесь не рассматривается.

Проведенные по описанной методике расчеты позволили дать в ПУЭ таблицу числа изоляторов в поддерживающих гирляндах для ранее наиболее распространенных типов изоляторов (табл. 9-2).

Таблица 9-2

Количество изоляторов в поддерживающих гирляндах ВЛ 'на металлических и железобетонных опорах (согласно ПУЭ)

Количество взоляторов, шт., при номинальном напряжении ВЛ, ко не менее					
33	0 50)				
15 10 14 14	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$				
19	9				
19	9 –				
	1 1 1				

Примечание. На ВЛ с деревянными опорами количество изоляторов в гирлянде принимается на один меньше, чем указано в таблице.

Соответственно длинам гирлянд и высоте подвеса проводов и другим изоляционным расстояниям выбираются размеры опор.

9-8. РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ НА ДЕРЕВЯННЫХ ОПОРАХ

В лесных районах страны, в частности в Сибири, линии до 220 кв включительно целесообразно строить на деревянных опорах, которые на 30—40% дешевле металлических и железобетонных. Для предотвращения загнивания стойки, траверсы и подножники опор подвергаются пропитки креозотом. Срок службы опор из хорошо пропитанной древесины достигает 20—40 лет. Деревянные опоры обычно выполняются П-образного типа, а на напряжение 35 кв и ниже — одностоечными.

Как показали исследования, дерево является диэлектриком, изоляционные свойства которого сильно зависят от его состояния (влажности и неравномерности ее распределения, наличия загнивания и трещин, режима увлажнения поверхности и т. д.). Следствием этой зависимости является значительный разброс результатов измерений, выполненных на различных образцах. Минимальные разрядные напряжения древесины наблюдаются при увлажнении ее дождем. Средний разрядный градиент по дереву при воздействии полной импульсной волны оценивается для сухой древесины примерно в 600 кв/м, для мокрой в 300 кв/м. Эти значения относятся к отрезкам траверс длиной до 2-3 м; для стоек опор длиной 10—12 м средний разрядный градиент снижается до 180 кв/м. При воздействии на находящуюся под ливневым дождем древесину коммутационных волн ($t_{\rm p} \approx 0,005$ сек) средний разрядный градиент оценивается в 150 комакс/м. При воздействии напряжения промышленной частоты в течение 1 сек величина мокроразрядного градиента может быть принята равной 110 кв_{макс}/м. Длительное воздействие значительного рабочего напряжения приводит к обугливанию и даже к возгоранию древесины, и, следовательно, такое воздействие недопустимо.

158

Распределение напряжения по комбинированной изоляции, образуемой гирляндой изоляторов и деревом, происходит согласно схемы на рис. 9-15, в которой гирлянда и траверса смещены эквивалентными сопротивлениями и емкостями. Поскольку емкости изоляторов и дерева невелики (соответственно ~ 100 $n\phi/\mu t$ и $4 n\phi/m$), а активное сопротивление под дождем относительно мало (соответственно 1—10 *Мом/шт* и 0,2—1 *Мом/m*), емкости схемы оказывают сильное влияние на распределение напряжения по комбинированной изоляции лишь при воздействии импульсных волн; при воздействии же коммутационных волн и особенно рабочего напряжения распределение напряжения по комбинированной изоляции определяется в основном активными сопротив-





Рис. 9-16. Графическое определение минимального импульсного напряжения комбинированной изоляции фарфор — дерево (при длине дерева до 3—4 м).

Рис. 9-15. Схема замещения комбинированной изоляции фарфор дерево.

1 — дерево и гирлянды подвесных изоляторов; 2 — дерево и штыревые изоляторы; 3 — дерево.

лениями. Неравномерное распределение напряжения между деревом и фарфором, обусловленное соотношением параметров схемы на рис. 9-15, приводит к каскадному характеру перекрытия комбинированной изоляции, причем первой перекрывается гирлянда. Вследствие каскадности перекрытия добавочная прочность, создаваемая древесиной в комбинированной изоляции, оказывается меньше электрической прочности самой древесины.

Импульсную прочность комбинированной изоляции фарфор — дерево рекомендуется оценивать на основе графического построения, представленного на рис. 9-16, где через $\overline{U}_{и,r}$ и $\overline{U}_{и,m}$ обозначены импульсные 50%-ные разрядные напряжения гирлянды подвесных изоляторов и штыревого изолятора. В тех случаях, когда импульсное разрядное напряжение в основном определяется прочностью фарфоровой изоляции, добавляемое деревом минимальное импульсное напряжение принимается равным 100 кв/м для штыревых изоляторов и 70 кв/м для гирлянд подвесных изоляторов, обладающих по сравнению со штыревыми изоляторами меньшей продольной емкостью. При больших длинах дерева импульсная прочность комбинированной изоляции определяется древесиной, исходя из градиента 300 кв/м.

Прочность комбинированной изоляции под дождем при воздействии коммутационных импульсов оценивается по формуле (предложенной В. С. Рашкесом)

$$U_{\rm Mp,R} = ak_z U_{\rm Mp}, \tag{9-8}$$

где $U_{\rm мp}$ — мокроразрядное напряжение гирлянды;

- *k*. коэффициент импульса, определяемый по формуле (6-3);
- а коэффиицент, учитывающий влияние дерева. Для линий 35-110 кв коэффициент а можно принять равным 1,2-1,25.

Пример 9-2. Оценить разрядное напряжение изоляции линии 110 кв на типовых П-образных деревянных опорах под тросом при воздействии коммутационных и атмосферных перенапряжений.

 Изоляция фазы на деревянной опоре под тросом образуется гирляндой изо-ляторов 6×П-4,5 (из которых один запасной) и отрезком траверсы длиной 2 м между гирляндой и стойкой опоры, по которой проходит заземляющий трососпуск.

Исключая из расчета запасной изолятор, имеем n=5 шт. 2) По формуле (9-2) и данным табл. 9-1 определяем мокроразрядное напряжение промышленной частоты для гирлянды 5×П-4,5:

$$U_{\rm Mp} = E_{\rm Mp} nh = 2,95 \cdot 5 \cdot 17 = 251 \ \kappa B_{\rm MBRC}.$$

3) По формуле (6-3) вычисляем коэффициент импульса гирлянды k, при коммутационных перенапряжениях:

$$k_{\tau} = 1 + \frac{\frac{U_{cp}}{U_{Mp}} - 1}{2} = 1 + \frac{\frac{451}{251} - 1}{2} = 1, 4.$$

4) По найденным значениям U_{мp}, τ и α определяем разрядное напряжение комбинированной изоляции под дождем при воздействии коммутационных перенапряжений:

$$\vec{U}_{MP,K} = \alpha k_x U_{MP} = 1.25 \cdot 1.4 \cdot 251 = 440 \ \kappa s_{MAKC}$$

5) При оценке импульсной прочности гирлянды возможность образования в ней дефектного изолятора не учитывается. По рис. 9-13 находим минимальное импульсное разрядное напряжение гирлянды $(l_r=6\cdot 17=102\ cm)$: $\overline{U}_{r.H}=640\ \kappa a$.

6) В соответствии с рис. 9-16 вычисляем минимальное импульсное разрядное напряжение комбинированной изоляции:

$$\vec{U}_{\rm H} = 640 + 70 \cdot 2 = 780 \ \kappa s.$$

Практические расчеты длин гирлянд на деревянных опорах по условиям воздействия коммутационных и атмосферных перенапряжений показали, что при сохранении изоляционной прочности, установленной для металлических опор, число изоляторов в гирляндах деревянных опор может быть уменьшено на один (а в некоторых случаях даже на два) по сравнению с нормативами табл. 9-2. Этот вывод согласуется с успешной эксплуатационной практикой в сетях 35-220 кв.

9-9. МЕТОДЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ ИЗОЛЯЦИИ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Уже при изучении разряда в воздушных промежутках было отмечено, что разрядные напряжения подчиняются статистическим (вероятностным) функциям распределения. Аналогичные функции устанавливаются для всех статистических величин — амплитуд грозовых и внутренних перенапряжений, скоростей и направлений (по отношению к линии) ветра, интенсивности дождей, интенсивности загрязнений и туманов, числа нулевых изоляторов в гирляндах. Для оценки вероятного числа перекрытий на линиях следует учитывать статистические функции распределения всех этих величин, причем не в отдельности, а в совокупности. Это очень сложная многомерная задача теории вероятности. Ее аналитическому разрешению посвящены работы Н. Н. Тихолеева (НИИПТ), Г. Н. Александрова (ЛПИ). В самой общей форме задача координации изоляции ВЛ решается для каждого района со сходными метеорологическими условиями путем использования метода статистических испытаний (Монте-Карло). В это же решение может быть включена технико-экономическая задача нахождения минимума расчетных затрат с учетом капитальных затрат на сооружение линии и стоимости недоотпущенной энергии и ремонтов в зависимости от изоляции линии. Этому минимуму и соответствует оптимальный вариант изоляции линии.

9-10. ИЗОЛЯЦИЯ ЛИНИИ 750 кв И ВЫШЕ

Освоение в 1965—1970 гг. электропередач номинального напряжения 750 кв и перспективы дальнейшего повышения напряжения поставили перед исследователями и проектировщиками новые задачи, связанные с особенностями разрядных напряжений больших промежутков. Уже отмечалось, что с физической природой искрового разряда в воздухе связано значительное падение средних разрядных градиентов при удлинении разрядных промежутков (рис. 9-10). Поэтому с ростом номинальных напряжений линий величины изоляционных промежутков s растут непропорционально. Возрастанию з можно препятствовать снижением кратности коммутационных перенапряжений $k = U_{\kappa}/U_{\Phi}$. На рис. 9-17 показаны эскизы современных опор ВЛ 500 и 750 кв и возможной конструкции опор ВЛ 1000 кв. Снижением кратности коммутационных перенапряжений k соответственно до 2,5, 2,1 и 1,8 удается ограничить рост габаритов опор примерно прямой пропорциональностью номинальному напряжению, несмотря на снижение разрядных градиентов с увеличением промежутков.



Рис. 9-17. Эскизы портальных опор на оттяжках на напряжения 500, 750 и 1 000 кв. Средняя фаза подвешена на V-образных гирляндах.

Второй путь снижения *s* заключается в симметрировании электродов, которое осуществляется естественным путем — по мере увеличения эквивалентного диаметра расщепленных проводов и возрастания размеров защитной арматуры провод, с одной стороны, и стойка или траверса опоры — с другой выравниваются в размерах. С этой точки зрения целесообразно выполнять опору из материалов высокой прочности, с тем чтобы уменьшить поперечное сечение ее конструкций.

Большие выгоды сулит изготовление изоляторов и деталей опор из новых изоляционных материалов. В Англии сооружена экспериментальная ВЛ 132 кв с палочными пластмассовыми изоляторами с сердечником из стекловолокна, обеспечивающим механическую прочность, и 11—641 с покрытием из эпоксидной смолы, стойким к атмосферным воздействиям. Аналогично выполнены и траверсы опор. Применение этих изоляторов позволяет существенно снизить габариты опор, особенно линий СВН.

Изоляционные характеристики линий 750 кв и выше имеют также другие особенности. Мокроразрядное напряжение $U_{\rm Mp}$ согласно формуле (9-3) растет пропорционально длине гирлянды *nh*. С другой стороны, сухоразрядные градиенты падают с увеличением длины гирлянды. При очень больших длинах кривые $U_{\rm cp}$ и $U_{\rm Mp}$ пересекаются и разряд развивается по пути с более низким $U_{\rm p}$, т. е. по воздуху. Сказанное иллюстрируется двумя фотографиями разряда, приведенными на рис. 9-18.



Рис. 9-18. Разряд под дождем по гирлянде. $a \rightarrow на$ 30 изоляторов П-8,5 ($U_{MD} < U_{CD}$); $6 \rightarrow на$ 30 изоляторов ПМ-4,5 ($U_{MD} < U_{CD}$).

На линиях СВН целесообразна V-образная подвеска гирлянд, особенно на средней фазе (рис. 9-17). Такая подвеска позволяет сократить междуфазные расстояния и, следовательно, дает экономию в весе опор. Кроме того, при V-образной подвеске выравнивается распределение напряжения по гриляндам, что позволяет не применять защитную арматуру. Разрядное напряжение изоляции при коммутационных импульсах повышается на 10—15%; разряд происходит не по гирлянде, а в промежутке провод — траверса.

На линиях 750 кв и выше большое значение приобретает выбор изоляционного промежутка s₃ провод — земля в середине пролета. Промежуток s₃ существенно несимметричен, и поэтому с его ростом разрядные градиенты резко падают. Это приводит к необходимости выбора промежутка s₃ на линиях 750 кв и выше по кратностям коммутационных перенапряжений. С учетом разброса величин разрядных напряжений зона возможного перекрытия промежутка s₃ охватывает примерно ²/₃ длины пролета.

На рис. 9-19 показана фотография искрового разряда с провода на землю, снятая на опытном пролете ЛПИ.



Рис. 9-19. Фотография перекрытий промежутка провод — земля (s₃=8 м) при четырех последовательных приложениях напряжения.

9-11. ИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ОПОР

На протяженных переходах через реки, карьеры и т. п. устанавливаются высокие, так называемые переходные опоры. Изоляция этих опор выбирается по особым условиям. На высоких опорах определяющую роль начинают играть грозовые перенапряжения, амплитуда которых растет с повышением высоты опор. По этой причине на переходных опорах высотой более 40 м количество подвесных изоляторов в гирлянде следует (согласно ПУЭ) увеличивать на 1 изолятор на каждые 10 м высоты опоры сверх 40 м. При этом предполагается, что на линии подвешены грозозащитные тросы. Повышенные грозовые перенапряжения, большие длины гирлянд ведут к существенному росту воздушных промежутков s₁.

Альтернативой усилению изоляции переходных опор является защита этой изоляции разрядниками.

9-12. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЛИНИЯ

В эксплуатации проверяется электрическая прочность изоляторов гирлянд. Проверка осуществляется по кривым распределения напряжения по изоляторам (см. рис. 9-8), которые снимаются с помощью измерительной штанги; описание такой штанги было дано в § 8-6. Возможно также использование упрощенной штанги, определяющей только наличие нулевых изоляторов в гирлянде.

При пробое подвесных изоляторов из закаленного стекла равновесие внутренних сил в стекле нарушается и стеклянная тарелка изолятора рассыпается. Остатки стекла, заклиненные между шапкой и 11* пестиком, не позволяют пестику выйти из шапки и тем удерживают провод от падения на землю. Механическая прочность остатка оказывается достаточной для нормальных эксплуатационных нагрузок. Поскольку разрушение тарелки изолятора легко обнаруживается осмотром с земли, измерения штангой на стеклянных изоляторах не нужны.

Стержневые изоляторы с большой толщей фарфора (или стекла) между электродами не могут быть пробиты, и потому измерения с помощью штанги для них также излишни.

Дефектные нулевые изоляторы заменяются при первом же плановом отключении линии. Разработаны также методы смены изоляторов под рабочим напряжением. Эти методы используются, в частности, в случае обнаружения в одной гирлянде нескольких дефектных изоляторов.

Располагая данными отбраковки изоляторов за полный цикл профилактических испытаний, например Т лет, можно оценить вероятность появления (в течение Т лет) в гирляндах линии 1, 2, 3, 4 ... нулевых изоляторов. Пусть из общего числа т замеренных изоляторов п изоляторов оказались дефектными (нулевыми). Тогда вероятность повреждения одного изолятора *p*=*n/m*. Вероятность появления в гирлянде, состоящей из \$ изоляторов, r дефектных изоляторов равна (по выводу Н. Н. Тиходеева):

$$p_r = C_{\bullet}^r p^r (1 - p)^{s - r}, \tag{9-9}$$

гле

$$C_{\bullet}^{r} = \frac{s!}{r! (s-r)!},$$

а число таких гирлянд с r дефектными изоляторами на линии, содержащей всего h гирлянд, равно

$$h_r = h p_r. \tag{9-10}$$

Пример 9-3. На линии 500 кв. содержащей 3 000 гирлянд с 20 изоляторами в гирлянде, данные испытаний в течение срока Т=3 года показывают примерно 1 800 нулевых изоляторов. Определять вероятное число гирлянд с 4 нулевыми изоляторами.

Вероятность

$$p = \frac{1\,800}{20\cdot 3\,000} \approx 0.03.$$

По формуле (9-9) находим

$$p_r = C_{20}^4 \cdot 0.03^4 (1 - 0.03)^{20-4} = 2 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятное число гирлянд с 4 изоляторами будет составлять

$$h_r = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 = 6.$$

Такие гирлянды могут быть перекрыты под рабочим напряжением. Следовательно, данные испытаний указывают на плохое качество изоляторов, не обеспечивающих надежную работу линии. В качестве первоочередного мероприятия следует сократить срок профилактических испытаний Т.

9-13. ИЗОЛЯЦИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Линии электропередачи постоянного тока предполагается строить на сверхвысокие напряжения ±750 кв и выше. При этих напряжениях изоляционная проблема является решающей при оценке экономической эффективности этих электропередач. Благодаря возможности сеточного регулирования внутренние перенапряжения в электропередачах постоян-

ного тока ограничиваются до (1,7-1,8) U_н. При таком глубоком ограничении перенапряжений выбор изоляции линий производится по рабочему напряжению. На ВЛ постоянного тока через изоляторы течет однонаправленный ток проводимости. В случае применения стеклянных изоляторов это ток ионной проводимости, разрушающий структуру стекла. Поэтому на ВЛ постоянного тока допускается применение лишь изоляторов из малощелочного стекла. На ВЛ ±750 кв с тяжелыми проводами возможно применение изоляторов типа ЛС-30, используемых на ВЛ переменного тока 750 кв. В § 6-10 было указано, что мокроразрядное напряжение гирлянд при постоянном напряжении примерно равно эффективному значению U_{мр} при переменном напряжении. Можно поэтому в первом приближении принять допустимые длины утечки изоляторов согласно табл. 6-1; расчет длины гирлянд производится по формуле (9-5).

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Опишите основные конструктивные особенности тарельчатых изоляторов. При изложении используйте рис. 9-4-9-6.

2. Составлены гирлянды из изоляторов типов П и ПМ. Какая из гирлянд имеет большее сухоразрядное, мокроразрядное и импульсное разрядные напряжения, если: а) в гирляндах равное число изоляторов? б) одинаковы длины гирлянд?

3. Укажите назначение и действие защитной арматуры на гирляндах. На каких линиях применяется защитная арматура?

4. Какое влияние на разрядные напряжения изоляции на опорах оказывают барометрическое давление, температура, дождь, влажность, загрязнения, ветер, гололед? 5. Рассчитайте, при каком числе изоляторов типа ПФЕ-4,5 сухоразрядное напря-

жение гирлянды начинает превышать мокроразрядное.

6. Изложите порядок расчета изоляции линий на металлических опорах.

7. Пользуясь описанной в § 9-7 методикой, выберите изоляцию линии 220 кв на металлических опорах. Линия проходит во II районе загрязнения; предполагается использовать изоляторы ПС-4,5.

8. Пользуясь сведениями § 9-7 и 9-8, определите необходимую длину гирлянды для линни 220 кв на П-образных деревянных опорах под тросом. Район загрязнения — I; изоляторы типа ПС-4,5; расстояние между фазами по дереву 5,2 м. Определите импульсное разрядное напряжение изоляции этой линии. 9. Определите допустимый изоляционный промежуток провод — земля на линии

750 кв при ограничении коммутационных перенапряжений до 2,1 U.

10. Нарисуйте схему измерительной штанги для контроля изоляторов на линии и опишите порядок проведения измерений.

Глава десятая

КОРОНА НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

10-1. КОРОННЫЕ ТОКИ НА ПРОВОДАХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

На проводах линий электропередачи переменного тока, особенно на линии СВН, может возникать коронный разряд. Корона на проводах при рабочем напряжении ведет к потерям энергии и длительным радиопомехам, а потому должна быть ограничена. При перенапряжениях корона снижает амплитуду волн и поэтому благоприятна.

Коронный разряд на проводах протекает в форме ионизационных процессов, рассмотренных в § 4-6. На рис. 10-1,а показаны кривые напряжения и тока, стекающего с коронирующего провода, а также стадии ионизации, соответствующие отдельным моментам времени на осциллограмме. На рис. 10-1,6 стилизованно показан коронный разряд в виде чехла, симметрично охватывающего провод.

[Гл. 10

В отсутствие короны ток, стекающий с провода, чисто емкостный, а следовательно, сдвинут по отношению к напряжению на угол $\pi/2$. Ток короны i_{κ} , связанный с перемещением объемного заряда в коронном чехле, накладывается на емкостный ток *ic*. Пачнем рассмотрение тока i_к с момента времени t₁, когда напряжение проходит через нуль и становится положительным, а ток іс проходит через максимум. Как будет показано далее, от предшествующего полупериода в коронном чехле остались отрицательные заряды (ноны). Под действием наположительного знака отрицательные ионы будут двипряження проводу. Это движение зарядов - есть ток конвекции гаться К a) ť.

6)

Рис. 10-1. Изменение напряжения и тока, стекающего с коронирующего провода, а также зарядов короиного чехла во времени.

положительного направления (за положительное направление принято считать направление движения положительных зарядов от провода или, что то же самое, отрицательных зарядов к проводу).

В некоторый момент времени t_2 напряженность поля на проводе достигает критического значения, при котором возникает вспышка коронного разряда положительной полярности. Образующиеся в лавинах коронного разряда электроны поглощаются проводом, что ведет к резкому подъему тока. По мере роста напряжения область ионизации расширяется и ток возрастает. При снижении напряжения некоторое время еще поддерживаются ионизация и поток электронов к проволу.

После прохождения максимума напряжения (в момент времени t₃) ионизация прекращается и ток короны поддерживается за счет движения положительных зарядов (ионов) от провода. Этот ток, очевидно, прекращается, когда напряжение достигает нуля и меняет свой знак. В этот момент провод окружен чехлом положительных зарядов.

Процесс при отрицательной полярности напряжения протекает аналогично. Вначале в момент 14 начинается перемещение положитель-

166

ных зарядов в коронном чехле, далее в момент t_5 возникает вспышка отрицательной короны. Вынос электронов из области ионизации создает скачок отрицательного тока. За моментом t_6 ионизация прекращается, а ток поддерживается движением положительных зарядов к проводу и отрицательных — от провода. К моменту перехода напряжения через нуль почти весь положительный заряд поглощен проводом и последний оказывается окруженным отрицательным зарядом, как это и предпо-

лагалось выше для момента t_1 . Суммарный заряд $q = \int_0^{\infty} i_{\rm K} dt$ за пе-

рнод близок к нулю. Лишь небольшая доля заряда в каждом из полупериодов не нейтрализуется, а уходит в междуэлектродное пространство.



Рис. 10-2. Разложение коронного тока (*i*_к) на активную составляющую *i*_{а.к}, емкостную составляющую *i*_{с.к} и третью гармонику *i*_{3.к}.

Разложив ток $i_{\rm K}$ на гармоники (рис. 10-2), можно найти, что корона создает гармонику $i_{\rm a.к.}$ совпадающую с напряжением, гармонику i_{CK} , совпадающую с емкостным током i_C , а также высшие гармонические, в первую очередь третью гармонику. Этот результат показывает, что коронирование ведет к потерям энергии, повышению емкости провода и появлению в системе высших гармонических.

Коронный разряд на проводах имеет характер непрерывно развивающихся и затухающих стримеров, с которыми связаны импульсы тока (см. § 4-7). Эти импульсы генерируют высокочастотные колебания на частотах 1—100 *Мгц*, которые распространяются вдоль проводов, тросов и опор и частично излучаются в окружающее пространство. Высокочастотное поле около коронирующей линии создает помехи для радиоприема, телевидения и в. ч. каналов связи. Поэтому коронирование на проводах должно быть ограничено до уровня, допускаемого по условиям радиопомех (под которыми понимаются все виды помех).

10-2. НАЧАЛЬНАЯ НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА. Общая и местная корона

Корона, охватывающая весь провод, появляется при некоторой начальной напряженности поля $E_{\rm m}$. Значение $E_{\rm m}$ определяется по сле-

дующей эмпирической формуле (Пика)

$$E_{\rm H} = 30, 3m\delta \left[1 + \frac{0.3}{\sqrt{r_0 \delta}} \right], \ \kappa B_{\rm MaKC}/cM, \tag{10-1}$$

где r₀ — радиус провода, см;

- относительная плотность воздуха;
- *т* коэффициент негладкости, для витого провода принимаемый равным 0,82 (см. § 1-10); в горных условиях рекомендуется принимать *m*=0,7÷0,75.

С увеличением радиуса провода начальная напряженность снижается незначительно, что объясняется более медленным спадом напряженности вблизи провода большего сечения и соответственно более благоприятными условиями развития лавин. Для основных марок сталеалюминиевых проводов значения $E_{\rm H}$ при относительной плотности воздуха $\delta = 1$ лежат в узких пределах 30—32 кв_{макс}/см. Значение $E_{\rm H}$ сравнивается с максимальной напряженностью поля на поверхности проводов $E_{\rm N}$, которая вычисляется исходя из напряжения на линии и геометрического расположения проводов по формулам, приведенным в § 1-6—1-8. Если $E_{\rm M}$ оказывается бо́льшим $E_{\rm H}$, то на линии возникает, как говорят, о бщая корона. Следовательно, формула (10-1) определяет начальную напряженность общей короны. С общей короной связаны недопустимые высокие раднопомехи и потери энергии. Поэтому необходимо, чтобы напряженность $E_{\rm M}$ при наивысшем рабочем напряжении на линии была меньше $E_{\rm H}$. По существующим нормам максимальный градиент на проводах не должен превышать 0,9 $E_{\rm H}$.

На проводе с идеально отшлифованной поверхностью коронный разряд при $E < E_{\rm H}$ не возникает. Однако в действительности на поверхности проводов имеются царапины, заусеницы и загрязнения. Во время выпадения атмосферных осадков на поверхности проводов образуются местные неровности в виде капель дождя, кристалликов снега или изморози. Все эти неровности приводят к местным повышениям напряженности поля и местным очагам коронного разряда. Поэтому корона на проводах линий возникает и при $E < E_{\rm H}$, где $E_{\rm H}$ вычислена по формулам, предполагающим идеально отшлифованную поверхность проводов. Корона при $E < E_{\rm H}$ называется местной короной. Обычно при выборе проводов линий электропередачи допускается местная корона. Поэтому определение радиопомех и потерь на местную корону имеет большое значение.

10-3. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НА МЕСТНУЮ КОРОНУ

Основные данные для расчета потерь на местную корону находятся экспериментальным путем на опытных пролетах ВЛ, снабженных измерительной аппаратурой для измерения потерь. Такие опытные пролеты, сооружаемые в крупнейших лабораториях мира, имеются в СССР в лабораториях ТВН институтов ВНИИЭ (Москва), НИИПТ, ЛПИ (Ленинград), ВНИИКЭ (Ереван). Кроме того, проводятся измерения потерь на корону на действующих линиях с помощью антенных схем, разработанных в ЭНИН. На основании многолетних исследований предложено несколько вариантов методов расчета потерь на корону. Ниже излагается методика, предложенная канд. техн. наук Н. П. Емельяновым (ВНИИЭ).

Теоретический анализ показывает, что потери Р для одиночных проводов выражаются функциональной зависимостью

$$\frac{P}{\frac{2}{0}E} = F\left(\frac{E}{E_{\rm B}}\right),\tag{10-2}$$

где r₀ — радиус провода,

Е — напряженность на поверхности провода;

*Е*_н — начальная напряженность короны.

Обработка опытных данных, полученных на опытных пролетах ВНИИЭ и НИИПТ на проводах разных сечений, позволила найти форму функции F, а именно: была найдена приближенная зависимость

$$\frac{P}{r_0^2 E} = ae^{-b\left(\frac{E}{E_{\rm R}} - c\right)^2},$$
(10-3)

где a, b, c — эмпирические коэффициенты.

Для расщепленных проводов расчет усложняется вследствие не-симметрии поля около проводов в пучке. Как было показано в § 1-6, напряженность поля по периметру провода изменяется согласно формуле

$$E_{\theta} = E_{c_{\rm P}}(1 + A\cos\theta),$$

где E_{cv} — средняя напряженность поля на поверхности провода;

$$A=\beta\frac{r_{\bullet}}{a};$$

β находится по табл. 1-1; r_o, а и θ показаны на рис. 1-9. Можно предположить, что на отрезке dl = rdθ поверхности провода корона развивается так же, как на одиночном проводе с той же напряженностью поля E_в. Если принять указанное предположение, то потери dP_{a} на участке dl будут определяться по формуле:

$$\frac{dP_{\theta}}{r_0^2 E_{\theta}} = ae^{-b\left(\frac{E_{\theta}}{E_{\mu}} - c\right)^2} \frac{d\theta}{2\pi},$$
(10-4)

откуда

$$\frac{P}{r_0^2} = \int_0^{2\pi} \frac{dP_{\theta}}{r_0^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} aE_{\theta} e^{-b\left(\frac{E_{\theta}}{E_{\mu}} - c\right)^2} d\theta =$$
$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} ae^{-b\left(\frac{E_{\theta}}{E_{\mu}} - c\right)^2 + \ln E_{\theta}} d\theta.$$
(10-5)

Для упрощения расчетов аппроксимируем функцию $-b \left(\frac{E_{\theta}}{E_{\pi}}-c\right)^{*}+\ln E_{\theta}$ прямой а $\frac{E_{\theta}}{E_{\bullet}} + \beta$, где а и β находятся из условия наименьшего квадратичного отклонения кривых. Следовательно,

$$\frac{P}{r_0^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a e^{a \frac{E_0}{E_{\pi}} + \beta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a' e^{a \frac{E_0}{E_{\pi}}} d\theta.$$
(10-6)

Если теперь подставить в (10-6) функцию $E_{\theta} = E_{cr}(1 + A\cos\theta)$ и учесть первые два члена разложения в ряд подынтегрального выражения, то получим:

$$\frac{P}{r_0^2} = a' \exp\left\{a \frac{E_{cp}}{E_{H}} + \ln\left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{aAE_{cp}}{E_{H}}\right)^2\right]\right\}.$$
(10-7)

Для эквивалентного одиночного провода при аналогичных операциях, выраженных (10-5) — (10-6), имеем:

$$\frac{P}{r_0^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a' e^{a \frac{E_s}{E_{\rm B}}} d\theta = a' \exp\left\{\alpha \frac{E_s}{E_{\rm B}}\right\}.$$
(10-8)

Приравнивая (10-7) и (10-8), получаем:

$$a \frac{E_{\rm p}}{E_{\rm H}} = \frac{a E_{\rm cp}}{E_{\rm H}} + \ln \left[1 + \left(\frac{1}{4} \frac{a A E_{\rm cp}}{E_{\rm H}} \right)^2 \right], \qquad (10-9)$$

откуда находим значение E_{a} . Так как $x = \frac{1}{4} \left(\frac{aAE_{cp}}{E_{H}} \right)^{2} \ll 1$, то можно положить $\ln(1+x) \approx x$ и окончательно находим:

$$E_{\vartheta} = E_{\rm cp} \left[1 + \left(\gamma \, \frac{E_{\rm cp}}{E_{\pi}} \right) \right], \qquad (10-10)$$

где

$$\gamma = \frac{\alpha\beta^2 r_0^2}{4a^2}.$$

Значение коэффициента а по опытным данным в среднем определено равным 8,7.

Из изложенного следует, что формула потерь на корону на проводе расщепленной фазы совпадает с формулой потерь на одиночном проводе при подстановке вместо E величины E_3 , определенной по формуле (10-10). Следовательно, для всех n проводов расщепленной фазы формула (10-3) приобретает вид:

$$\frac{P}{nr_0^2 E_{\mathfrak{s}}} = a \, e^{-b \left(\frac{E_{\mathfrak{s}}}{E_{\mathfrak{s}}} - c\right)^2}.$$
(10-11)

На практике предпочитают вести расчет не по формулам, а по опытным кривым. В данной методике эти опытные кривые выражаются функциональными зависимостями:

$$\frac{P}{nr_0^2 E_*} = F\left(\frac{E_*}{E_*}\right). \tag{10-12}$$

Потери на корону зависят от погоды. Учитываются следующие основные виды погоды: 1) хорошая погода (без осадков); 2) дождь (включая мокрый снег); 3) снег; 4) изморозь. Функции $F_{x.n}$, F_{μ} , F_{c} , $F_{\mu 3}$ для указанных видов погоды построены на рис. 10-3. Кривые на рис. 10-3 построены как средние по опытным точкам (на рисунке не показаны) для проводов разных сечений и число проводов в пучке *n* равно 1, 2, 3, 4. Для плохой погоды (дождь, снег, изморозь) разброс опытных точек относительно кривых незначителен. Это показывает, что выбранные критериальные координаты, в частности величина E_a , хорошо отображают физические процессы, определяющие потери на местную корону. Для хорошей погоды, при которой потери вообще малы.

наблюдается существенный разброс опытных точек, в связи с чем оказалось необходимым постронть кривые для *n*, равного 1, 2, 3, 4.

Отметим, что при определении потерь в условиях хорошей погоды начальная напряженность $E_{\rm H}$ определяется по формуле (10-1) для действительной плотности воздуха δ в данном районе. В условиях плохой погоды $E_{\rm H}$ также вычисляется по формуле (10-1), но в этой формуле полагается $\delta = 1$, поскольку коронные потери при этих видах погоды мало зависят от давления и температуры воздуха.

Так как потери на корону зависят не только от вида погоды, но и от интенсивности осадков, то кривые на рис. 10-3 дают усредненные значения потерь при погоде данного вида. На коронные потери, в частности при изморози, оказывает влияние также токовая нагрузка линии, подсушивающая провода, однако количественные сведения об этом влиянии недостаточны. Поэтому влияния токовой нагрузки кривые на рис. 10-3 не учитывают.

Дальнейший расчет основывается на продолжительности в году различных групп погоды. Обозначим эти продолжительности через T_{х.п}, T_д, T_с, T_{из} в часах соответственно для хорошей погоды, дождя, снега, изморози. В среднем при типовом проектировании линий в районах с умеренным климатом можно принять продолжихорошей погоды $T_{\mathbf{x}.\mathbf{n}} =$ тельность



Рис. 10-3. Функции потерь мощности на корону для разных групп погоды.

 $F_{\mathbf{X},\mathbf{\Pi}}$ — хорошая погода без осадков, для числа проводов n=1, 2, 3, 4 в фазе: $F_{\mathbf{C}}$ снег; $F_{\mathbf{\Pi}}$ — дождь и мокрый снег; $F_{\mathbf{H}3}$ изморозь — независимо от числа проводов в фазе.

=7 235 ч, дождя и мокрого снега $T_{\rm H}$ =500 ч, снега $T_{\rm c}$ =800 ч, изморози $T_{\rm H3}$ =225 ч.

Среднегодовые потери мощности на корону трехфазной линии определяются суммированием потерь при разных погодах по формуле

$$P_{\kappa} = \frac{nr^{2}}{8760} \left\{ \left[\sum_{i=1, 2, 3} F_{\chi \ ir} \left(\frac{E_{is}}{E_{\pi}} \right) E_{is} \right] \delta^{2} T_{\chi, ir} + \left[\sum_{i=1, 2, 3} F_{\chi} \left(\frac{E_{is}}{E_{\pi, b \neq 1}} \right) E_{is} \right] T_{\mu} + \left[\sum_{i=1, 2, 3} F_{c} \left(\frac{E_{ds}}{E_{\pi, b \neq 1}} \right) E_{is} \right] T_{c} + \left[\sum_{i=1, 2, 3} F_{\pi 3} \left(\frac{E_{is}}{E_{\pi, b \neq 1}} \right) E_{is} \right] T_{\mu 3}, \ \kappa_{6} m / \kappa_{M}.$$
(10-13)

В этой формуле Е₁₉, Е₂₉, Е₃₉ — эквивалентные напряженности электрического поля на поверхности проводов фаз 1, 2, 3. Функции F_{х.п.} F_д, F_с, F_{из} находятся по кривым на рис. 10-3 в зависимости от значений $E_{i\partial}/E_{\rm H}$.

Пример 10-1. Рассчитать потери на корону на линии, приведенной в примере 1-1 (стр. 40).

Линия расположена в средней полосе на высоте H=800 м над уровнем моря. Среднегодовая температура $t=5^{\circ}$ С.

В указанном примере определены средние напряженности поля $E_{1cp}=22,6 \kappa a_{Makc}/cm$, $E_{2cp}=E_{3cp}=20,9 \kappa a_{Makc}/cm$. Находим начальную напряженность поля $E_{\rm H}$. Предвари-тельно определяем расчетную плотность воздуха. По формулам (3-1) и (3-1а) находим давление p=760(1-10-4 · 800) =700 мм рт. ст. и плотность

$$\delta = 0,384 \cdot \frac{700}{273 + 5} = 0,97.$$

По формуле (10-1) находим

$$E_{\rm H,\delta} = 30, 3.0, 82.0, 97 \left[1 + \frac{0.3}{\sqrt{1.51.0.97}}\right] = 30, 1$$
 кв_{манс}/см.
Определяем также $E_{\rm H}$ при $\delta = 1$:

$$E_{\rm h,b} = 1 = 32, 1 \ \kappa s_{\rm make}/cm$$

Для проводов 3XACO-500 примера 1-1 r = 1,51 см, a = 40 см, $\beta = 2\sqrt{3}$. Следова- $\frac{\alpha\beta^2 r_0^2}{1} = \frac{8.7 \cdot 12 \cdot 1.51^2}{1.402} = 0.0372$. По формуле (10-10) опредетельно, коэффициент ү = 4л2 ляем для хорошей погоды:

$$E_{10} = 22.6 \left(1 + 0.0372 \cdot \frac{22.6}{30.1} \right) = 23.2 \ \kappa \delta_{\text{Makc}} / c M.$$

$$E_{20} = E_{20} = 20.9 \left(1 + 0.0372 \cdot \frac{20.9}{30.1} \right) = 21.5 \ \kappa \delta_{\text{Makc}} / c M.$$

-- --

для плохой погоды (дождь, снег, изморозь), принимая $\delta = 1$:

$$E_{10} = 22,6 \left(1+0.0372 \frac{22.6}{32.1}\right) = 23,2 \ \kappa s_{\text{marc}}/cm;$$

$$E_{20} = E_{10} = 20,9 \left(1+0.0372 \frac{20.9}{32.1}\right) = 21,5 \ \kappa s_{\text{marc}}/cm.$$

В данном случае ввиду малости коэффициента у и малого отличия E_и и E_{и, b =1} значения $E_{\mathbf{s}}$ оказались практически одинаковыми при $\delta = 0,97$ и $\delta = 1$.

Вычисляем значения

$$\frac{E_{b1}}{E_{H\delta}} = 0,772, \quad \frac{E_{b2}}{E_{H,\delta}} = \frac{E_{b3}}{E_{H,\delta}} = 0,715; \quad \frac{E_{b1}}{E_{H,\delta=1}} = 0,75;$$
$$\frac{E_{b2}}{E_{H,\delta=1}} = \frac{E_{a3}}{E_{H,\delta=1}} = 0,694.$$

По кривым на рис. 10-3 находим:

$$F_{\mathbf{x},\mathbf{n}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{1}}}{E_{\mathbf{H},\delta}}\right) = 7.6; \ F_{\mathbf{x},\mathbf{n}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{2,\mathbf{e}}}}{E_{\mathbf{H},\delta}}\right) = 5;$$

$$F_{\mathbf{x}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{1}}}{E_{\mathbf{h},\delta=1}}\right) = 8.7; \ F_{\mathbf{x}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{2,\mathbf{e}}}}{E_{\mathbf{h},\delta=1}}\right) = 57.5;$$

$$F_{\mathbf{c}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{1}}}{E_{\mathbf{h},\delta=1}}\right) = 23.1; \ F_{\mathbf{c}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{2,\mathbf{e}}}}{E_{\mathbf{h},\delta=1}}\right) = 16;$$

$$F_{\mathbf{x},\mathbf{e}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{1}}}{E_{\mathbf{h},\delta=1}}\right) = 183; \ F_{\mathbf{x},\mathbf{e}}\left(\frac{E_{\mathbf{e}_{2,\mathbf{e}}}}{E_{\mathbf{h},\delta=1}}\right) = 152.$$

Подставляем найденные значения в формулу (10-13):

3-1,51*-10-* $P_{\rm H} = -(2\cdot 5\cdot 21,5+7,6\cdot 23,2)0,97^{2}\cdot 7235+(2\cdot 57,5\cdot 21,5+87\cdot 23,2)500+$ 8760 + $(2 \cdot 16 \cdot 21, 5 + 23, 1 \cdot 23, 2)$ 800 + $(2 \cdot 152 \cdot 21, 5 + 183 + 23, 2)$ 225 = 9,58 Kem/Km.

Джоулевы потери мощности на нагрев проводов при передаче по линии мощности 1000 Мвт ($P_{\rm Har}$ =930 Мвт) с числом часов использования максимума нагрузки T=5500 (время потерь τ =3500 ч при соз φ =1, среднеквадратичная плотность тока $\delta_{\rm ср.кв}$ =0,5 а/мм²) составляет 34,7 квт/км. Таким образом, потери на корону составляют около 30% потерь на нагревание проводов.

10-4. РАДИОПОМЕХИ ПРИ КОРОНИРОВАНИИ

Радиопомехи, так же как и потери на корону, возрастают с увеличением напряженности поля на проводе и с увеличением диаметра про-

водов (в пучке) вследствие возрастания мощности импульсов коронного разряда и увеличения числа импульсов. Радиопомехи возрастают также во время дождя, снега и вообще в плохую погоду. В связи с этим радиопомехи имеют вероятностный характер.

Методика расчета радиопомех, основанная на многочисленных измерениях на действующих В.Л и опытном пролете, предложена В. В. Бургсдорфом и Э. Н. Журавлевым (ВНИИЭ). На рис. 10-4 приведены кривые, по которым определяется допустимый уровень радиопомех от линии в хорошую погоду $Y_{\text{дов}}$, в котором учитываются сочетания продолжительностей дождей η_{π} и снега η_c в году:

$$\eta_{\rm H} = \frac{T_{\rm H}}{8\,760}$$
 H $\eta_{\rm C} = \frac{T_{\rm C}}{8\,760}$.

Значение Y_{доп} выбрано из условия вероятности превышения установленного общесоюзными нормами уровня, равного

50 *мкв* ~ 20 lg $\frac{50}{1}$ = 94 $\partial \delta$ для диапазона частот 0,5—2,5 *Мгц* в течение 0,05 · 8 760 = 440 и в году.

Со значением $Y_{доп}$ сравнивается расчетный или измеренный уровень радиопомех на линии при хорошей погоде $Y_{x.n}$. Расчетное значение $Y_{x.n}$ на расстоянии 50 *м* от крайней фазы линии определяется по следующей эмпирической формуле:

$$Y_{\mathbf{x}.\mathbf{u}} = Y_{\mathbf{6}} + 45 \frac{\sqrt{r_{\mathbf{0}}} - \sqrt{r_{\mathbf{6}}}}{\sqrt{r_{\mathbf{0}}r_{\mathbf{5}}}} - 80 \frac{E_{\mathbf{6}} - E_{\mathbf{x}}}{E_{\mathbf{B}\mathbf{6}}}, \qquad (10-14)$$

где

*r*₀ — радиус проводов (в пучке);

Е_м → максимальная напряженность поля на проводах;

 Y_6 , r_6 , E_6 , E_{H6} — базисные параметры линии 500 кв с проводами 3×ACO-330: $Y_6=30 \ d6$; $E_6=28,4 \ \kappa B/CM$; $r_6=1,26 \ CM$; $E_{H6}=31,5 \ \kappa B/CM$.

Второй член в формуле (10-14) близок к выражению 20 lg $(r/r_0)^2$, полученному в ряде стран и характеризующему рост ΔY в микровольтах (*мкв*) пропорционально квадрату радиуса провода.

Радиопомехи на линии считаются допустимыми, если

$$Y_{\rm X.II} \leq Y_{\rm AOII}$$

Это условие относится к расстоянию 50 м от крайних фаз линии, для которого действующими в СССР правилами нормируются радиопомехи



Рис. 10-4. Зависимости допустимого уровня радиопомех от погодных коэффициентов η_{π} и η_c .

в населенной местности. В некоторых случаях, например при переводе линий на повышенное напряжение, приходится допускать $Y_{x.n}$ более высоким, чем $Y_{доп}$. В этом случае можно снизить радиопомехи у абонентов (приемники, телевизоры), расположенных вблизи линии, устройством выносных антенн. Снижение уровня радиопомех с увеличением расстояния от линии выражается формулой

$$Y_l - Y_{so} = 20 k \lg \frac{50}{l} - 0.06 (l - 50),$$
 (10-15)

где Y₅₀ и Y₁ — помехи при расстояниях 50 м и l>50 м от крайней фазы линии; коэффициент k для ВЛ с горизонтальным расположением проводов равен k=1,8.

Пример 10-2. Рассчитать уровень радиопомех для линии 500 кв, приведенной в примере 10-1, к определить допустимость этого уровня.

Указанная линия проходит в средней полосе, для которой можно принять следующие продолжительности дождя $\eta_{\rm A}=0,057$ и снега $\eta_{\rm c}=0,091$. По кривым на рис. 10-4 находим $Y_{\rm дов}\approx 24$ дб. Для заданной линии $r_0=1,51$ см и $E_{\rm M}=24,2$ кв_{макс}/см (на средней фазе при

Для заданной линии $r_0=1,51$ см и $E_{\rm M}=24,2$ кв_{макс}/см (на средней фазе при среднеэксплуатационном напряжении 500 кв). По формуле (10-11), подставляя значения Y_6 , r_6 , E_6 , находим:

$$Y_{\mathbf{x}.\,\mathbf{n}} = 30 + 45 \cdot \frac{\sqrt[4]{1,51} - \sqrt{1,26}}{\sqrt[4]{1,51 \cdot 1,26}} - 80 \cdot \frac{28,4 - 24,2}{31,5} = 22,7 \ \partial 6.$$

Сравнение $Y_{x,n}$ с Y_{gon} показывает, что радиопомехи находятся в допустимых пределах.

Расчеты, проведенные Э. Н. Журавлевым для ряда типов проводов, позволили найти следующую простую зависимость между суммарным сечением проводов в фазе q (mn^2) и номинальным напряжением ВЛ $U_{\rm H}$ ($\kappa \theta$) при допустимом уровне радиопомех:

$$\frac{q}{2\,000} = \lambda \left(\frac{U_{\rm H}}{250}\right)^{\varphi},\tag{10-16}$$

где λ и φ — коэффициенты, значения которых для районов с метеорологическими условиями, сходными с условиями Московской области, равны при числе проводов в фазе *n*:

n	2	3	4	5	6
λ	0,154	0,0985	0,074	0,045	0,014
· φ	2,65	2,7	2,7	2,77	3,2

Формула (10-16) пригодна для расчета q в первом приближении.

10-5. ПРАКТИКА ВЫБОРА ПРОВОДОВ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ По условиям коронирования

На линиях электропередачи 35 кв и ниже коронный разряд на проводах, выбранных по экономической плотности тока, обычно столь незначителен, что может не учитываться при определении потерь в линии. По условиям коронирования минимальное сечение провода (АС) на линиях 110 кв равно 70 мм², а на линиях 220 кв – 240 мм². Существенное значение корона приобретает на линиях 330 кв и выше. На этих линиях с целью снижения коронных потерь и радиопомех обычно применяются расщепленные провода. Расщепление приводит также к снижению удельной индуктивности линии, что повышает пропускную способность электропередачи.

Эффективность расшепления на два, три и четыре провода иллюстрируется кривыми на рис. 10-5, построенными для линий 500 кв. Как видно из кривых, с увеличением числа проводов в фазе снижаются градиенты на проводах и коронные потери.

Для обычных марок проводов, выбранных по экономической плотности тока, градиенты снижаются до допустимых значений при расщеплении фазы на два, три и четыре провода соответственно для напряжений 330, 500 и 750 кв. В случаях малых токовых нагрузок может оказаться целесообразным применение проводов малого сечения и расщепление на три и четыре провода также на линиях 330 и 500 кв. На линиях 1 000—1 200 кв целесообразно расщепление на четыре — шесть или даже восемь проводов.

С увеличением расстояния между расщепленными проводами, или,



Рис. 10-5. Среднегодовая мощность потерь на корону P_{cp} (сплошные линии) и напряженность поля на поверхности провода (пунктирные линии) для фазы, состоящей из 1, 2, 3 и 4 проводов, в зависимости от полного сечения фазы. Линия 500 кв, шаг расщепления 40 см; район средней полосы европейской части СССР.

как говорят, шага расщепления а, градиент напряжения на поверхности провода проходит через минимум (рис. 10-6,а). Обычно стремле-



Рнс. 10-6. Зависимость максимальной напряженности поля на поверхности провода $E_{\rm M}$ от шага расщепления (*a*) и расстояния между фазами (*б*) для линии 500 кв, на которой поддерживается напряжение 525 кв.



ние иметь на поверхности провода минимальный градиент сочетают со стремлением к возможному снижению индуктивности линии; соответственно выбранное расстояние *a*, как правило, лежит за точкой минимума. Расчеты показывают, что оптимальная величина отношения a/r_0 , где r_0 — радиус провода, лежит около 20.

Существенное влияние на градиенты на проводах оказывает расстояние d между фазами линии. Зависимость $E_{\rm M} = f(d)$ для линии 500 кв ($U_{\rm p.M} = 525$ кв) показана на рис. 10-6,6. На линиях 750 кв и выше расстояния между проводами фактически определяются условиями ограничения $E_{\rm M}$ на проводах.

После предварительного выбора проводов по условию предельного градиента проводится расчет потерь на корону и, исходя из минимума расчетных затрат, выбирается марка проводов. Для снижения потерь на корону на дальних электропередачах СВН целесообразно приме-



Рис. 10-7. Снижение радиопомех на линии с увеличением срока ее эксплуатации.

нение регулирования напряжения на линии в зависимости от нагрузки. Каждой нагрузке соответствует оптимальное напряжение по условию минимума потерь (на нагрев проводов и на коронирование).

На вновь включаемых линиях наблюдается явление, которое не совсем удачно названо старением проводов. Сущность этого явления заключается в том, что на вновь смонтированных проводах потери на корону и радиопомехи оказываются резко повышенными вследствие загрязнений и царапин на проводах, полученных во время монтажа. После включения линии под напряжение потери на корону и радиопомехи постепенно снижаются (рис. 10-7) и только примерно через 4— 5 лет достигают установившегося значения. Снижение интенсивности местной короны объясняется выравниванием поверхности проводов в результате обуглероживания частиц, оседающих на поверхности провода.

В горных районах старение проводов вследствие чистоты воздуха идет медленно и потери на корону и радиопомехи оказываются выше. Это учитывается снижением коэффициента негладкости проводов до $m=0,7\div0,75$.

Опыт показал, что снизить начальные коронные потери и радиопомехи можно путем предохранения проводов от механических повреждений при монтаже. Для этого используется подвеска проводов непосредственно с барабанов под тяжением без укладки их на землю. Большое внимание уделяется также проектированию арматуры и металлических шапок изоляторов, в минимальной степени подверженных коронированию. Конструкции защитной арматуры, удовлетворяющей этому требованию, показаны на рис. 9-9.

10-6. РАСШИРЕННЫЕ ПРОВОДА

Расщепление проводов не является единственным техническим решением для снижения градиентов при заданном сечении проводов в фазе. Можно также применять провода достаточно большого диаметра, причем для сохранения заданного сечения такие провода должны быть полыми или заполненными нейтральной массой. Некоторые кон-



Рис. 10-8. Некоторые конструкции сталеалюминиевых расширенных проводов. *а* — с бумажным заполнением *1*; *б* — с секторными алюминиевыми трубками *2*; *в* — с алюминиевыми трубками *2*; *в* — с алюминиевыми трубками *3* и броинрующам повивом из двух влюминиевых проволок *4*; *5* — стальные проволочки сердечника; *б* — алюминиевые проволоки.

струкции подобных проводов, получивших название расширенных, показаны на рис. 10-8. В конструкции, приведенной на рис. 10-8, *а* (США), применяется бумажное заполнение, в конструкции, приведенной на рис. 10-8, *б* (США), — полые секторные алюминиевые трубки. В конструкции, приведенной на рис. 10-8, *в* (СССР), на стальной сердечник накладываются два повива круглых алюминиевых трубок, свернутых из ленты. В каждом повиве алюминиевых трубок укладываются по две круглые алюминиевые проволоки того же наружного диаметра, что и трубки. Эти проволоки придают бо́льшую жесткость проводу и воспринимают на себя давление последующего повива.

Освоение производства расширенных проводов позволило бы повысить технико-экономические показатели линий электропередачи.

Ошиновка ОРУ на подстанциях СВН часто выполняется из алюминиевых труб, днаметр которых выбирают, чтобы предотвратить коронирование.

10-7. КОРОНА НА ПРОВОДАХ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

На постоянном напряжении корона на проводах имеет стационарный характер. При положительной полярности провода возникающие в области ионизации электроны уходят на провод — анод, а положительные ионы под действием сил электрического поля перемещаются к противоположному электроду — катоду. При отрицательной полярности провода электроны выносятся из области ионизации, где, «прилипая» к нейтральным молекулам, образуют отрицательные ионы, перемещающиеся под действием сил электрического поля к противоположному электроду — аноду. Остающиеся положительные ионы уходят на 12—641 провод — катод. В обоих случаях возникает стационарный поток ионов между электродами, обусловливающий постоянный коронный ток конвекции I_к. Возникающий вблизи провода объемный заряд, одноименный с проводом полярности, снижает напряженности поля на проводе и, следовательно, несколько повышает начальное коронное напряжение.

Линии электропередачи постоянного тока при расположении на опорах проводов одной полярности называются униполярными, при расположении проводов разной полярности — биполярными. В. И. Попковым было обнаружено существенное различие между короной в си-





Рис. 10-9. Корона на униполярной (a) и биполярной (б) линиях.

стеме провод — земля на униполярных линиях и короной в системе провод — провод на биполярных линиях.

На рис. 10-9, а показаны два провода с напряжением $\pm U$, разделенные проводящей заземленной плоскостью. Очевидно, что в обеих половинах коронный разряд будет протекать независимо, т. е. обе половины представляют униполярные линии. Как показано на рисунке, в обеих системах объемный заряд в пространстве (за исключением, может быть, узкой области вблизи провода) униполярен. В связи с этим корона в системе провод — земля названа (как и сама линия) униполярной.

На рис. 10-9,6 показана биполярная линия с напряжением $\pm U$ на проводах, т. е. 2U между проводами.

В этой системе ионы обоих знаков могут проникать в область другой полярности. Частично ионы рекомбинируют, но частично достигают

другого провода. Концентрирующиеся вокруг проводов ионы противоположной полярности повышают напряженность поля на проводах, ионизация вблизи проводов должна усилиться и возрастет коронный ток $I_{\rm R}$. Повышенный коронный ток связан в данном случае не только с перемещением ионов между проводами, но и с непрерывной нейтрализацией ионов противоположного знака вблизи проводов. В связи с таким механизмом корона в системе провод — провод названа (как и сама линия) биполярной. Как следует из вышеизложенного, коронные потери на биполярной линии с напряжением 2U выше, чем суммарные потери двух униполярных линий с напряжением U.

Если электропередача осуществляется одной униполярной линией, го возврат тока осуществляется через землю.

10-8. ПОТЕРИ И РАДИОПОМЕХИ ПРИ КОРОНИРОВАНИИ На постоянном напряжении

Методика расчета потерь на корону при постоянном напряжении предложена на основе экспериментальных данных Н. В. Егоровой и Н. Н. Тиходеевым (НИИПТ). Потери выражаются в обобщенных координатах P, U/U_н, где U — напряжение полюса, U_н — начальное напряжение короны полюса. Значение $U_{\rm H} = U \frac{E_{\rm H}}{E}$, где E — напряженность на поверхности провода, вычисляемая по методике § 1-7, а E_н находится по формуле (10-1).

Расчет среднегодовых потерь на корону производится по формулам:

на одну цепь биполярной линии

$$P_{\mathbf{k}} = \frac{UU_{\mathbf{k}}^2}{b^2} \cdot 10^{-7} \sum_{i=1}^3 \vartheta_i \left(\frac{U}{U_{\mathbf{k}}}\right) \frac{T_{i}}{8\,760}, \ \kappa em/\kappa m; \tag{10-17}$$

на одну цепь униполярной линии

$$P_{\kappa} = \frac{2UU_{\kappa}^{2}}{h_{cp}^{2}} \cdot 10^{-\gamma} \sum_{i=1}^{3} \vartheta_{i} \left(\frac{U}{U_{\kappa}}\right) \frac{T_{i}}{8760}, \ \kappa \beta m/\kappa M, \qquad (10-17a)$$

b — расстояние между полюсами, m; где

 $h_{\rm cp}$ — средняя высота повеса проводов, *м*; *U* и $U_{\rm H}$ — напряжения, *кв*;

Функции ϑ_i ($U/U_{\rm H}$) берутся по кривым на рис. 10-10 для *i* групп погоды: 1 — хорошая погода; 2 — снег; 3 — дождь, мокрый снег и изморсзь.



Ф_{х.п} — хорошая погода без осадков; Φ_с — снег (сухой); Ф_л — дождь, мокрый снег и изморозь.

Приведенные формулы справедливы независимо от числа проводов в полюсе (расщепления проводов). Увеличение потерь вследствие возрастания эквивалентного радиуса пучка проводов отражается множителем U2_н (при возрастании r_в возрастает U_н, однако вследствие снижения $\vartheta_i (U/U_{\rm H})$ потери $P_{\rm K}$ снижаются].

Пример 10-3. Найти среднегодовые потери на корону ВЛ постоянного тока напряжением ± 770 кв (номинальное напряжение ± 750 кв) с проводом 4×ACO-1000; $2r_{c}=43,2$ мм; 2b=22 м; $h_{cp}=15$ м (опора на рис. 9-20).

Напряженность поля на проводах вычисляется, как указано в § 1-7, и равна $E = 26,3 \ \kappa s/cm$. Начальная напряженность поля согласно формуле (10-1) равна $E_{\rm H} =$ =29,5 кв/см. Находим начальное коронное напряжение

12*

 $U_{\rm H} = 770 \cdot \frac{29.5}{26.3} = 760 \ \kappa s$ и $U/U_{\rm H} = 770/860 = 0.9$. По кривым на рис. 10-10 находим

 $\vartheta_{\mathbf{x},\mathbf{n}} = 12.4; \ \vartheta_{\pi} = 65; \ \vartheta_{c} = 25.$ Принимаем следующую продолжительность погод (см. пример 10-1): $T_{\mathbf{x},\mathbf{n}} = 7\,235$ 4; $T_{\pi} = 725$ 4; $T_{c} = 800$. Тогда

$$P_{\kappa} = \frac{770 \cdot 860^2}{11^2} \cdot 10^{-7} \left[12, 4 \cdot 7\,235 + 65 \cdot 725 + 25 \cdot 800 \right] \frac{1}{8\,760} = 8,5 \, \kappa \text{sm}/\kappa \text{m}.$$

Расчет для униполярного варианта той же линии электропередачи дает $P_{\kappa} = = 7,8 \ \kappa s \tau / \kappa m.$

В обоих вариантах потери на корону на линиях оказались незначительными.

Радиопомехи на биполярных линиях постоянного тока выражаются формулой (согласно исследованиям, проведенным в США)

$$RI = Ke^{nE} d^2, (10-18)$$

где *RI* — помехи на расстоянии ~30 м (100 футов) от линии, мкв/м;

Е — напряженность поля на поверхности проводов, кв/см;

d — диаметр проводов, см;

К и n — эмпирические коэффициенты, значения которых на ВЛ. СВН найдены равными K=0,85 и n=0,18.

Для сравнения с нормированными в СССР значениями радиопомех (см. § 10-4) следует вычислить помехи в децибелах:

$$Y_{so} = 20 \lg (RI) - 9,$$

где слагаемое — 9 учитывает поправку при переходе к стандартному измерителю помех, принятому в СССР. По формуле (10-15) вычисляются помехи Y_{100} на расстоянии 100 *м* от линии, которые сравниваются с Y_{non} , определенными по кривым на рис. 10-4.

Исследования, проведенные в Швеции и СССР (НИИПТ), показали, что помехи в основном генерируются положительным полюсом ВЛ. В дождь радиопомехи от ВЛ постоянного тока снижаются, в то время как на линии переменного тока они резко возрастают.

Опыты показали, что существенное влияние на потери и раднопомехи на биполярной линии оказывает ветер. При скорости ветра до 10—15 *м/сек* потери и радиопомехи возрастают в 2—4 раза. Это явление объясняется повышением под действием ветра скорости движения частиц между проводами, усилением интенсивности их рекомбинации, что, как было показано в § 10-7, ведет к возрастанию потерь. На униполярных линиях существенной зависимости потерь от скорости ветра не обнаружено.

10-9. ОБЩАЯ КОРОНА И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Общая корона на проводах возникает при внутренних перенапряжениях, когда напряженность поля по поверхности проводов превышает $E_{\rm H}$. Как было показано в § 10-1, с общей короной связаны активный и емкостный токи поперечной проводимости. Поэтому общую корону можно имитировать фазными параметрами — активной проводимостью $g_{\rm R}$ и емкостью $\Delta C_{\rm K}$, которая является дополнительной к основной геометрической емкости провода. Значения $g_{\rm R}$ и $\Delta C_{\rm R}$ для периодического напряжения частоты \dot{f} (т. е. в установившемся режиме) опреде-
ляются следующими формулами, предложенными Г. Н. Александровым:

$$g_{\kappa} = \left(\frac{f}{50}\right)^{0.62} \left[1 - e^{-3.05 \left(\frac{E_{\kappa}}{E_{\pi}} - 1\right)}\right] 10^{-3}, 1/Mo_{\mathcal{M}} \cdot \mathcal{M}; \Delta C_{\kappa} = 2.4 \left(\frac{50}{f}\right)^{0.42} \left(\frac{E_{\kappa}}{E_{\pi}} - 1\right), n_{\mathcal{D}}/\mathcal{M}.$$
(10-19)

Как видно из приведенных формул, ΔC_{κ} и особенно g_{κ} растут с повышением отношения E_{κ}/E_{μ} . Проводимость g_{κ} растет, а емкость ΔC_{κ} падает с повышением частоты f.

Формулы (10-19) могут быть использованы для учета влияния короны при расчете амплитуд перенапряжений в квазистационарных аварийных режимах. Точность определения g_{κ} и ΔC_{κ} по формулам (10-19) составляет соответственно ± 20 и $\pm 10\%$.

Лабораторные исследования показали, что при толчкообразном положении синусоидального напряжения к коронирующему проводу установившаяся величина коронных потерь достигается примерно за три полупериода. В первом полупериоде приложения напряжения коронные потери не превышают 35—45% установившихся. Отсюда следует, что при воздействии коммутационных перенапряжений создаваемые короной активная и емкостная проводимости оцениваются примерно в ¹/₃ значений, даваемых формулой (10-19). Поэтому большинство практических расчетов возможных внутренних перенапряжений выполняется без учета влияния короны.

10-10. ИМПУЛЬСНАЯ КОРОНА НА ПРОВОДАХ

При распространении вдоль линий электропередачи грозовых волн на фронте волн возникает импульсная корона, обладающая некоторыми специфическими особенностями развития.



Рис. 10-11. Структура коронного чехла при отрицательной (a) и положительной (б) полярности провода.

Структура коронного чехла отрицательной полярности представлена на рис. 10-11, а. При повышении начальной напряженности поля вблизи провода развиваются ионизационные процессы. В возникающик лавинах электроны выносятся на наружную «оболочку» коронного чехла, оставляя за собой тяжелые положительные ионы. В области слабого поля электроны захватываются частицами газа, образуя отрицательные ионы, концентрирующиеся во внешнем слое коронного чехла. Провод оказывается окруженным пространственным положительным заря-



Рис. 10-12. Вольт-кулоновая характеристика импульсного коронного разряда провода диамстром 15 мм при отрицательной полярности илиряжения. Пунктиром нанесена характеристика при отсутствии короны. дом, который, в свою очередь, окружен слоем отрицательного заряда.

При короне положительной полярности в коронном чехле сосредоточены в основном малоподвижные ионы (рис. 10-11,б). Электроды под действием сил поля стягиваются к проводу, где нейтрализуются зарядом провода.

Скорость электронов столь велика, что ионизационные процессы можно считать происходящими практически мгновенно. С другой стороны, скорость положительных ионов столь мала, что на фронте волны их можно считать практиченеподвижными. В силу СКН этого суммарный заряд на проводе и в коронном чехле зависит только от напряжения на проводе в данный момент времени и практически не изменяется с крутизной волны. Вид зависимости $q_{\kappa} = f(u)$ показан рис. 10-12 участком ОА вольт-кулоновой характеристики.

После прохождения максимума, т. е. на хвосте волны, коронный чехол весьма медленно распадается. На рис. 10-12 этому процессу соответствует участок *AB*. Приведенная зависимость $q_{\kappa} = f(u)$ используется в расчетах затухания и искажения грозовых волн (см. гл. 18).

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Покажите форму кривой тока $i=i_{\kappa}+i_{c}$ и составляющие этого тока, определяющие потери на корону и возрастание емкости линии.

2. Определите начальную напряженность поля E_n провода ACO-400 для линии, расположенной на высоте $H=2\,000$ м и $t=20^{\circ}$ C.

3. Какие максимальные напряженности поля допустимы на проводах В.Л переменного тока? Какие марки провода и какие расщепления применяются на линиях 220, 330, 500 и 750 кв? В чем заключается эффективность применения расширенных проводов?

4. Объясните физическую причину появления радиопомех при коронировании. Какими путями можно ослабить радиопомехи у абонента, расположенного вблизи В.12.

5. Объясните протекание коронного разряда на униполярных и биполярных ВЛ постоянного тока.

6. Рассчитайте потери на корону и уровень радиопомех на ВЛ переменного тока 500 кв при $U_{\rm pas} = 525$ кв с проводами 4×ACУ-240/300 ($r_0 = 1,12$ см), с расстоянием между фазами D = 10,5 м, при средней высоте подвеса над землей $h_{\rm cp} = 13$ м и шаге расщепления a = 30 см.

Указание. Расчет по упрошенным формулам § 1-8 дает на средней фазе $E_1 = = 23.1 \ \kappa s/cm$, на крайних фазах $E_2 = E_3 = 21.4 \ \kappa s/cm$.

7. Рассчитайте потери на корону на ВЛ±400 кв с проводами 2×ACO-600/400 ($r_{0,\mp}$ 1,655 см), 2b=10 м, $h_{c,p}$ =10,5 м.

8. Каково влияние коронного разряда на внутренние и атмосферные перенапряжения?

Глава одиннадцатая

ДУГОВЫЕ ЗАМЫКАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

11-1. ПРИЧИНЫ ЗАМЫКАНИЙ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Замыкания на линиях, однофазные и междуфазные, можно подразделить на дуговые и металлические. При дуговых замыканиях соединение токоведущих частей между собой или с землей происходит через малое сопротивление дугового канала. Такие замыкания могут возникать вследствие воздействия грозовых или внутренних перенапряжений, рабочего напряжения (при непредвиденно сильном загрязнении гирлянд изоляторов) либо вследствие механических причин.

Вероятность грозовых замыканий зависит от уровня изоляции линий, растущего с увеличением номинального напряжения, и эффективности грозозащиты. Практика показала, что экономически невыгодно добиваться 100%-ной грозоупорности линий электропередачи. Это относится не только к линиям среднего напряжения, но и к линиям СВН. Внутренние перенапряжения, как правило, не приводят к перекрытию изоляции линий нормального уровня. Но в редких случаях такие перекрытия все же возможны. Случаи перекрытия гирлянд вследствие их загрязнения наблюдаются в промышленных районах. Дуговые замыкания механического происхождения происходят при касании проводов разных фаз или земли (или при соответствующем снижении изоляционных промежутков) в результате сильных порывов ветра, сброса гололеда, пляски проводов, а также набросов. При металлическом замыкании переходное сопротивление в месте замыкания обычно пренебрежимо мало. Чаще всего такие замыкания обусловлены непосредственным контактом проводящих частей и имеют устойчивый характер. Иногда замыкание приобретает устойчивый характер в результате развития аварии, например при пережоге проводов во время дугового замыкания.

Из общего числа отключений линий электропередачи процент отключений, связанных с дуговыми замыканиями, доходит до 70—90. Чем ниже грозоупорность линии, тем процент дуговых замыканий выше. Так, например, для бестросовых линий на металлических опорах процент дуговых замыканий возрастает до 95.

11-2. УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ИСКРОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ В ДУГОВОЕ Замыкание на линиях электропередачи

Если перекрытие изоляции на линии произошло в результате кратковременного импульса, например грозового, то искровое перекрытие может не перейти в дуговое замыкание. В § 4-11 было установлено, что это возможно при достаточно низком градиенте рабочего напряжения.

Лабораторные опыты и эксплуатационные наблюдения позволили дать оценку коэффициентам (или вероятностям) перехода п импульсной искры в силовую дугу. Для линий с металлическими опорами 110—220 кв коэффициент перехода п равен примерно 0,7, а для линий СВН, на которых рабочие градиенты выше, коэффициент п принимается равным 1. Для линий с деревянными опорами с использованием изоляции дерева

$$\eta = (1,5E_{\rm cp}-4)\,10^{-2},\tag{11-1}$$

где *Е*_{ср} — средний градиент в киловольтах на метр суммарной длины разрядного пути по фарфору и дереву.

Пример 11-1. Рассчитать критический градиент и вероятность η для междуфазного перекрытия на деревянной П-образной опоре 35 кв без троса с гирляндами из двух элементов П-4,5 и расстоянием между фазами 3 м.

Путь импульсного перекрытия пролегает по двум гирляндам и траверсе. Длина гирлянд равна 2.2.0,17=0,68 м. Длина траверсы равна 3 м. Предполагая, что на линии поддерживается напряжение, равное номинальному, находим рабочий градиент 35

при междуфазном перекрытии $E = \frac{55}{0.68 + 3} = 9,5 \ \kappa \theta / M$. По формуле (11-1) находим

 $\eta = (1,5 \cdot 9,5 - 4) 10^{-2} \approx 0,1$. Следовательно, на линиях 35 кв с деревянными П-образными опорами вероятность междуфазных дуговых замыканий вследствие грозовых поражений весьма мала.

Для линий 110 кв на деревянных П-образных опорах с расстоянием между фазами 4 м и шестью изоляторами в гирлянде коэффициент перехода η≈0,25.

Часто импульсный разряд расщепляет деревянные элементы опоры. Расщепление вызвано испарением влаги по следу импульсного перекрытия и образованием ударного давления. Отчасти расщепление можно также связать с действием электростатических сил, возникающих между волокнами древесины при прохождении по ним большого импульсного тока. При расщеплении древесины возникает интенсивное дутье, охлаждающее искровой канал, и поэтому при расщеплении коэффициент перехода η резко снижается. Поэтому на линиях часто обнаруживают расщепленные опоры, на которых не возникала силовая дуга. Но само по себе расщепление деревянных элементов опор весьма нежелательно, так как требует ремонта опор, а в некоторых случаях приводит даже к падению проводов на землю.

11-3. САМОПОГАСАНИЕ СИЛОВЫХ ДУГ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Если дуга установилась, то она может гореть до автоматического отключения линии. Однако в некоторых случаях в результате растяжения дуги может произойти ее самопогасание. Условия самопогасания открытых дуг рассматривались в § 4-12, где было установлено, что са-



Рис. 11-1. Дуга с током 2400 а между фазами на деревянной траверсе и гирляндах линий 110 кв.

a — через 5 периодов после зажигания; б — при интенсивном раздувании.

мопогасание происходит при снижении граднента напряжения E, вычисленного по длине ствола дуги, до некоторого критического значения $E_{\rm kp}$ в результате растяжения дуги.

Первоначально длина дуги определяется направлением пути перекрытия. Далее в течение сотых долей секунды дуга под воздействием электромагнитных сил между отдельными участками дугового столба скручивается в спирали. В последующем конвекционные силы, связанные с нагревом воздуха, а также ветер, действующие на дуговой столб в целом, растягивают дугу.

По мере растяжения дуги возрастает ее сопротивление и ограничивается ток в дуге, пока при некоторой длине, когда граднент $E = U/l_{\rm g}$

достигает $E_{\mu\nu}$, сопротивление дуги резко нарастает и дуга обрывается. Это происходит тем скорее, чем больше первоначальная длина дуги и меньше ток короткого замыкания (металлического) в месте перекрытия. Кривые изменения R и I дуги при перекрытии изоляции линии 110 кв на деревянных опорах (без троса) на пути провод — земля показаны на ряс. 11-2. Времена самопогасания дуги в этих же условиях достигают примерно 10-80 периодов при токах в пределах 200—800 a. Эти времена, как правило, превышают время автоматического отключения линии, так что рассчитывать на само-



Рис. 11-2. Кривые изменения во времени тока и сопротивления самопогасающей открытой дуги на деревянной опоре 110 кв. 1, 2 – вумерация опытов.

погасание дуг можно только в случае очень малых токов короткого замыкания или при резких ветрах, способствующих растягиванию дуги. Поэтому самопогасание дуги имеет существенное практическое значение лишь в сетях напряжением 35 кв и менее, имеющих незаземленную нейтраль. В таких сетях градиенты рабочего напряжения невелики, а ток однофазного замыкания мал, так что возникшая дуга угасает в течение нескольких периодов.

11-4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ И УСЛОВИЯ Самопогасания дуг при Апв

Автоматическое повторное включение (АПВ) позволяет ликвидировать большинство (75—90%) дуговых замыканий без длительного отключения линии и перерыва электроснабжения. АПВ повсеместно применяется как средство повышения надежности линий электропередачи. АПВ применяется двух основных типов — трехфазное (ТАПВ) и однофазное (ОАПВ). Так как большинство дуговых замыканий имеет однофазный характер, то ОАПВ весьма эффективно. Однако применение ОАПВ требует индивидуальных приводов для каждой фазы выключателя и более сложной автоматики. Поэтому применение ОАПВ оправдано только на тех линиях, где ТАПВ опасно по режимным соображениям (несинхронное включение, потеря устойчивости).

Важное значение имеет вопрос о времени повторного включения линии. Это время должно превышать время деионизации промежутка в месте дугового замыкания.

Время денонизации $t_{\text{тАПВ}}$ повышается с ростом напряжения и тока в дуге. С другой стороны, с ростом тока растет скорость растяжения дуги. Эксплуатационные данные и специальные опыты позволили построить график (рис. 11-3), по которому выбирается минимальное время $t_{\text{ТАП3}}$ в зависимости от тока короткого замыкания и номинального напряжения линии.

При трехфазном отключении линии (ТАПВ) на здоровых фазах может оставаться заряд, поддерживающий на этих фазах постоянное напряжение (точнее, медленно спадающее вследствие утечки зарядов на землю). Соответствующая схема показана на рис. 11-4,*a*. Постоян-



Рис. 11-3. Зависимость минимального времени ТАПВ от тока короткого замыкания и номинального напряжения линии (по А. С. Майкопару).

ное напряжение не создает токов смещения в междуфазных емкостях и поэтому не влияет на горение дуги на поврежденной фазе. Наоборот, при ОАПВ существует возможность поддержания дуги на отключен-



Рис. 11-4. Схема емкостей проводов линии и токов подпитки дуги при ТАПВ (а) и ОАПВ (б). О — фаза отключена: Ф — фаза под рабочим напряжением.

ной фазе за счет емкостной связи с другими фазами, находящимися под рабочим напряжением 50 гц. Путь подпитки показан на рис. 11-4, б. Через дугу проходит емкостный ток подпитки, который равен

$$\dot{I}_{c} = j (\dot{U}_{12} + \dot{U}_{13}) \, \omega C_{M\Phi} = j \, \sqrt{3} \, U_{\Phi} \omega C_{N\Phi},$$
 (11-2)

где *С*_{мф} — междуфазная емкость.

Ориентировочные значения токов подпитки при ОАПВ равны:

Напряжение линии, ко	11) 221		330	50)	750
Ток подпитки, <i>а/км</i>	0,05	0,1	0,15	0,25	0,45

Опытами установлено (А. С. Майкопаром), что минимальное время t_{емпв}, достаточное для погашения дуги подпитки на линиях 220500 кв, может быть определено из соотношения

$$t_{\text{OATIB}} = 0.05 I_c, \ ce\kappa,$$
 (11-3)

где I_{C} выражено в амперах.

На линиях СВН большой протяженности для поддержания рабочего напряжения в допустимых пределах и повышения устойчивости применяют шунтирующие реакторы, включаемые между каждой фазой и землей. Величина индуктивности реактора выбирается исходя из усло-



6)

Рис. 11-5. Схема емкостей проводов линии, индуктивностей шунтирующих реакторов и токов подпитки дуги при ТАПВ (а) и ОАПВ (б). Выделены колебательные и резонансные контуры. О — фаза отключена: • — фаза под рабочим напряжением.

вия частичной компенсации емкости линии, а следовательно, собственная частота колебаний в контуре емкость линии — индуктивность реактора близка к 50 *ец*.

Шунтирующие реакторы влияют на условия денонизации дугового промежутка при ТАПВ и ОАПВ. Проследим причины этого на схеме рис. 11-5. При ТАПВ (рис. 11-5,*a*) остаточное напряжение на здоровых фазах уже не остается постоянным, как в схеме на рис. 11-4,*a*, а вследствие разряда емкости фаз C_{Φ} на индуктивности реакторов $L_{\rm p}$ напряжения фаз 2 и 3 имеют затухающий колебательный характер с частотой f_0 , близкой к 50 ги. Эти напряжения создают ток подпитки, показанный на рис. 11-5,*a* стрелками и обусловливающий необходимость увеличения бестоковой паузы $t_{\rm TANB}$ до 0,4—0,45 сек.

При ОАПВ (рис. 11-5,6) ток подпитки по-прежнему определяется рабочим напряжением здоровых фаз. Шунтирующие реакторы облегчают условня гашения этого тока, снижая скорость восстановления

[Гл. 11

момент обе

раз-

влиянием двух здоровых фаз и имеет частоту f = 50 гц. Другая составляющая появляется из-за свободного колебательного разряда емкости отключившейся фазы на шунтирующий реактор с частотой f, близкой к 50 гц.

напряжения при прохождении тока через нуль. При обрыве тока в дуговом промежутке на отключенной фазе восстанавливается напряжение, имеющее две составляющие. Одна из составляющих обусловлена

В

начальный

составляющие имеют

ный знак; они показаны на рис. 11-6 кривыми 1 и 2. Сумма обеих составляющих

дает напряжение, восстанав-

ливающееся на отключенной

фазе после погасания дуги

(кривая 3). Как видно из



Рис. 11-6. Напряжение на отключившейся фазе при ОАПВ линии с шунтирующими реакторами. 1 — составляющая 50 гц; 2 — составляющая колебательного разряда на отключившейся фазе; 3 — результирующая кривая — восстанавливающееся напряжение на отключившейся фазе.

рисунка, скорость роста напряжения $u_{\rm B}$ определяется разницей в частотах f и f_0 и затуханием свободных колебаний. При f_0 , близком к f, скорость нарастания напряжения $u_{\rm B}$ оказывается малой и дуга легко гаснет. Поэтому пауза САПВ для линий с шунтирующими реакторами может быть снижена примерно в 1,5 раза по сравнению с $t_{OA\Pi B}$ по формуле (11-3).

В установившемся режиме после погасания дуги шунтирующий реактор вместе с емкостями отключившейся фазы (междуфазной и емкостью на землю) образует резонансный контур, в котором напряжение на фазе может достигать и даже превышать рабочее фазное напряжение линии. По этой причине при проектировании стараются избегать условий, приводящих к полно-

му резонансу (подробнее этот вопрос разбирается в гл. 28).

11-5. ДУГОВЫЕ ЗАМЫКАНИЯ На Землю в сетях с изолированной нейтралью. Дугогасящие катушки

По установившейся в Советском Союзе практике электрические сети напряжением до 35 кв включительно имеют незаземленную нейтраль. Если в такой сети произойдет дуговое замыкание на землю, то через дугу будет протекать емкостный ток, величина которого определяется рабочей емкостью всех трех фаз но всей сети.

Схема сети с однофазным замыканием показана на



Рис. 111-7. Принципиальная схема сети с изолированной нейтралью при однофазном замыкании (а) и расчетная схема для определения тока I₃ (б).

рис. 11-7,*а*. Как известно из курса ТОЭ, ток замыкания в любой линейной цепи можно определить, включая в месте замыкания источник напряжения, равного напряжению фазы до замыкания, т. е. U_{Φ} , и полагая все остальные источники напряжения нулевыми. Соответствующая расчетная схема показана на рис. 11-7,6. В этой схеме опущены индуктивные сопротивления, величина которых пренебрежимо мала по сравнению с емкостными. Емкостный ток замыкания на землю равен:

 $I_3 = U_{\phi} 3\omega C_{\phi}, \qquad (11-4)$

где C_{Φ} — емкость фаз на землю. Путем симметрирования фаз — транспозицией на линиях или на подстанциях добиваются равенства емкостей C_{Φ} всех трех фаз системы. Для возТаблица 11-1

Значения емкостных токов замыкания на землю I_{3. пред}, при превышения которых в сети должна устанавливаться дугогасящая катушка

Рабочее вапряжение, же	I _{a.nrea} , a
$35 \\ 15-20 \\ 10 \\ 6$	10 15 20 30

душных линий удельный емкостный ток замыкания на землю, т. е. ток на 1 км линии и 1 кв номинального напряжения, равен в среднем

$$I_{C \text{ yg}} = 3 \text{ ма/км} \cdot \kappa \theta$$
.

Удельный ток в кабельных линиях лежит в пределах 60—250 ма/км · кв в зависимости от сечения и напряжения кабеля. Бо́льшие цифры отно-



Рис. 11-8. Принципиальная схема сети с дугогасящей катушкой при однофазном замыкании (а) и расчетная схема для определения тока I₃ (б).

сятся к кабелям большего сечения и меньшего напряжения.

Малый ток в дуге создает весьма благоприятные условия для ее самопогасания и восстановления первоначального состояния сети. Исследованиями в сети и опытом эксплуатации установлены предельные значения емкостного тока I_c , при которых еще обеспечивается самопогасание дуги замыкания на землю. Эти значения приведены в табл. 11-1.

Если $I_C > I_{Cupped}$, то возникает устойчивая дуга однофазного замыкания на землю, которая ведет к термическому разрушению изоляторов, пережогу провода и обычно перебрасывается на междуфазные промежутки, т. е. ведет к междуфазным коротким за-

мыканиям с автоматическим отключением участка сети. По этой причине дуговые замыкания на землю стремятся погасить в начале их возникновения. Для этой цели служит дугогасящая катушка, включаемая в нейтраль трехфазной сети (рис. 11-8,a). Катушка настраивается в резонанс на суммарную емкость сети на землю ($3C_{\phi}$). Это означает, что индуктивность катушки должна примерно удовлетворять условию

$$\omega_{\bullet}^{2} = \frac{1}{L_{\mathbf{r}} \cdot 3C_{\Phi}} \approx \omega^{2}, \qquad (11-5)$$

где ω=314 1/сек, а ω₀ — круговая частота собственных колебаний.

Расчетная схема показана на рис. 11-8, б. В этой схеме L_к — индуктивность, g_{κ} — активная проводимость катушки; в значении g_{κ} учитываются также все прочие активные потери в сети при прохождении токов замыкания на землю.

Действие катушки основано на двух факторах. Во-первых, катушка компенсирует ток замыкания на землю до остаточного значения Іост, малого по сравнению с током Із без катушки. Во-вторых, катушка резко снижает скорость восстановления напряжения на дуге.

Обозначим через k настройку катушки (в долях от емкостного тока замыкания):

$$k = \frac{I_{\scriptscriptstyle B}}{I_{\scriptscriptstyle C}} = \frac{1}{\omega^2 L_{\scriptscriptstyle B} \, 3 \, C_{\scriptscriptstyle \Phi}} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \qquad (11-6)$$

а через v — расстройку точной компенсации:

$$v = 1 - k = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \tag{11-7}$$

где $\omega_{\phi}^{2} = \frac{1}{L_{\kappa} 3C_{\phi}}$ – частота собственных колебаний в цепи. Тогда остаточ-

ный ток в дуге

$$I_{\rm GCT} = V I_{\rm a}^2 + (I_{\rm C} v)^2. \tag{11-8}$$

В этой формуле активный ток $I_{a} = U_{\Phi}g_{R}$.

Как видно из формулы (11-8), Іост тем меньше, чем меньше расстройка. При v=0 или k=1, т. е. при полном резонансе, через заземляющую дугу проходит только активный ток.

30 Рис. 11-10. Расчетная схема 9 для определения восстанавливающегося напряжения . v=0 на дуговом промежутке при Зависимость Рис. 11-9. однофазном замыкании на остаточного тока Іост от землю в сети с дугогасящей катушкой. расстройки и.

Типовая кривая $I_{oct} = f(U)$ показана на рис. 11-9. При v < 0 $(I_{\kappa} > I_c)$ имеет место режим перекомпенсации, при v > 0 $(I_{\kappa} < I_c)$ — режим недокомпенсации.

Гашение дуги происходит при прохождении тока Іост через нулевое значение. Эту коммутацию можно представить в виде размыкания ключа в цепи источника напряжения (рис. 11-10). После размыкания ключа потенциал точки 1 изменяется с рабочей частотой ω, потенциал точки 2-с частотой собственных колебаний контура wo. Заметим, что потенциал точки 2 есть потенциал нейтрали исходной системы.



Восстанавливающееся напряжение, т. е. напряжение на поврежденной фазе, равно разности потенциалов и выражается формулой (в комплексной форме)

$$u_{\rm B}(t) = \operatorname{Re} \{ U_{\rm M} e^{j(\omega t + \varphi)} [1 - e^{-\delta t} e^{-j\omega v t}] \}, \qquad (11-9)$$

где

ф — фазовый угол напряжения в момент нуля тока, определяемый проводимостью g_к; ф близко к нулю;

 $\delta = g_{\kappa}/2C$ — коэффициент затухания ($C = 3C_{\phi}$);

$$v=1-\frac{\omega_0^2}{\omega^2}.$$

Так как б мало н $e^{-\omega}$ близко к единице, то при достаточно малой расстройке напряжение $u_{\rm B}(t)$ нарастает медленно. Вследствие различия частот ω и ω_0 при достаточно малом б возникают биения с периодом $T = \frac{2\pi}{\omega - \omega_0}$. Этот процесс аналогичен восстановлению напряжения при ОАПВ линии с шунтирующими реакторами.

На рис. 11-11 приведены осциллограммы потенциалов на нейтрали u_0 и восстанавливающегося напряжения u_B для значений v = 0 и v = 16% при $\delta = 0,027$. При идеальном резонансе (v = 0) рост напряжения $u_B(t)$ обусловлен только затуханием свободных колебаний в контуре $L_K - 3C_{\Phi}$; огибающая напряжение $u_B(t)$ медленно возрастает с нуля до U_{Φ} . При расстройке v = 16% огибающая напряжения $u_B(t)$ быстро достигает максимума, существенно превышающего U_{Φ} . В дальнейшем в процессе биений огибающая напряжения $u_B(t)$

На рис. 11-12 приведена кривая зависимости времени восстановления напряжения т до U_{Φ} от расстройки v при $\delta = 0,025$. Кривая показывает, что в узком диапазоне расстройки $v = \pm 5\%$ время восстановления сохраняет практически то же значение, что и при резонансе. При возрастании v время т резко падает и соответственно возрастает скорость восстановления напряжения на дуге.

Кроме того, как следует из выражения (11-9) и осцилограмм на рис. 11-11, с увеличением расстройки растет и амплитудное значение огибающей напряжения $u_{\rm B}(t)$. Это значение определяется по формуле:

$$U_{\rm E,N} = U_{\Phi} \left(1 + e^{-\pi S} \frac{1}{|\vec{V} \vec{k} - 1|} \right). \quad (11-10)$$

Так, например, при $\delta = 0,025$ и k = 1,2(v = 0,2) имеем $U_{B,M} = 1,5 U_{\Phi}$.





землю.

а — при точной настройке дугогасящей катушки; б — при небольшой расстройке

Полные кривые $u_{\rm B}(t)$ для разных U/δ даны на рис. 11-13. Из этих кривых видно, что с уменьшением v скорость нарастания $u_{\rm B}(t)$ н амилитуда $U_{\rm B.M}$ снижаются. Дугогашение, осуществляемое дугогасящей катушкой, связано как с малым остаточным током в дуге $I_{\rm oct}$, так и малой скоростью восстановления напряжения.

Из изложенного следует, что необходимо стремиться к точной резонансной настройке дугогасящей катушки. Однако на практике катушка обычно настраивается с некоторой перекомпенсацией. Причина этого состоит в следующем. Точная настройка затруднена вследствие естественной погрешности в определении емкостного тока и ступенчатого характера регулировки катушки. Расстройка же в сторону недокомпенсации недопустима вследствие возможности появления больших перекосов



Рис. 11-12. Зависимость времени восстановления напряжения до номинального значения от расстройки v.



Рис. 11-13. Кривые восстанавливающихся напряжений $u_{\rm B}/U_{\Phi} = f(t)$ при различных v/δ .

фазных напряжений. Это явление будет подробно рассмотрено в гл. 28, посвященной резонансным перенапряжениям. Поэтому правилами технической эксплуатации допускается только перекомпенсация с расстройкой, не превышающей 5%.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Грозовое поражение привело к однофазному импульсному перекрытию.

 а) на линии 110 кв на деревянных опорах по пути: гирлянда из 6 элементов П-4,5, деревянная траверса длиной 2 ж и деревянная стойка длиной 12 ж;

6) на линии 220 кв на металлических опорах по гирлянде из 13 изоляторов ПМ-4,5.

Определите для обоих случаев вероятность перехода импульсной искры в дугу тока однофазного короткого замыкания. Если дуга возникла, то в каком случае возможно самопогасание дуги?

2. Ликвидация однофазного короткого замыкания на линии 220 кв с током 4 ка происходит с помощью АПВ. Объясните особенности и преимущества ТАПВ и ОАПВ. Какой интервал бестоковой паузы необходим в данном случае для ТАПВ и ОАПВ?

3. Объясните, какое влияние оказывают шунтирующие реакторы, подключенные к ВЛ 500 кв, на необходимос время бестоковой паузы при ТАПВ и ОАПВ.

4. Сеть 35 кв с изолированной нейтралью имеет общую протяженность воздушных линий 200 км. Оцените необходимость установки в сети дугогасящей катушки и при необходимости осуществите выбор катушки исходя из допустимой расстройки v=5%.

5. Объясните эффект компенсации емкостного тока и ограничения скорости роста восстанавливающегося напряжения, осуществляемый дугогасящей катушкой. Какую роль в этом эффекте играет настройка (или расстройка) катушки?

Глава двенадцатая

ИЗОЛЯЦИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

12-1. ОБЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПРИМЕНЕНИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ Высокого напряжения

Кабельные линии электропередачи значительно дороже воздушных линий, и поэтому всюду, где возможно, предпочтение отдается последним. В основном кабельные линии применяются в густонаселенных и застроенных районах, где прокладка воздушных линий невозможна, экономически невыгодна (по отчуждаемой земельной площади) или, наконец, нежелательна по эстетическим соображениям.

В силу указанных причин кабельные линии применяются в основном в городах и на территории промышленных предприятий, а также при пересечении морских проливов или рек. Длина кабельных линий в большинстве случаев относительно невелика.

Для кабельных линий первостепенное значение имеет изоляционная проблема. Надежность и экономичность изоляции определяют стоимость силовых кабелей, а следовательно, и их распространение. Электрическая прочность кабельной изоляции резко возрастает при переходе от переменного к постоянному напряжению. Поэтому при вынужденной прокладке длинных кабельных линий, например при пересечении больших водных преград или гор, экономически выгодно выполнять электропередачу на постоянном токе высокого напряжения.

12-2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Кабельная изоляция не только изолирует токопроводящую жилу, но и поддерживает ее в заданном положении. Поэтому кабельная изоляция должна обладать определенной механической прочностью. Обычно изоляция кабелей выполняется из кабельной бумаги, которая наматывается на жилу. Но сама по себе бумага вследствие ее пористости имеет невысокую электрическую прочность. Поэтому бумага пропитывается изоляционной жидкостью, составленной из минерального масла с добавками. Такая изоляция обладает высокой электрической прочностью, большей, чем прочность бумаги и масла в отдельности (см.

§ 7-7). Вместо масляной пропитки могут быть использованы газы при высоком давлении. Высокая электрическая прочность этих газов резко повышает напряжение начала ионизации в бумажной изоляции и, следовательно, повышает пробивное напряжение всей кабельной изоляции. На использовании этих двух основных принципов основаны изоляционные конструкции всех силовых кабелей.

В § 1-7 было отмечено, что на поверхности наружного повива отдельных жил напряженность поля возрастает. Это возрастание представляет опасность для высоковольтных кабелей. Для устранения «негладкости» проводов поверхность жил кабелей напряжением 35 кв и выше покрывается повивом лент из полупроводящей бумаги.

Второй возможной причиной повышенных градиентов напряжения в кабельной изоляции является исполнение трехфазных кабелей с так





/-З-фазные жилы кабеля; 4 — изоляция; 5 — экран или оболочка. Изображенное поле соответствует моменту, когда мгновенное напряжение фазы / проходит через максимум; при этом напряжение фаз 2 и 3 имеет обратный знак и равно половине амплитудного значения.

называемой поясной изоляцией. В таких простейших по конструкции кабелях фазы, разделенные изоляцией, располагаются в общей металлической оболочке, что приводит к нарушению радиального характера 13-641 электрического поля и повышению градиента в зоне между жилами кабеля (рис. 12-1). В напряженности поля возникает тангенциальная относительно окружности жил составляющая, существенно снижающая электрическую прочность слоистой изоляции кабеля. Поэтому кабели с поясной изоляцией изготовляются лишь на относительно низкие номинальные напряжения. При напряжениях выше 20—35 кв каждая фаза кабеля снабжается поверх изоляции собственной металлической оболочкой или экраном из металла либо металлизированной бумаги. Эта мера, очевидно, полностью восстанавливает радиальный характер поля в изоляции кабеля. Кроме того, повышается теплопроводность, что позволяет несколько увеличить допустимую токовую нагрузку кабеля.

12-3. КАБЕЛИ С ВЯЗКОЙ ПРОПИТКОЙ

В кабелях с вязкой пропиткой изоляция выполняется из кабельной бумаги, пропитанной маслоканифольной мастикой. Эта мастика приготовляется из минерального масла и канифоли (доля последней равна 10—35%). Такое соединение обеспечивает необходимую вязкость мастики, чем предотвращается вытекание мастики из концов кабеля при монтаже и перетекание мастики в кабеле, проложенном с небольшим уклоном.

Технология изготовления изоляции такова. После намотки на жилу кабельной бумаги кабель помещается в вакуум-котел, где сушится под вакуумом. Пропитка кабелей производится в тех же котлах при температуре 105—115° С. Сначала пропитка ведется под вакуумом, затем при атмосферном или некотором избыточном давлении.

Структура пропитанной бумажной изоляции кабеля показана на рис. 12-2. Кабельная бумага состоит из лент шириной 10—30 мм и толщиной 20—120 мк. Между витками ленты при ее намотке оставляется зазор 1,5—3,5 мм, что обеспечивает необходимую гибкость кабеля.



Рис. 12-2. Структура бумажной изоляции кабеля.

1 — токопроводящая жила; 2 — свинцовая оболочка; 3 — ленты бумаги; 4 — зазор между краями спиральво ванесенной ленты бумаги; 5 — шаг намотки; 6 — перекрытке ленты; 7 — возможный эффект в изоляции в виде совпалення двух лент; 8 — увеличенная масляная прослойка в месте совпадения лент.



Рис. 12-3. Зависимость пробивной прочности изоляции кабеля с вязкой пропиткой (кривая *I*) и маслонаполненного кабеля (кривая *2*) от времени действия напряжения.

Электрическая прочность масла в зазоре меньше средней электрической прочности пропитанной изоляции. Поэтому намотку производят так, чтобы избежать наложения зазоров.

В процессе эксплуатации в кабельной изоляции под воздействием высоких температур могут выделяться газовые пузырьки. Особенно этому способствуют переменные тепловые нагрузки кабеля, могущие приводить к образованию вблизи оболочки пустот. Пузырьки газа, диффундируя к поверхности жилы, где напряженность поля максимальная, ведут к снижению длительной электрической прочности изоляции. Это снижение обусловливается процессами ионизационного пробоя (см. § 7-8). Развертка бумажной ленты по месту ионизационного пробоя обнаруживает характерную картину ветвисто расположенных обуглероженных каналов (см. рис. 7-16).

Полное время развития ветвистого разряда может исчисляться месяцами и даже годами. Поэтому «кривая жизни» изоляции кабеля с вязкой пропиткой показывает значительное снижение пробивной прочности со временем (рис. 12-3, кривая 1).



Рис. 12-4. Трехжильный кабель с поясной изоляцией и секторными жилами на напряжение 10 кв.

ин па наприжение то но. 1 — токопроводящая жила: 2 — фазная наоляция; 3 — поясная изоляция; 4 — наподушка под броней, состоящая из бнтумного состава, пропитанной бумаги и пряжи: 7 — броня из двух стальных оцинкованных лент; 8 — наружный защитный покров.



Рис. 12-5. Трехжильный кабель с отдельно освинцованными жилами (типа ОСБ).

1 — токоведущая жила; 2 — экран из полупроводящей бумаги; 3 — бумажная изоляция фазы; 4 — экран из полупроводящей бумаги; 5 свинцовая оболочка с покрытием битумом и двумя прорезиненными битумом и двумя прорезиненными тканевыми лентами; 6 — джутовое заполяение; 7 — брояя яз стальных оцинкованных проволок; 8 — наружный защитный покров.

Конструкция кабеля с вязкой пропиткой и поясной изоляцией показана на рис. 12-4. Жилы кабеля имеют секторную форму, позволяющую с высоким коэффициентом заполнения использовать внутреннюю полость кабеля. Каждая жила имеет фазную изоляцию, повторящуюсекторную форму жилы.

Наружная поясная изоляция охватывает все три фазы. Промежутки между фазной и поясной изоляцией заполнены низкосортным изоляционным наполнителем — корделем (жгуты, скрученные из бумажных, лент). Поверх поясной изоляции накладываются свинцовая оболочка и броня из стальных лент.

Для экономии свинца разработана технология наложения алюминиевых оболочек. Опрессование таких оболочек происходит при температуре 430—450° С, опасной для изоляции кабеля. Поэтому кабели с алюминиевыми оболочками применяются пока только до напряжения 6 кв. Кроме того, алюминий в земле должен защищаться от коррозии антисептированными и герметичными защитными покровами.

Более совершенным, но и более дорогим является кабель с отдельно освинцованными жилами. Конструкция этого кабеля показана на рис. 12-5. Каждая фаза выполнена в виде отдельного коаксиального кабеля, благодаря чему электрическое поле каждой фазы радиально. Неравномерности поля на поверхности токопроводящей жилы, скрученной из тонких проволок, устранены покрытием жилы экраном. Эти 13* мероприятия позволяют почти в 2 раза повысить допустимые напряженности электрического поля по сравнению с напряженностями при кабелях с поясной изоляцией. Свинцовая оболочка на каждой фазе создает независимый теплоотвод от жил. Улучшенный температурный режим позволяет поднять допустимые токовые нагрузки кабеля.

Кабели с поясной изоляцией выпускаются до напряжения 10 кв, кабели с отдельно освинцованными жилами — до напряжения 35 кв. В табл. 12-1 приведены значения толщин изоляции и допустимые напряженности поля для кабелей разных номинальных напряжений и типов.

Таблица 12-1

Номянальное напряжение, кв	Толщина из	воляции, мм	Допустимый градиент, кв/м	
	фазная	поясная		
3 6 10	1,35 2,2 3,0	0,7 1,05 1,4	1,5	
20 35	67 911		2,5-3,0	

Толщина изоляции и довустнмые рабочие напряженности электрического ноля (переменного тока) кабелей с вязкой пропиткой

Для соединения участков кабелей между собой и для концевых выводов применяются соединительные и концевые муфты. Разрез соединительной муфты кабеля 10 кв показан на рис. 12-6. Токопроводящие жилы соединяются пайкой или опрессовкой. Поверх жилы накладывается пропитанная кабельная бумага, которая заливается пропиточной массой в разогретом состоянии. Корпус муфты выполняется герметическим для предохранения кабеля от попадания влаги. Вся



Рис. 12-6. Свинцовая соединительная муфта кабеля 10 кв. 3 — соединяемые отрезки кабелей; 2 — свинцовая оболочка кабеля; 3 — корпус муфты; 4 — изолированная жила кабеля; 5 — токонроводящая жила; 6 — соединительная гильза; 7 — подмотка роликами; 8 — подмотка рузоваеми; 9 — бандаж из хлопчатобумажной ленты поверх трех изолированных рулонных жив.; 10 — запанваемое отверстие для заливки муфты; 11 — заливка компаундой массы.

муфта помещается в чугунный кожух для защиты от механических повреждений. Монтаж соединительных (и концевых) муфт производится на месте прокладки кабеля силами монтажного персонала, т. е. в условиях, значительно отличающихся ст заводских. Ввиду этого для изоляции муфт допускаются значительно меньшие рабочие градиенты, чем для изоляции самого кабеля (в 1,75—2,25 раза). Но даже при этих облегченных условиях кабельные муфты являются наиболее слабым местом в изоляции всей кабельной линии ввиду вероятных дефектов монтажа. Одним из действенных средств повышения эксплуатационной надежности кабельных муфт является использование для их заливки эпоксидных смол, обладающих высокой электрической прочностью.

196

Условия монтажа требуют иногда вертикальной прокладки кабеля. Если расстояние по вертикали превышает 15—5 *м* соответственно для кабелей 6—35 *кв*, то прокладка кабелей с нормальной вязкой пропиткой недопустима: из кабеля вытекает пропитка и деформируется свинцовая оболочка. Для вертикальных прокладок применяются кабели с осушенной (обедненной) пропиткой. Изоляция таких кабелей подвергается обычной технологической обработке, но затем подвергается дополнительному нагреву, в течение которого примерно 70% пропиточной массы вытекает из кабеля. Вследствие ухудшенной пропитки допустимые рабочие градиенты снижаются и толщина изоляции осушенных кабелей должна быть увеличена.

В настоящее время начато производство кабелей для вертикальных прокладок с пропиточной массой, не стекающей даже при высоких температурах нагрева. Такая пропиточная масса производится на основе синтетических смол.

12-4. МАСЛОНАПОЛНЕННЫЕ КАБЕЛИ

Для кабелей напряжением выше 35 кв вязкая пропитка недостаточно эффективна. Поэтому для напряжений 110 кв и выше применяются маслонаполненные кабели, в которых пропитка бумажной изо-

осуществляется ляции жидким кабельным маслом. Конструкция однофазного маслонаполненного кабеля показана на рис. 12-7. На заводе изоляция кабеля тщательно сушится под вакуумом и заполняется маслом. Постоянная подпитка изоляцик кабеля в процессе его эксплуатации ocyществляется маслом, поступающим из масляного канала в центре токопроводящей жилы через зазоры в жиле. Для этого масло всегда поддерживается под некоторым избыточным давлением ризс. Данный способ практически устраняет ионизационные процессы в изоляции, связанные с появлением газовых пузырьков, что позволяет резко повысить допустимые рабочие градиенты. Поэтому «кривая жизни» маслонаполненного кабеля име-



Рис. 12-7. Маслонаполненный однофазный кабель среднего давления на напряжения 110—220 кв марки МССК-4.

1 — маслопроводящий канал; 2 — токопроводящая жила; 3 экрая из трех лент полупроводящей бумаги; 4 — изоляция из бумаги толщиной 0.075 и 0.125 мм; 5 — экран из трех лент полупроводящей бумаги: 6 — оболочка из медистого свинца; 7—11, 13 — защитные покровы: 12 — броия из стальных и медных проволок.

ет пологую форму (рис. 12-3, кривая 2).

Маслонаполненные кабели выполняются низкого (p_{m36} до 1 *ат*), среднего ($p_{m36} \approx 3 \div 5$ *ат*) и высокого ($p_{1:25} = 10 \div 14$ *ат*) давления. С повышением номинального напряжения кабеля целесообразно перехо-

дить на все более высокие давления масла, что позволяет повысить рабочие градиенты и уменьшить внешний диаметр кабеля (табл. 12-2).

Маслонаполненные кабели на сверхвысокие напряжения и большие токи выполняются обычно однофазными, что позволяет получить приемлемый внешний диаметр, умеренный вес и достаточную гибкость. Кроме того, однофазный кабель обладает улучшенной теплоотдачей. Если требуемое сечение жилы кабеля не очень велико, вместо трех



Рис. 12-8. Плоский трехфазный маслонаполненный кабель.

1 — изолированные фазы кабеля, проложенные параллельно: 2 — общая свинцовая оболочка; 3 — покров поверх свинцовой оболочки из битума, пропитанной бумаги и медных лент; 4 — пружинящие гофрированные броизовые полоски; 5 бандаж из медных проволок; 6 — антикоррозийные покровы из битума, гофрированной бумаги, резины и жгута; 7 проволочная броия. однофазных кабелей целесообразно использовать более дешевый трехфазный кабель, в котором масляные каналы располагаются в пространстве между фазами и оболочкой.

Маслонаполненные кабели должны храниться, транспортироваться И прокладываться с избыточным давлением масла; только при этом условии можно избежать попадания воздуха в изоляцию кабеля. Для поддержания постоянного давления в проложенном маслонаполненном кабеле вдоль его трассы располагаются баки давления и стопорные муфты. Бак давления представляет собой герметически закрытый сосуд, в котором находятся упругие элементы, заполненные газом под давлением. Упругие мембраны оказывают на газ постоянное давление при изменении температуры и изменении объема масла. Стопорные муфты раздекабель ляют на ряд участков, независимо питаемых ОТ баков дав-

ления. Чтобы сохранить постоянное давление на всех участках кабельной линии, стопорные муфты и подпитывающие пункты приходится сооружать на расстоянии 0,7—1,5 км друг от друга (в зависимости от профиля трассы); это является существенным недостатком маслонаполненных кабелей. Возникновение утечки масла является опасной по своим последствиям аварией для маслонаполненного кабеля, поэтому подпитывающие пункты снабжаются сигнализаторами падения давления в кабеле и дифференциальными манометрами, показания которых позволяют рассчитать местонахождение утечки на трассе.

Естественна идея перенесения упругих мембран в конструкцию самого кабеля. Такая идея осуществлена в конструкции трехфазного

Таблица 12-2

Толщины изоляции и рабочие напряженности поля (переменного тока) для маслонаполненных кабелей

Housenerge	Кабели низкого и	среднего давления	Кабели высокого давления		
напряжение, кв	Толщина взоля- цев. кв	Рабочел граднент, Толщяна изоля- ка/мм цен, мм		Рабочий градиент, кв/мм	
35 110 220 500	5-3,5 12-9,5 22-16 -	4.7-6.7 6.1-6.4 6.7-9.2	 18—12 28—24		

плоского самокомпенсирующего маслонаполненного кабеля (рис. 12-8). Кабель состоит из трех изолированных и экранированных жил в общей свинцовой или алюминиевой оболочке с двумя плоскими сторонами. На эти стороны оказывают постоянное давление тонкие пружинящие бронзовые полоски (на рис. 12-8 они зачернены), поддерживающие постоянное давление масла в кабеле. Так как для данного кабеля не требуются аппараты подпитки, он очень удобен для прокладки на подводных трассах.

Недостатком маслонаполненных кабелей является повышение вязкости масла и, следовательно, ухудшение качества пропитки при низ-

ких температурах. Поэтому рекомендуется, чтобы температура грунта, в котором прокладывается кабель, была бы не ниже 0° С или по крайней мере — 5° С. Это требование ограничивает применение маслонаполненных кабелей в северных районах страны.

12-5. ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ КАБЕЛИ

По конструкции газонаполненные кабели (рис. 12-9) аналогичны маслонаполненным, но с тем существенным отличием, что высокая электрическая прочность поддерживается не маслом, а газом под давлением. Газ, поступающий через каналы в жиле, создает в бумажной изоляции с обедненной масляной про-



Рис. 12-9. Одножильный газонаполненный кабель среднего давления марки ГСП для сети напряжением 35 кв.

I — газопроводящий канал; 2 — медная токопроводящая жила; 3 — экран по жиле и по язоляцки из полупроводящих бумаг; 4 — изоляция из бумаги толщиной 0,075 и 0,125 мм; 5 — оболочка из медистого свинца; 6, 8 — защитные покровы; 7 — броня из плоских проволок.

питкой давление, которое повышает напряжение нонизации.

В СССР газонаполненные кабели низкого (p<1,5÷2 at) и среднего (p=3÷6 at) давления изготовляются на напряжение 35 кв; за границей газонаполненные кабели применяются до напряжения 275 кв. В качестве газа обычно применяется азот, осушенный и очищенный от

примесей. Добавка к азоту элегаза (в размере 20%) повышает электрическую прочность изоляции газонаполненного кабеля до уровня прочности маслонаполненного кабеля.

На трассе газонаполненного кабеля также необходимы стопорные (точнее — полустопорные) муфты и пункты подпитки, содержащие баллоны со сжатым газом. Однако вся эта арматура значительно проще и дешевле, чем у маслонаполненных кабелей. Ввиду малого удельного веса газа перепад высот кабельной трассы не создает опасности перетекания изолирующей среды в низшую точку кабеля, что выгодно отличает газонаполненные кабели от маслонаполненных или кабелей с вязкой пропиткой.

Электрическая прочность газов и соответственно газонаполненных кабелей зависит от температуры. Естественно, что допустимые градиенты должны определяться исходя из максимальной температуры кабеля в рабочем режиме. С другой стороны, благоприятным фактором является отсутствие ограничений в отношении работы газонаполненных кабелей при низких температурах.

12-6. КАБЕЛИ В СТАЛЬНЫХ ТРУБАХ С МАСЛОМ ИЛИ ГАЗОМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Высокие давления, около 15 *ат*, могут поддерживаться в кабелях, проложенных в стальных трубах, наполненных маслом или газом (рис. 12-10). В трубах протягиваются все три фазы кабеля. Так как



Рис. 12-10. Кабель на напряжение 220 кв в стальной трубе с маслом под давлением.

1-токопроводящая жила одножильного кабеля; 2изоляция из бумаг разлячной плотности и толщины; 3медные перфорированные ленты; 4-полукруглые проволоки скольжения; 5-масло: 6-стальная труба; 7антикоррозийный защитный покров.

стальная труба надежно защищает кабели от механических повреждений, то внешняя оболочка кабелей выполняется облегченной — из медной ленты, поверх которой накладывают круглые проволоки илн сплошную броню скольжения. Свинцовая оболочка накладывается только на период хранения и транспортировки кабелей; перед монтажом кабеля она снимается.

Кабельные линии в стальных трубах выполняются на высших номинальных напряжениях — 110 кв и выше. Рабочие градиенты и толщнны изоляции кабелей с маслом давлением под приведены В табл. 12-3B кабеле 500 кв рабочне градиенты почти вдвое превышают допустимые градиенты для маслонаполненного кабеля среднего давления.

На кабельных линиях рассматриваемого типа благодаря большому поперечному сечению масло- или газопровода подпитывающие пункты могут располагаться на расстояниях 10—15 км. Поэтому стоимость кабельных линий в стальных трубах даже несколько меньше стоимости масло- или газонаполненных кабелей. Некоторым недостатком кабелей в стальных трубах с газом под давлением является ухудшенный теплоотвод, снижающий их допустимую токовую нагрузку. Таблица 12-3

12-7. КАБЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Бумажно-пропитанная изоляция обладает высокой электрической прочностью при постоянном напряжении (см. § 7-8), что позволяет довести рабочие напряженности в такой изоляции до 25—35 кв/мм. Благодаря высоким значениям допусти-

Номинальное	Толщина	Рабочна	
напряжение,	изоляции,	градвент,	
кв	мм	кв/мм	
110	12	6,1	
220	18	8,2	
500	28,5	10,6	

Толщины изоляции и рабочие напряженности поля (переменного

тока) однофазных кабелей

в стальных трубах с маслом

под давлением

мых градиентов кабели постоянного тока имеют сравнительно малые толщины изоляции. В частности, кабель постоянного тока с вязкой пропиткой на напряжение 220 кв имеет ту же толщину изоляции, что и кабель переменного тока 35 кв.

На постоянном токе распределение напряжения происходит по проводимостям, и поэтому даже незначительные примеси и неоднородности в изоляции ведут к резкому снижению электрической прочности. Вследствие этого для кабелей постоянного тока особое значение имеет чистота выполнения изоляции.

Существенной особенностью работы изоляции кабеля на постоянном токе является сильное влияние на распределение градиента по поперечному сечению кабеля температурного перепада между жилой и оболочкой. Это влияние обусловлено значительным уменьшением удельного сопротивления бумажно-масляной изоляции при ее нагреве. Поэтому при перегреве жилы кабеля относительно оболочки на 50° С градиент напряжения у оболочки превышает градиент напряжения у жилы примерно в 1,5 раза, в то время как на переменном токе градиент напряжения у жилы в 1,5—2 раза выше, чем у оболочки.

Учитывая высокую прочность кабельной изоляции на постоянном токе, представляется технически возможным изготовление кабелей постоянного тока на напряжения в несколько мегавольт, особенно при использовании наиболее совершенных диэлектриков. Вполне вероятно, что вследствие ограниченной электрической прочности воздушной изоляции не воздушные, а именно кабельные линии постоянного тока будут использованы для электропередачи огромных мощностей на дальние расстояния. Одна из возможных конструкций линий для этой цели показана в § 12-8.

12-8. ЛИНИИ В ТРУБАХ С ГАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Применение газов под давлением в стальных (при пластмассовых) трубах принципиально позволяет осуществить конструкцию линии, соединяющей в себе черты воздушной и кабельной линий. Подобная конструкция показана на рис. 12-11, а. Линия представляет коаксиальный кабель с газовой изоляцией. Центральная токопроводящая труба выполняется большого диаметра для предотвращения коронного разряда; труба располагается на изоляторах. При указанных на рис. 12-11, а габаритах кривые разрядных напряжений в зависимости от давления газа показаны на рис. 12-11,6. Как видно из кривых, на постоянном токе при коэффициенте запаса 1,6—1,7 достижимы рабочие напряжения до 1,4—1,6 *Мв* на полюс. Еще большие напряжения достижимы при увеличении диаметра труб. Существенным достоинством подобных ли-





Рис. 12-11. Коакснальная линия в стальной трубе с газовой изоляцией под давлением.

а — конструкция линин: б — кривые разрядных напряжений в зависимости от давления газов SF₆ и N₂ (по Фильпу). ний является преходящий характер разрядов в газовой изоляции, допускающий быстрое восстановление напряжения. На перспективность подобных линий указывал акад. В. И. Попков.

12-9. КАБЕЛИ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Развитие химической промышленности позволило приступить к широкому производству кабелей с пластмас-совой изоляцией. Наибольшее распространение получили кабели с полиэтиленовой изоляцией, которые изготовляются до напряжения 35 кв. Полиэти- лен обладает рядом преимуществ по С бумажно-пропитанной сравнению Полиэтилен изоляцией. влагостоек. в связи с чем отпадает необходимость в дорогостоящих водонепроницаемых оболочках кабеля. Вес кабеля с полиэтиленовой нзоляцией существенно меньше веса кабелей с вязкой пропиткой. Полиэтилен обладает также очень малыми диэлектрическими потерями. В то же время полиэтиленовая изоляция имеет и недостатки. Вследствие высокого температурного коэффициен-

та расширения и удельной теплоемкости в полнэтиленовой изоляции возникают внутренние напряжения, которые ведут к образованию газо-



Рис. 12-12. Кабель 10 кв с полихлорвиниловой изоляцией. 1 — жила; 2 и 4 — полупроводящие экраны; 3 — полихлорвиниловая изоляция; 5 — медный экран; 6 — полихлорвиниловый шланг; 7 — защитные покровы

вых включений. Вследствие этого для кабеля с полиэтиленовой изоляцией кривые ионизации имеют резкий излом и рабочие градиенты не превышают 2,3 кв/мм. Конструкция кабеля 10 кв с полихлорвиниловой изоляцией показана на рис. 12-12. Каждая фаза покрыта полупроводящим экраном, выполненным из полупроводящего полиэтилена или бумаги. Поверх всех трех фаз наложена химически стойкая полихлорвиниловая оболочка.

12-10. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ КАБЕЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ На кабельную изоляцию

Выделение тепла в кабеле происходит в результате омических потерь в жиле кабеля и диэлектрических потерь в его изоляции. Диэлектрические потери составляют незначительную долю общих потерь в кабелях до 35 кв, но в кабелях СВН эти потери могут достигать и даже превосходить потери в токоведущих жилах. Например, в кабеле 400 кв при tg δ =0,003 диэлектрические потери примерно равны потерям в жилах. Некоторая часть мощности выделяется в виде потерь также в металлической оболочке однофазных кабелей, а в случае кабелей в стальной трубе с маслом или газом под давлением — в стенке трубы.

Нагрев изоляции кабеля до высоких температур приводит к ее ускоренному старению (§ 7-11). В кабелях с вязкой пропиткой высокая температура вызывает высыхание пропиточной массы и как следствие существенное снижение электрической прочности кабеля по отношению к ионизационному пробою. Поэтому для кабелей с вязкой пропиткой максимальные длительно допустимые температуры относительно низки (табл. 12-4). В масло- и газонаполненных кабелях, а также в кабелях в стальных трубах под давлением наиболее чувствительным элементом к термическому старению является бумага; пропитка же бумаги обеспечивается давлением масла или газа в кабеле. Соответственно допустимые температуры для изоляции таких кабелей несколько выше, чем для кабелей с вязкой пропиткой.

Таблица 12-4

Твп кабеля	Номинальное напряжение, ка	Длительно допусти- мая температура кабеля, °С
С вязкой пропиткой	3 6 10 35	80 65 60 50
Маслонаполненные и газонапол- ненные	35 • 110 220	80 70 65
В стальных трубах с маслом под давлением	110 220 500	70 65 60

Длительно допустимые (максимальные) температуры кабелей (у жилы)

Для увеличения срока службы изоляции кабелей их температурный режим стремятся улучшить путем прокладки в условиях наилучшего естественного охлаждения. В этих целях может быть использовано, в частности, затопление водой кабельных каналов. У кабелей в стальных трубах под давлением допустимая токовая нагрузка и срок службы могут быть повышены за счет создания циркуляции масла (или газа) внутри трубы с его прогонкой через теплообменник. При выполнении блоков мощностью 800—1 000 Мвт с кабельными перемычками между генератором и трансформатором необходимы кабели очень высокой пропускной способности. Такие кабели могут быть созданы путем использования внутреннего водяного охлаждения, для чего в токоведущей жиле предусматривается герметизированный водяной канал. Концевые муфты такого кабеля снабжаются изолирующими трубками, по которым выведенная из кабеля и находящаяся под высоким потенциалом вода сливается в резервуар или водопровод, находящийся на потенциале земли. Расход воды определяется требуемой токовой нагрузкой.

12-11. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ И ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЕЙ

В эксплуатации кабели подвергаются воздействию рабочего напряжения, коммутационных перенапряжений и в случае электрической связи с воздушными линиями — импульсным перенапряжением. Уровни изоляции кабелей задаются их испытательными напряжениями. При типовых испытаниях к кабелям прикладывается напряжение промышленной частоты и импульсное напряжение (табл. 12-5).

При контрольных испытаниях электрическая прочность образцов кабеля проверяется приложением повышенного напряжения постоянного тока. Испытательное напряжение постоянного тока принимается рав-

Таблица 12-5

Испытательные напряжения силовых кабелей

í	Испытательное напряжение				
Номинальное напряжение, <i>кв</i>	переменное при 50 гц, ^{Кв} действ	импульсное (полная волна), ^{КЗ} макс			
1-10	$2.2U_{\rm p} + 1$				
20	40	-			
35	65	1 —			
110	250	550			
220	550	950			
500	850	1 500			

ным $5U_{\phi,n}$ (для кабелей с обедненной изоляцией и газовой пропиткой 3,5—4 $U_{\phi,n}$). В объем заводских испытаний кабелей входит также измерение сопротивления изоляции, угла диэлектрических потерь, в частности кривой ионизации [кривой tg $\delta = f(U)$].

Важное значение имеют профилактические испытания кабелей в эксплуатации. Особенно это касается кабелей с вязкой пропиткой, в которых возможно медленное развитие ветвистого разряда и увлажнение, вызванное дефектами монтажа. В среднем срок развития дефек-

тов в кабелях с вязкой пропиткой составляет 1-1,5 года. Цель профилактических испытаний заключается в выявлении дефектных мест и их устраненни при ремонте кабельной линии. Профилактические испытания проводятся путем приложения повышенного постоянного напряжения. Выбор постоянного, а не переменного испытательного напряження обусловлен рядом обстоятельств. При воздействии постоянного напряжения в кабельной изоляции не возникают остаточные повреждения в виде обугливания или подсыхания, даже если приложенное напряжение близко к пробивному. Поэтому для здоровой изоляции можно выбрать очень высокие испытательные напряжения постоянного тока. Эти высокие напряжения способны вызвать электрический пробой в местах с ослабленной изоляцией. Из изложенного следует, что испытательное постоянное напряжение обладает избирательной способностью к выявлению местных сосредоточенных дефектов. Другим преимуществом постоянного испытательного напряжения является возможность применення маломощного испытательного оборудования. При большой емкости

кабеля испытание на переменном напряжении потребовало бы испытательных трансформаторов относительно большой мощности.

В энергосистемах Советского Союза всестороннему исследованию был подвергнут вопрос об уровнях испытательных напряжений кабелей 3—10 кв (работы ОРГРЭС). Выбор этого уровня основывается на величинах коммутационных перенапряжений порядка 2—2,5 $U_{\rm H}$ которые, естественио, не должны вызывать пробоя кабеля. При переходе к постоянному напряжению следует учитывать коэффициент упрочнения $k_{\rm ymp} = U_{\rm mp} - /U_{\rm mp}$, который можно принять равным 3,5—4. Отсюда находим уровень испытательного напряжения:

$$U_{\rm HCII} = (2 \div 2,5) U_{\rm H} k_{\rm VIIID} = (7 \div 8) U_{\rm H}$$

Эти весьма высокие испытательные напряжения вводились в практику эксплуатации кабельных сетей в течение ряда лет. Чем выше ис-



Рис. 12-13. Схема испытания кабеля выпрямленным напряжением. 1 — кенотронная установка; 2 — испытываемый кабель; 3 — микро- или миллиамперметр; 4 — разрядная цепь; 5 — шунт гальванометра.

пытательное напряжение, тем больше случаев пробоя (отбраковки) кабелей при испытаниях, но тем меньше пробоев кабеля в рабочих режимах. Очевидно, существует некоторый оптимум в зачении $U_{\rm исп}$, определяемый технико-экономическими расчетами. Этот оптимум как раз и лежит около значений $(7 \div 8) U_{\rm H}$. В настоящее время в большинстве энергосистем применяется испытательное напряжение $(6 \div 7) U_{\rm H}$ (35— 40 кв для кабелей 6 кв). Кабели 110 кв и выше, включаемые в системы с заземленной нейтралью, испытываются согласно рекомендациям МЭК повышенным постоянным напряжением $4U_{\rm dm}$.

Схема испытания кабельных линий показана на рис. 12-13. Источником испытательного напряжения служит кенотронная установка. Испытанию повышенным напряжением подвергается изоляция фаз относительно земли и между собой. Длительность испытаний составляет 10— 15 мин. Часто одновременно с испытанием повышенным напряжением производится замер токов проводимости (утечки). Сопоставление с данными предыдущих замеров позволяет в ряде случаев судить о проникновении влаги в кабель и вынести решение о повышении испытательного напряжения (в данном испытании) или о сокращении срока между испытаниями.

Место пробоя дефектной изоляции кабеля должно быть обнаружено. Для этого кабель или, точнее, канал пробоя прожигается с помощью газотронной установки. Когда сопротивление канала пробоя снижается до десятков ом, с помощью специальной измерительной аппаратуры определяется расстояние до места повреждения кабеля. Учитывая, что для ремонта кабеля производятся раскопки, место повреждения следует определять с большой точностью. В больших кабельных сетях все испытательное оборудование, включая кенотронную и газотронную установки, а также оборудование для определения мест повреждения кабеля, смонтировано в передвижных лабораториях.

12-12. ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 3—10 кв (кабели с вязкой пропиткой)

Повреждаемость в кабельных сетях благодаря систематическим профилактическим испытаниям кабелей падала из года в год и в настоящее время составляет по данным Мосэнерго примерно 6—7 пробоев на 100 км в год. Пробои кабелей возникают примерно в 60% случаев в «целом» месте кабеля и в 40% случаев в кабельных муфтах. Причинами повреждений являются развитие ветвистого (ионизационного) разряда, увлажнение соединительных и концевых муфт вследствие дефектов их конструкции или монтажа, механические повреждения кабелей при раскопках, пробои под воздействием перенапряжений.

Кабельные сети напряжением до 35 кв имеют резонансно заземленную нейтраль. Дугогасящие катушки устанавливаются в ряде точек сети с таким расчетом, чтобы при случайных делениях сети не оказалось участков без компенсации. Систематические наблюдения за развитием повреждений в кабельной сети Мосэнерго проводились А. Н. Фотием. По его данным примерно в 50% случаев повреждения в кабелях однофазные. Устойчивые однофазные замыкания обычно развиваются после большого числа кратковременных замыканий. При каждом таком проходящем замыкании через интервал в несколько периодов происходит гашение дуги емкостного тока и частичное восстановление электрической прочности кабеля в месте пробоя. Число проходящих замыканий в одном и том же месте может достигать десятков и даже сотен. Однако после каждого проходящего замыкания электрическая прочность кабеля снижается, так что в конечном счете все же возникает устойчивое замыкание и кабельная линия отключается дежурным персоналом или автоматически. Длительная работа при устойчивом замыкании на землю опасна из-за возможности двойного замыкания на землю. Действительно, при устойчивом замыкании на одной из фаз напряжения на других фазах повышаются до линейного, а при неустойчивом горении дуги возникают коммутационные перенапряжения (см. гл. 27). С другой стороны, весьма вероятно, что на других фазах также возникли проходящие замыкания. При наличии устойчивого замыкания на одной фазе первое же такое замыкание на другой фазе поведет к двойному короткому замыканию в разных точках сети, которое иногда приводит к серьезным аварням. Вероятность коротких замыканий на землю в разных точках составляет примерно один случай на 300 км кабеля в год.

Вопросы для самопроверки

 Опишите строение изоляции кабелей: а) с вязкой пропиткой; б) маслонаполненных; в) газонаполненных; г) в трубах под давлением. При изложении используйте рисунки, приведенные в тексте.

2. Укажите допустимые рабочие градиенты в изоляции кабелей разных типов и объясните связь конструкции кабелей с допустимыми градиентами.

3. Объясните развитие ветвистого разряда в изоляции кабеля с вязкой пропиткой. Каким путем в эксплуатации выявляются далеко зашедшие, но еще не вызвавшие пробой кабеля ветвистые разряды?

4. Какие факторы ограничивают длительную температуру кабеля? Укажите значения этих температур. В каком месте кабельной изоляции температура максимальна? Как влияет теплопроводность грунта на нагрев кабеля?

5. Опишите методику профилактических испытаний кабелей. Укажите значения испытательных напряжений при профилактике кабелей с вязкой пропиткой и маслонаполненных и дайте обоснование принятым значениям.

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

В пятом разделе изучаются конструкции и характеристики применяемой в системах высокого напряжения изоляции (изоляторов, аппаратов, трансформаторов и генераторов). Сведения, излагаемые в этом разделе, в основном рассчитаны на подготовку инженера-электроэнергетика, для которого основное значение имеют не технологические особенности изготовления, а знания конструктивных особенностей и условий эксплуатации оборудования, в частности изоляции этого оборудования.

В отличие от изоляции линий уровни изоляции подстанционного оборудования в СССР стандартизированы и выражаются нормированными испытательными напряжениями, установленными для каждого номинального напряжения. В гл. 13 излагаются основные принципы выбора этих испытательных напряжений — так называемой координации изоляции.

Г.лава тринадцатая

уровни изоляции подстанционного оборудования

13-1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КООРДИНАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ

Уровни подстанционной изоляции координируются с воздействующими на нее грозовыми и внутренними, в частности коммутационными, перенапряжениями и максимальным рабочим напряжением. Грозовые и внутренние перенапряжения ограничиваются по амплитуде вентильными разрядниками (PB), которые являются основным аппаратом защиты подстанционной изоляции.

В СССР результаты работы по координации изоляции закрепляются в ГОСТ, который устанавливает испытательные напряжения для оборудования каждого класса напряжения. По мере совершенствования разрядников ГОСТ пересматривается.

В США уровни изоляции оборудования не связываются непосредственно с номинальным напряжением, а выбираются по многоступенчатой шкале в зависимости от защитных характеристик PB, которые можно установить в данной точке сети. Такой метод позволяет более гибко и экономично осуществить выбор оборудования, но требует значительного расширения его номенклатуры.

13-2. КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО АТМОСФЕРНЫМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ

Импульсные испытательные напряжения подстанционного оборудования выбраны таким образом, чтобы в схемах подстанций, защищенных PB, не происходило повреждения изоляции волнами атмосфер-

ных перенапряжений. Нормируемые импульсные испытательные напряжения представлены в табл. 13-1.

Таблица 13-1

Импульсные испытательные напряжения электрооборудования

А. Классы напряжения 3-220 кв с нормальной изоляцией

Класс Максимальное напря- жевия, напряжение, кодейств Кодейств		Испытат ввутренн	сельные напряжения ей изоляции, <i>ко_{макс}</i>	Испытательные напряження внешней изоляции, ке _{мине}		
		Силовые трансформа- торы, трансформаторы напряжения и шунти- рующве реакторы, вспытываемые без возбуждения		Полностью собран- ные аппараты и трансформаторы	Изоляторы, испытываечые отдельно	
3	3,6	42	43,5/50	42/50	44/52	
6	6,9	57	60/70	57/70	60/73	
10	11,5	75	80/90	75/90	80/100	
15	17,5	100	108/120	100/120	105/125	
20	23	120	130/150	120/150	125/158	
35	40,5	180	200/225	185/230	195/240	
110	126	425	490/550	460/470	480/600	
150	172	585	660/760	630/785	660/825	
220	252	835	945/1 090	900/1130	950/1 190	

Б. Классы напряжения 330-750 кв

	ouce	Испытательные напряжения внутренней			Испытательные напряжения внешней			
	cra	изоляции, <i>из</i> макс			изоляции, ке _{макс}			
Класс цапряжелия. кедейств	Максимальное раб напряжение, ка _{де}	Аппараты	Трансформа- торы напря- жения и шун- тирующве реакторы, вспытывае- мые без воз- буждения	Силовые траясформа- торы, вспыты- ваечые без возбуждения	Полностью собранные аппараты, трансформа- торы изпря- женяя и реак- торы	Силовые трансфор- маторы	Изоляторы, испытывае- мые отдельно	
3 3 0	363	1 100/1 300	1 200/1 300	1 050/1 150	1 150/1 350	1 000/1 250	1 200/1 400	
500	525	1 500/1 800	1 675/1 800	1 550/1 650	1 500/1 800	1 350/1 700	1 500/1 800	
750	787	2 100/2 600	2 300/2 500	2 175/2 300	2 100/2 600	1 900/2 350	2 100/2 600	

Примечания: 1. Значения импульсных испытательных напряжений указаны: в числителе — полной волны, в знаменателе — срезаниот волны.

Испытательные напряжения указаны: для классов 3-220 кв в соответствие с ГОСТ 1516-60, для классов 330-750 кв по предварительным дзиным ВЭИ.
Испытательные напряжения внешией изоляции даны для оборудования, располагаемого на высо-

те: для классов 3-330 кв-до 1 000 м, для классов 500 в 750 кв-до 500 м над уровнем моря.

Испытания проводятся на полной и срезанной волнах. В табл. 13-1 приведены амплитуды испытательных волн, в числителе — полной волны, в знаменателе — срезанной волны. Полная волна имеет стандартную форму (1,5/40 *мксек*); срезанная волна представляет стандартную волну, срезанную при $t_p = 2 \div 3$ *мксек*. Импульсные испытания проводятся как типовые. Согласно ГОСТ 1516-60 число воздействий на каждой полярности импульса равно трем (трехударный метод испытания). Уровни испытательных напряжений устанавливаются раздельно для внутренней и внешней изоляции.

Для трансформаторов и реакторов указываются значения импульсных испытательных напряжения без возбуждения рабочим напряжением. Роль возбуждения будет рассмотрена в § 16-4. Для полных волн § 13-2] Координация изоляции по атмосферным перенапряжениям

$$U_{\text{HCH. C}} = U_{\text{HCH. Ger Bosssymmed}} - \frac{U_{\text{R}}}{2},$$

где U_н — в киловольтах действующих (кв_{действ}).

Возбуждение не влияет на испытательные напряжения срезанной волны. Так как в эксплуатации трансформаторы возбуждены, то импульсные напряжения должны ограничиваться до значений U_{исп} с возбуждением.

Форма испытательных импульсов полной и срезанной волн не соответствует реальным формам волн, воздействующим на изоляцию. Типичная форма такой волны показана на рис. 13-1 пунктиром. Поэтому для изоляции предложены графики импульсных уровней, в которые должны вписываться воздействующие волны типовой формы. Для



Рнс. 13-1. График импульсного уровня силовых трансформаторов.



трансформаторов такой график показан на рис. 13-1. Амплитудное значение $U_{\rm MR}$ дано в табл. 13-2. Значения $U_{\rm MR}$ лежат между $U_{\rm исп}$ полной и срезанной волн. При временах $t_{\rm p}=2\div3$ мксек кривая плавно снижается до $U_{\rm исп}$ полной волны (при $t_{\rm p}\approx8$ мксек). При t=0 допускается напряжение только порядка $1/3U_{\rm MR}$. Такое снижение объясняется боязнью повреждения витковой изоляции в катушках при воздействии очень крутых волн. На рис. 13-1 в график вписана типовая волна на изоляции (построение проведено для одного и того же класса напряжения); из рисунка видно, что волна не выходит за пределы графика и, следовательно, изоляция трансформатора защищена.

Таблица 13-2

U _в , кв	35	11 0	150	220	33 0	500
U _{мд} , кв	210	470	650	920	975	1 430
- mg,						

Значения U_{мд} в графике на рис. 13-1

Примечание. График на рвс. 13-1 построен для изоляции класса 220 кв и ниже: для изоляции класса 330 кв и выще использование графика на рис. 13-1 имеет орментировочный характер.

Указанные в табл. 13-2 границы графика импульсных уровней допустимы при малом числе воздействий (примерно 5—6), что соответствует числу приложения испытательной волны в типовых испытаниях. Но и в эксплуатации максимальные воздействия, соответствующие максимальным токам в РВ и максимальным крутизнам волн, возникают чрезвычайно редко, и за десятки лет число таких случаев будет исчисляться единицами. Это относится к эффективно защищенным подстанциям. Если же по условиям защиты необходимо считаться с возможностью частых максимальных воздействий, то значения, приведенные в табл. 13-2, следует понизить на 10%. Такое понижение обусловлено влиянием коэффициента кумулятивности.

Для внешней изоляции график импульсных уровней показан на рис. 13-2. Он проводится в соответствии с методом построения u-tхарактеристик [формула (5-5)] через точки с координатами $U_{\rm исп. срез. волны,}$ t=2 жсек и $U_{\rm исп. полной волны,}$ t=8 жсек. Приведенные значения относятся к нормальным атмосферным условиям. При иных условиях вводится поправка путем умножения $U_{\rm исп}$ на коэффициент δ/K (см. § 4-14).

13-3. КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО ВНУТРЕННИМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ

Максимальные напряжения на PB при внутренних перенапряжениях определяются пробивным напряжением искрового промежутка PB при рабочей частоте ($U_{np\sim}$). Остаточное напряжение на рабочем сопротивлении PB при воздействии внутренних перенапряжений обычно ниже $U_{np\sim}$. Перепад напряжения между PB и защищаемой изоляцией не возникает.

В современной практике по уровню внутренних перенапряжений, ограниченных $U_{\rm np}$, выбираются испытательные одноминутные напряжения рабочей частоты $U_{\rm всп}$. Величины $U_{\rm всп}$ для внутренней и внешней изоляции приведены в табл. 13-3.

Для внутренней изоляции трансформаторов выбор $U_{\rm Herr}$ производится по формуле

$$U_{\rm HCm} = \frac{U_{\rm np}}{k_{\rm t}} k_{\rm K}, \qquad (13-1)$$

где $k_{\kappa} \approx 1, 1$ — коэффициент кумулятивности;

k_т — коэффициент импульса при пересчете кратковременных внутренних перенапряжений к U_{исп}.



Рис. 13-3. Зависимость коэффициента импульса для внутренней изоляции трансформаторов ог длительности воздействия напряжения.

Для трансформаторной изоляции зависимость k_z от длительности воздействия приведена на рис. 13-3. Хотя обычно внутренние перенапряжения имеют характер коммутационных импульсов с длительностью не более 0,01--0,02 сек, по существующей методике в расчет с осторожностью берется $k_z = 1,35$ при длительности воздействия 1 сек. Кроме испытания фазной изоляции, для классов СВН нормируется испытание междуфазной изоляции, предусматривающее воздействие междуфазных коммутационных перенапряжений.

Координация внешней изоляции с уровнем внутренних (коммутационных) перенапряжений производится по ее прочности под дождем. •

Таблица 13-3

Испытательные напряжения промышленной частоты (50 гц) для электрооборудования

А. Классы напряжения 3—220 кв с нормальной изоляцией

		Испытате	льное напря. изоляции,	жение (одно ^{Ка} действ	Испытательное (выдерживаемое) напряжение при плавном подъеме для внешней изоляции. ««дейст в			
Класс напря- женвя, ^{К8} действ	Макси- мальное рабочее					Всухоч о	Под дождем	
	напря- жение, ^{Ку} действ	напря- женне, ся действ Силовые трансфор- маторы латоры жения каторы жения тока		Аппараты я транс- форматоры тока	Изолято- ры, испы- тываемые огдельно	Аппараты н транс- форма- торы	Изолято- ры, испы- тываемые отдельно	Аппараты, трансфор- маторы и изоляторы наружной установки
3 6 10 15 20 35 110 150 220	3,5 6,9 11,5 17,5 23 40,5 126 172 252	18 25 35 45 55 85 200 275 400	24 32 42 55 65 95 200 275 400	24 32 42 55 65 95 250 320 470	25 32 42 57 68 100 265 340 490	26 34 45 60 70 105 280 355 520	27 36 47 63 75 110 295 375 550	20 26 34 45 55 85 215 290 425

Б. Классы напряжения 330-750 кв (СВН)

Испытательное (выдерживаемое) Испытательное напряжение напряжение при плавном подъеме (одноминутное) взоляция, кадейств для внешней изоляция. «в деяст.в ос рабочее ^{Ка}действ Под В сухом состоянии Класс напряжения. «⁶ тайств дождем Силовые трансформаторы, трансформа-торы напряжения Изоля-Максимальнос напряжение, ка торы, и реакторы Аппа Аппараты, трансфор-Аплараты. RCONTNраты маторы и реакторы Изолятодейств ваемые трансфорры, испыматоры н отдельно тываемые реакторы между отдельно межач на корпус на корпус (на корпус) фазамя фазами 550 330 363 460 575 600 630 670 875 700 1 1 80 850 700 850 525 830 770 770 500 680 950 1 050 900 787 900/800* 950 1 0 5 0 1 7 0 0 750

Примечания: 1. Испытательные напряжения указаны: для классов 3—220 кв — в соответствии ОСТ 1516-60, для классов 330—750 кв — по предварительным данным ВЭИ. 2. Испытательные напряжения внешней изоляции даны для оборудования, располагаемого на высоc FOCT

те: для классов 3-330 кв-до 1 000 м. для классов 500 н 750 кв-до 500 м над уровнем моря. Для класса 750 ка в знаменателе указано вспытательное напряжение автотрансформаторов, сниженное вследствие сниженной разности потенциалов между автотрансформаторно связанными обмот-KAMH.

При заданном уровне возможных внутренних перенапряжений $U_{np} \sim$ испытательное напряжение промышленной частоты для внешней изоляции под ливневым дождем определяется по формуле

$$U_{\mu c \pi} = \frac{U_{\pi p}}{k_{\tau} k_{p}}.$$
 (13-2)

Коэффициент импульса k, в формуле (13-2) определяется по формуле (6-3) в зависимости от отношения U_{ср}/U_{мр} изолятора. С извест-14*

ной осторожностью при составлении норм табл. 13-3 для всех видов внешней изоляции было принято $k_{\tau} \approx 1,1$. Коэффициент k_p представляет собой поправку на отличие атмосферного давления в условиях эксплуатации от стандартного. При высоте расположения подстанции до 500 или 1 000 *м* над уровнем моря значение k_p принимается равным соответственно 0,965 или 0,94. Коэффициент кумулятивности для внешней изоляции равен 1 и потому в формуле (13-2) отсутствует.

Необходимый уровень испытательного напряжения для внешней изоляции в сухом состоянии также можно оценить исходя из амплитуды воздействующих внутренних перенапряжений:

$$U_{\rm Hc\, D\sim} = \frac{U_{\rm np\, \sim}}{\delta/K},\tag{13-3}$$

где δ/K представляет поправку на отличие реальных метеоусловий от стандартных (см. § 4-14). При высоте до 500 и 1 000 *м* над уровнем моря расчетное значение δ/K принимается равным соответственно 0,89 и 0,84. Коэффициент импульса, как и коэффициент кумулятивности, принимается для сухой внешней изоляции равным 1.

Воздействие внутренних перенапряжений может быть приближенно эквивалентировано напряжением не только промышленной частоты, как это принято в ГОСТ 1516-60, но и импульсной волной. Исследования показали, что по тяжести воздействия на внутреннюю изоляцию трансформаторов коммутационные импульсы длительностью 0,01— 0,02 сек и амплитудой $U_{\rm K}$ соответствуют полной импульсной волне 1,5/40 *мксек* с амплитудой $\sim \frac{U_{\rm K}}{0.8}$. Следовательно, испытание полной

волной 1,5/40 *мксек* позволяет координировать внутреннюю изоляцию трансформаторов (а также другие виды изоляции) не только с атмосферными, но и с внутренними перенапряжениями. Этот подход, в частности, принят в США. Возможно также производить испытания непосредственно коммутационными импульсами. Такой способ координации изоляции обсуждается в настоящее время в отечественной печати.

13-4. КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО ДЛИТЕЛЬНЫМ ВНУТРЕННИМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ

В системах, особенно в системах СВН, могут возникать перенапряжения внутреннего характера с длительностью порядка секунд или даже минут. Причиной таких воздействий могут явиться сброс нагрузки,

Т	а	6	л	И	Ц	а	13-4
---	---	---	---	---	---	---	------

Нанмевование оборудования	Допустимые повышения напряжения в кратностях к U _d , на подстанционной изоляции при длительности воздействия				
	1 cer	20 сек	до 10 мин	до 20 мин	до 6) мин
Силовые трансформаторы и автотранс- форматоры	2,0	1,3	1,2	1,15	1.1
Шунтирующие реакторы в однофазном исполнении	2,0	1,4	1,25	1,2	1,15
Трансформаторы напряжения электромаг- нитного типа	2,0	1,5	1,3	1,25	1,2
Трансформаторы тока, конденсаторы свя- зи, вводы масляных выключателей и прочие аппараты	2,0	1,6	1,45	1,4	1.3

Примечание. Табличные значения указаны по данным проекта Руководящих указани? для оборудования 500 кв.

неправильная работа регуляторов напряжения, односторонний разрыв передачи и т. д. Амплитуды и длительности этих перенапряжений ограничиваются схемными мероприятиями и автоматикой, причем в некоторых случаях, например по условиям синхронизации передачи, продолжительность перенапряжений достигает десятков минут. Ориентировочно допустимые значения перенапряжений в зависимости от нх длительности указаны в табл. 13-4. Эти значения определяются внутренней изоляцией трансформаторов и аппаратов; поэтому они независимы от атмосферных условий.

13-5. КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО РАБОЧЕМУ НАПРЯЖЕНИЮ

Эта форма координации основывается на изучении изоляции при длительном воздействии напряжения, для внутренней изоляции, в частности, — путем измерения частичных разрядов в изоляции (см. §8-7). По мере того как совершенствуются защитные характеристики вентильных разрядников и снижаются воздействующие грозовые и коммутационные перенапряжения, уровни внутренней изоляции оборудования все в большей степени определяются рабочим напряжением. Улучшение изоляционных характеристик достигается применением более совершенных изоляционных материалов, совершенствованием технологии изготовления изоляции, а также улучшением конструкций изоляции в отношении распределения электрического поля и охлаждения.

Важной проблемой является разработка надежной методнки испытаний внутренней изоляции трансформаторов и аппаратов на длительные воздействия. Сложность задачи заключается в том, что «кривая жизни» внутренней изоляции имеет падающий характер даже при длительностях воздействия напряжения порядка 104 ч; между тем, ясно, что такое продолжительное испытание изоляции практически неприемлемо.

Со снижением уровней атмосферных и внутренних перенапряжений рабочее напряжение начинает определять также и требования к внешней изоляции. Уровни последней определяются нормированием удельной длины пути утечки в соответствии с табл. 6-1.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Постройте графики импульсных уровней для класса напряжения 110 кв в пред-

положении, что через РВ могут часто протекать предельные токи. 2. Определите по данным табл. 13-3 допустимую амплитуду коммутационных перенапряжений для установок 220 кв.

3. По данным табл. 13-2-13-4 постройте обобщенную вольт-временную характеристику трансформаторной изоляции 220 кв в пределах от 1 мксек до 1 ч.

Глава четырнадцатая

СТАНЦИОННО-АППАРАТНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

14-1. ВИДЫ СТАНЦИОННО-АППАРАТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

На станциях и подстанциях, кроме изоляторов линейного типа, используемых для монтажа ошиновки в открытых распределительных устройствах (РУ), применяются изоляторы, которые можно объединить под общим названием станционно-аппаратных. Эти изоляторы можно разделить на два основных вида: опорные и проходные. Опорные изоляторы используются для крепления шин в закрытых и открытых РУ и в аппаратах, например в качестве опорно-изолирующих конструкций

разъединителей. Проходные изоляторы используются в закрытых РУ для прохода токопроводов через стены и в трансформаторах и аппаратах — для ввода напряжения в металлический бак (такие изоляторы поэтому часто называются вводами).

Опорные изоляторы выполняются обычно фарфоровыми. В конструкциях проходных изоляторов основной изоляцией служит фарфор, масло-барьерная или бумажно-масляная изоляция.

14-2. ОПОРНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Конструктивно опорные изоляторы выполняются стержневыми и штыревыми.

Стержневые опорные изоляторы. В этих изоляторах фарфоровый стержень служит не только для изоляции, но и в качестве основного



214

Рис. 14-1. Стержневой опорный изолятор типа ОФ-10 для закрытых PУ. 1— тело фарфора; 2— фла-нец; 3— колпачок; 4— про-кладка; 5— цементная связка.



14-2. Рис. Ребра опорных изоляторов наружной установки.

опорного элемента; армировочные детали служат только для крепления фарфорового стержня.

Простейшие изоляторы данного типа, применяемые в закрытых РУ 10 кв, показаны на рис. 14-1. Изолятор имеет воздушную полость, перекрытую фарфоровой перегородкой. Тем самым предотвращается разряд во внутренней полости, и наименьшее разрядное напряжение имеет путь поверх-

ностного перекрытия. Ввиду отсутствия атмосферных осадков ребра на поверхности изолятора развиты слабо и имеют целью повысить сухоразрядные напряжения изолятора. Наибольшие размеры имеет ребро у высоковольтного электрода, где напряженность поля особенно высока и откуда начинается развитие разряда (см. § 6-2).



14-3. Опорностержневой изоля-

тор СТ-110.

Рис.

Опорные изоляторы, предназначенные для наружной установки, имеют развитые ребра, существенно повышающие мокроразрядное напряжение. Форма ребер показана на рис. 14-2. Края ребер отогнуты книзу, образуя так называемую капельницу. Вода с капельницы скатывается, как показано на рисунке жирными стрелками, оставляя поверхность нижних ребер сухой. При наклонном дожде верхние ребра частично защищают от влаги нижние. Оптимальное соотношение между вылетом ребра *a* и расстоянием между ребрами *l* лежит в пределах

 $0,5 < \frac{a}{t} < 1.$

На напряжениях 35 кв и выше в настоящее время применяются опорные изоляторы в виде сплошных фарфоровых стержней (рис. 14-3).

Такие изоляторы наиболее просты в изготовлении и обладают минимальным весом. На сверхвысоких напряжениях 330 кв и выше колонки изоляторов оказываются столь высокими, что для снижения изгибающих усилий приходится выполнять составные конструкции из нескольких колонок изоляторов.

Рациональную конструкцию имеют стержневые изоляторы с винтообразными ребрами (рис. 14-4). Дождевая вода стекает по желобку в ребрах, образуя сплошной водяной канал большой длины на поверхности изолятора. Такой канал равномерно распределяет напряжение по поверхности изолятора, что повышает разрядное напряжение. Изоляторы в одной колонке типа, приведенного на рис. 14-4, некоторые фирмы изготовляют до напряжения 500 кв.

Штыревые опорные изоляторы. В этих изоляторах механическую жесткость всей конструкции создает стальной штырь, на который насаживаются фарфоровые элементы (рис. 14-5). Для штыревых изоляторов открытой установки характерны сильно развитые ребра. Это позволяет выполнять изоляторы небольшой высоты. Поскольку выполнение нескольких сильно развитых ребер в одном фарфоровом изделии затруднительно, фарфор изолятора на напряжение 35 кв составлен из отдельных склеенных между собой элементов. На напряжении 110 кв и выше применяются колонки из штыревых изоляторов.

Механические нагрузки, перпендикулярные продольной оси изолятора (на-

пример, при ветре), создают в его головке скалывающее усилие. Оно особенно велико в нижних элементах колонок изоляторов. Опыт эксплуатаци штыревых изоляторов показал, что для предотвращения их механического повреждения особое внимание должно быть уделено прочности и эластичности армировки верхнего фланца. Изо-



Рис. 14-4. Опорная колонка из изоляторов с винтообразными ребрами для наружной установки. лятор армируется на высших сортах цемента. Для повышения прочности сцепления поверхность фарфора в месте армировки покрывается фарфоровой крошкой. Эластичность армировки, которая необходима для компенсации различного температурного расширения фарфора и мсталла; достигается битумным покрытием фарфора и фланца. Иногда под фланец закладывается эластичная прокладка. Штыревые изоляторы в настоящее время вытесняются более совершенной и экономичной конструкцией опорно-стержневых изоляторов.



Рис. 14-5. Штыревой опорный изолятор типа ОНШ-35 для открытых РУ. 1-металлический штырь: 2-фарфор: 3-металлическая штанга: 4-цемент.

На напряжения 500 кв и выше для одиночных опорных колонок требуются изоляторы весьма высокой механической прочности, изготовление которых представляет большие трудности. В связи с этим в установках напряжением 500 кв и выше применяются опорные конструкции, состоящие из нескольких колонок опорных изоляторов. Обычно применяются конструкции с тремя колонками, образующими конусообразный треножник. В основании, на верхушке и в середине по высоте треножник укрепляется на рамах, скрепляющих все три колонки. Изоляторы в таких конструкциях испытывают механические усилия не только на нзгиб, но и на растяжение и сжатие.

14-3. ПРОХОДНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Проходные изоляторы маркируются не только по номинальному напряжению, но и по номинальному току стержня. По исполнению изоляции различают проходные изоляторы фарфоровые, бумажно-бакелитовые, маслобарьерные и бумажно-масляные. Первые два типа



Рис. 14-6. Проходной фарфоровый изолятор 35 кв с воздушной полостью и покрытием стержня слоем бумаги.
в основном применяются на напряжения до 35 кв включительно; остальные типы применяются на напряжения 110 кв и выше.

Фарфоровые проходные изоляторы. Типичная конструкция фарфорового проходного изолятора с воздушной полостью показана на рис. 14-6. На поверхности стержия, где напряженность поля максимальна, возможно коронирование, что ведет к коррозии стержия и снижает разрядное напряжение по поверхности изолятора. Для устра-

нения коронирования на стержень наносится слой твердой изоляции (бумаги).

Напряженность поля высока также у заземленного фланца вследствие малого расстояния до противоположного электрода стержия. Развитие короны у заземленного фланца предотвращается нанесением на фарфор полупроводящего покрытия, металлически соединяемого с фланцем.

Более компактны и удобны в изготовлении проходные изоляторы без воздушной полости (рис. 14-7), Между фарфоровой стенкой увеличенной толщины и стержнем образуется тонкая воздушная прослойка. Коронирование в ней предотвращается нанесением на внутреннюю поверхность фарфора полупроводящего покрытия, которое соединяется со стержнем. Таким образом, воздушная прослойка полностью разгружается от электрического поля.

Бумажно-бакелитовые изоляторы. Простейшая конструкция такого изолятора для внутренней установки показана на рис. 14-8. На стер-

жень наматывается бумага, пропитанная скленвающим бакелитовым лаком. Внешняя поверхность изолятора покрывается влагостойким лаком. Между слоями бумаги через определенные промежутки закладываются металлизированные обкладки, образующие в теле изолятора многослойный конденсатор. Расстояние между обкладками и их длина выбираются оптимальными для выравнивания радиальных составляющих поля между стержнем и заземленным фланцем и тангенциальных составляющих поля вдоль поверхности изолятора. Условия такого выравнивания были изучены в § 2-6.

Толщина изоляции бумажно-бакелитовых изоляторов определяется условиями теплового пробоя. Для напряжений до 35 кв диаметр изолятора, определенный по этому условию, невелик и изоляторы имеют компактные формы. Для бумажно-бакелитовых изоляторов, не имеющих оболочки, реальную опасность представляет отпотеванис, т. е. выпадение росы на поверхности изолятора при резкой смене температуры воздуха. Кроме того, при появлении трещин в лаковом покрытии изоляторы с течением времени увлажняются, свидетельством чему является неуклонный рост tg δ. Поэтому изоляторы конструкции,



приведенной на рис. 14-8, применяются только в совершенно сухих помещениях.

Более широко распространены бумажно-бакелитовые изоляторы с фарфоровым чехлом, предназначенные для трансформаторов и масляных выключателей наружной установки (рис. 14-9). В этих изолято-



Рис. 14-9. Ввод наружной установки на напряжение 35 кв для масляного выключателя МКП-76. 1 — дождевой колпак; 2 чугунная заглушка; 3 — це-

ментирующий состав: 4 бумажно-бакелитовый конденсатор: 5— фарфоровая покрышка: 6— мастика; 7— фланец. рах полость между чехлом и бумажно-бакелитовым телом (называемым часто конденсатором) залита компаундом. Размещающаяся в баке аппарата часть изолятора полностью (в трансформаторах) или частично (в масляных выключателях) погружена в масло. Поэтому внутренняя часть изолятора короче наружной. В трансформаторах температура верхних слоев масла достигает 90—100° С. Эта температура, естественно, передается изолятору и вызывает рост tg δ. Поэтому для трансформаторных вводов проверка на тепловой пробой имеет особое значение.

Большое внимание при разработке конструкции ввода уделяется уплотнению фарфорового чехла в месте выхода токопроводящего стержня. Попадание влаги внутрь чехла ведет обычно к поверхностному пробою по бумажно-бакелитовому конденсатору.

Маслонаполненные (масляно-барьерные) проходные изоляторы. На напряжениях 110 кв и выше еще недавно чаще всего применялись маслонаполненные проходные изоляторы (рис. 14-10) с масляно-барьерной внутренней изоляцией, имеющей высокую электрическую прочность (СМ. § 7-7). Барьеры выполнены в виде бумажно-бакелитовых цилиндров, покрытых для выравнивания напряжения металлизированными обкладками. Корпус изолятора состоит из двух фарфоровых чехлов (наружного и внутреннего), надетых на заземленный фланец. Заполнение всей полости изолятора маслом поддерживается консерватором. Наблюдение за уровнем масла в консерваторе входит в обязанность эксплуатационного персонала. Для сохранения высокого качества масла иногда прибегают к устройству азотной защиты или к непрерывной регенерации масла в эксплуатации.

Проходные изоляторы с бумажно-масляной изоляцией. Очень высокая электрическая прочность достигается в проходных изоляторах с бумажно-масляной изоляцией (рис. 14-11). В этой конструкции на токопроводящий стержень нама-

тывается изоляционная бумага, между слоями которой закладываются металлизированные обкладки. При более совершенной технологии применяется намотка в два слоя бумаги — одного чистого, а другого с печатным металлическим покрытием. Бумажный конденсатор пропитывается маслом, залитым в полость фарфорового чехла. Преимущества бумажно-масляной изоляции рассматривались в гл. 7. В настоящее время изоляторы с бумажно-масляной изоляцией являются основным типом проходных изоляторов на напряжениях 110 кв и выше.



[Гл. 14

При изготовлении маслонаполненных и бумажно-масляных изоляторов применяется вакуумная сушка всей волокнистой изоляции (барьеры, бумажный конденсатор) и заполнение изоляторов маслом под вакуумом. От качества этих технологических операций зависит надежность изоляторов в эксплуатации. Особая тщательность необходима при изготовлении бумажно-масляных изоляторов.

Проходные изоляторы с микафолиевой изоляцией. Такие изоляторы изготовляются путем намотки на токопроводящий стержень рулонного микафолия и последующей формовки. Основным свойством микафолия является способность формоваться в нагретом состоянии и сохранять приданную форму при охлаждении. Это свойство придает изоляторам с микафолиевой изоляцией при компактной форме высокие электрические свойства — низкий tg d, высокое напряжение начала ионизации. Изоляторы с микафолиевой изоляцией выпускаются фирмой ASEA.

14-4. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ

Изоляторы в эксплуатации проходят периодические профилактические испытания, целью которых является выявление дефектных изоляторов и их своевременная замена. Программа профилактических испытаний зависит от конструкции изолятора.

Фарфоровые изоляторы испытываются приложением повышенного напряжения промышленной частоты в соответствии с таблицей заводских испытательных напряжений. Признаком пригодности изолятора к дальнейшей эксплуатации считается не только отсутствие пробоя, но и отсутствие значительных частичных разрядов. Испытание выявляет снижение электрической прочности изолятора, которое может произойти вследствие трещин в фарфоре или загрязнения поверхности изолятора. С другой стороны, приложение повышенного напряжения промышленной частоты не приводит к каким-либо необратимым процессам в фарфоровой изоляции.

Обычно напряжение испытательных трансформаторов, которыми располагает эксплуатация, достаточно только для испытания изоляции до 35 кв. Поэтому составная изоляция на высшие номинальные напряжения испытывается поэлементно. Широко используется также измерение распределения напряжения по элементам, например по склеенным составным элементам штыревых изоляторов. Для этой цели используется линейная измерительная штанга. Проверка распределения напряжения по изоляторам производится по методике, описанной в § 8-6.

Для бумажно-бакелитовых, маслонаполненных и бумажно-масляных изоляторов основным профилактическим испытанием является измерение угла диэлектрических потерь tg δ. Измерение tg δ вследствие малой емкости изолятора выявляет такие дефекты, как увлажнение изолятора, далеко зашедший ионизационный разряд, ухудшение качества масла (в маслонаполненных изоляторах). Абсолютные значения tg δ изоляторов не должны превосходить величин, указанных в табл. 8-1. Нормы на предельные значения tg δ уточняются местными инструкциями. Но основное значение для изоляторов всех типов имеет относительное возрастание tg δ, обнаруживаемое при периодических испытаниях после монтажа или капитального ремонта изолятора. Такое возрастание, особенно скачкообразное, является свидетельством какого-либо дефекта в изоляторе. Хотя обычно отсутствуют данные, которые могли бы служить достаточным критерием опасности дефекта, но из предосторожности изоляторы бракуются, заменяются ма резервные и отправляются в ремонт. Чем меньше интервал между испытаниями, тем, очевидно, больше вероятность своевременного выявления дефектного изолятора. Но частые испытания с отключением оборудования ухудшают экономические показатели и надежность электрической сети. Поэтому испытания обычно проводятся не чаще чем раз в год. Срок между испытаниями сокращается только при подозрении на дефектность изолятора.

Измерения tg δ изоляторов в эксплуатации проводятся с помощью измерительных мостов, работающих на напряжении 10 кв (см. § 8-4). Измерение tg δ изоляторов с заземленным фланцем производится по перевернутой схеме (см. рис. 8-6). Изоляторы 110 кв и выше часто имеют вывод от конденсаторной обкладки для измерения tg δ на нормальной схеме (см. рис. 14-11).

Хорошим показателем качества изолятора является его ионизационная характеристика. Снятие этой характеристики требует испытательных напряжений, превышающих рабочее напряжение изолятора. Поэтому этот метод испытания доступен только в заводских условиях.

14-5. ИЗОЛЯТОРЫ В РАЙОНАХ С ЗАГРЯЗНЕННОЙ АТМОСФЕРОЙ

Изоляторы на подстанциях, находящихся в районах с загрязненной атмосферой, должны иметь повышенные пути утечки, нормированные в табл. 6-1. Специальные конструкции, аналогичные линейным изоляторам, созданы для опорных штыревых изоляторов. Что же касается проходных изоляторов, то для них производство специальных «грязестойких» типов со сложной профилированной поверхностью технологически затруднительно. Повышение пути утечки возможно также увеличением длины изоляторов. Такой путь, однако, обычно экономически невыгоден. особенно на сверхвысоких напряжениях. Поэтому подстанции СВН стремятся размещать в районах, где отсутствует интенсивное загрязнение атмосферы. При необходимости в размещении подстанции в загрязняемом районе применяют профилактические меры по обеспечению надежной работы изоляции: периодическую очистку и обмывку изоляторов со снятнем или без снятия напряжения, покрытие изоляторов гидрофобными составами и др. (см. § 6-8).

Вопросы для самопроверки

1. Используя рисунки гл. 14, опишите изоляционные конструкции: a) опорных изоляторов; б) проходных изоляторов.

Какие профилактические испытания проводят для этих изоляторов?

2. Опишите характерные формы, которые придают ребрам изоляторов для повышеяня их мокроразрядного напряжения и прочности по отношению к длительному воздействию рабочего напряжения при загрязнении.

Глава пятнадцатая

ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

15-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В распределительных устройствах высокого напряжения применяются следующие типы высоковольтных аппаратов — выключатели (масляные и воздушные); трансформаторы тока; трансформаторы напряжения; разъединители, отделители и короткозамыкатели; конденсаторные батарен; токоограничивающие реакторы; разрядники и защитные воздушные промежутки. Изоляция таких простейших аппаратов, как разъединители, отделители, короткозамыкатели, токоограничивающие

۱

реакторы (главная изоляция), состоит из одиночных или соединенных в колонки опорных изоляторов; их конструкция рассматривалась в § 14-2. В настоящей главе изучаются изоляционные конструкции выключате-



Рис. 15-1. Разрез полюса бакового масляного выключателя.

1 — бак; 2 — устройство для подогрева масла; 3 — дугогасительное устройство; 4 — изоляция бака; 5 — ввод; 6 — контактные зажимы; 7 — механизм управления выключателем; 8 — трансформатор тока; 9 — направляющее устройство; 10 — штанга; 11 — траверса с подвижными контактами. лей, измерительных трансформаторов и конденсаторов, а также изоляция ошиновки распределительных устройств.

15-2. ИЗОЛЯЦИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Масляные выключатели (рис. 15-1). Изоляция бакомасляных выключатевых лей состоит из изоляции вводов и баковой изоляции. Изоляция вводов рассмотрена в гл. 14. Баковая изоляция состоит из изоляции штанги и ее направляющего устройства (поз. 9 и 10 на рис. 15-1) и изоляции между токоведущими частями и баком выключателя. В эту изоляцию входят масляный промежуток И изоляционные барьеры (поз. 4 на рис. 15-1).

Штанги (тяги) выключателей изготовляются из дерева, пропитанного в масле, или дельта-древесины; направляющие для штанг и барьеры гасительных камер — из гетинакса. Внешний барьер у бака выполняется из фанеры, пропитанной маслом.

Внутренняя изоляция масляных выключателей обладает обычно большим запасом электрической прочности. Резкое снижение прочности возможно при загрязнении масла углеродистыми частицами. Эти ча-

стицы образуются в большом количестве при затяжном характере гашения дуги в гасительной камере и особенно в случае, если дуга растягивается за пределы гасительной камеры. Углеродистые частицы оседают на нижней поверхности вводов, на штангах, направляющих и барьерах, что приводит к резкому снижению электрической прочности внутрибаковой изоляции. Короткое замыкание внутри бака, особенно, во время отключения внешнего короткого замыкания, представляет одну из тяжелейших аварий, которая иногда сопровождается взрывом выключателя. Таким образом, надежность работы изоляции выключателя связана с эффективностью дугогашения, осуществляемого гасительным устройством. 2

К снижению электрической прочности изоляции выключателя может приводить также отсыревание изоляционных деталей. вызванное влагой. адсорбированной маслом и выделяющейся при его охлаждении. Такое отсыревание предотвращаетсовременных выся в ключателях подогревом масла, осуществляемым электронагревательным элементом, размещенным на дне бака (поз. 2 на рис. 15-1).

Профилактические испытания баковых масляных выключателей проводятся ПО программе, включающей испытание вводов (см. § 14-4), испытание масла из бака, измерение сопротивления изоляции штанг, направляющих и вводов, иногда измерение угла диэлектрических потерь внутрибаковой изоляции. При испытании масла определяется наличие в масле углеродистых частиц. По величине сопротивления изоляции судят об оседании углеродистых частиц и иных загрязнений на штангах, направляющих и внутренней части вводов. Путем измерения при включенном и отключенном выключателе можно выделять отдельные участки изоляции. Угол диэлектрических потерь внутрибаковой изоляции служит в основном показателем состояния изоляции барьеров.





1 — главный ресивер; 2 — дугогасящие камеры; 3 — отделитель; 4 — полый опорный изолятор дугогасящих камер; 5 — изоляционная штаяга для механического управления; 6 — полый опорный изолятор отделителя; 7 — емкости для деления напряжения по разывам. Воздушные выключатели выполняются из стандартных модулей конструкций, содержащих обычно по одному разрыву на напряжение 50—55 кв. Такое выполнение позволяет строить воздушные выключатели на самые высокие напряжения, используя стандартные узлы. Успеш-



Рис. 15-3. Трансформатор тока ТФН-110М.

ность работы выключателя обеспечивается одновременным действием механизмов всех разрывов и равномерным делением рабочего и восстанавливающегося напряжений по разрывам. Деление напряжения осуществляется емкостным или активным делителем. Опорная (главная) изоляция воздушных выключателей состоит из фарфоровых или стеатитовых полых изоляторов опорной конструкции, собираемых в колонку. Внутренняя полость изоляторов используется в качестве воздухопроводов для подачи сжатого воздуха в гасительное устройство и управления его контактами (воздухонаполненный выключатель), поэтому такие изоляторы должны иметь высокую механическую прочность.

Внешняя поверхность изолятороз имеет выполненные обычным образом ребра, повышающие электрическую прочность изоляции при увлажнении; внутренние же поверхности, образующие воздуховоды, являются гладкими. При падении температуры окружающего воздуха на внутренней поверхности изоляторов и гасительных камер может конденсироваться влага, что приводит к снижению разрядного напряжения. Для предотвращения этого явления полости изоляторов постоянно вентилируются сухим сжатым воздухом.

В современных воздушных выключателях на высшие напряжения

для сокращения времени срабатывания воздуховоды постоянно заполнены сжатым воздухом, а клапаны, расположенные на потенциале, управляются изоляционными штангами, расположенными внутри опорных изоляторов-воздуховодов. Такая конструкция изоляции выключателя 750 кв показана на рис. 15-2.

15-3. ИЗОЛЯЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Трансформаторы тока в зависимости от номинальных параметров, назначения и места установки бывают следующих основных типов: втулочные, проходные стержневые или шинные и баковые. Втулочные трансформаторы тока представляют собой кольцевые магнитопроводы со вторичными обмотками, надеваемыми на проходные изоляторы быключателей и трансформаторов. Стержень проходного изолятора служит одновитковой «первичной обмоткой» трансформатора тока. Высоковольтная изоляция этих трансформаторов тока создается самим проходным изолятором.

Проходные стержневые трансформаторы тока по конструкции аналогичны втулочным, но в них проходной изолятор является основной конструкцией самого трансформатора тока. В шинных трансформаторах тока роль стержня — «первичной обмотки» играет шина, которая про-



Рис. 15-4. Схема кабельно-конденсаторной изоляции первичной обмотки (a) и общий вид трансформатора тока ТФКН-330 (б).

ходит через отверстие в главной изоляции трансформатора тока. Стержневые и шинные трансформаторы тока выпускаются на напряжения до 35 кв.

Трансформатор тока как отдельный аппарат на высокие напряжения наружной установки выпускается бакового типа. Конструкции баковых трансформаторов тока, в частности устройство их изоляции, непрерывно совершенствуются. В Советском Союзе широко применяются трансформаторы тока серии ТФН, устройство которых показано на рис. 15-3. В этой конструкции принято звеньевое расположение первичной и вторичной обмоток. Бумажно-масляная изоляция наложена частично на первичную, частично на вторичную обмотку; такая изоляция называется двухступенчатой. Баком трансформатора тока служит фарфоровая покрышка. Ввиду трудностей изготовления крупногабаритных покрышек в баковом трансформаторе тока изоляционные расстояния весьма малы. Это и обусловливает применение бумажно-масляной изоляции, обладающей высокой электрической прочностью.

На сверхвысокие напряжения трансформаторы тока типа ТФН соединяются в каскадные схемы, в которых вторичная обмотка верхней ступени питает первичную обмотку нижней. Хотя изоляционная проблема в этих трансформаторах тока решается относительно просто, приме-15—641 нение каскадных схем снижает точность измерения тока. Повышение электрической прочности изоляции обмоток достигается устройством кабельно-конденсаторной изоляции. Кабельно-конденсаторная изоляция представляет собой бумажно-масляную изоляцию, в толщу которой заложены коаксиальные конденсаторные обкладки, последняя из которых заземляется (рис. 15-4, *a*). Эти обкладки выравнивают распределение напряжения в радиальном и осевом направлениях, как это описано в § 2-6. Тот же принцип использован в конденсаторных вводах. Трансформаторы тока с кабельно-конденсаторной изоляцией выпускаются в СССР вплоть до высших номинальных напряжений в серии ТФКН (рис. 15-4, *b*).

На напряжения до 35 кв просты в производстве, дешевы и малогабаритны трансформаторы тока с литой изоляцией. Наилучшие результаты дает эпоксидная изоляция. Выбор конфигурации литой изоляцией требует подробного расчета электрического поля для устранения высоких градиентов по поверхности изоляции и в воздушных включениях вблизи вторичной обмотки.

15-4. ИЗОЛЯЦИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Изоляция конденсаторов служит не только собственно изоляцией, но является также носителем электрического поля, энергия и мощность которого используются в электрической установке. Чем больше напряженность электрического поля в изоляции, тем ближе его обкладки и выше емкость, а поэтому и больше удельная мощность конденсатора, выраженная в киловольт-амперах реактивных (квар). Удельная мощность конденсатора увеличивается также с повышением диэлектрической постоянной изоляции ε' . Связь удельной реактивной мощности конденсатора с E и ε' выражается соотношением

$$Q_0 = k\varepsilon' E^2, \tag{15-1}$$

где *k* — коэффициент пропорциональности.

С другой стороны, надежность изоляции снижается с увеличением напряженности поля E; материалы же с высокой пробивной электрической прочностью имеют относительно невысокие ε' ($\sim 2-4$). Таким образом, условия повышения удельной мощности конденсатора противоположны условиям повышения изоляционной надежности конструкции. Это противоречие разрешается применением наиболее высококачественных материалов. В конденсаторах применяется бумажно-масляная изоляция с конденсаторной бумагой высокой плотности толщиной от 5 до 30 мк. Такая бумага обладает высокой механической и электрической прочностью и повышенным ε' . Как отмечалось в § 7-8, с уменьшением толщины бумаги электрическая прочность бумажно-масляной изоляции повышается. Для пропитки применяется конденсаторное масло, отличающееся высокой степенью очистки. Диэлектрическая постоянная ε' бумажно-масляной конденсаторной изоляции составляет примерно 3,8.

Для пропитки бумаги применяется также совол, имеющий є'≈5. Соволовые конденсаторы имеют на 35—40% сниженный вес. Недостатком совола является токсичность его паров.

Конденсаторы состоят из отдельных секций, соединяемых для получения необходимой емкости параллельно и последовательно. Секции бывают рулонного и пакетного типов.

Конденсатор первого типа представляет собой рулон из бумажных лент с проложенными между лентами электродами из алюминиевой фольги (рис. 15-5). Намотка рулона производится на станках, после чего он сплющивается для придания секции плоской формы. Такие секции располагаются наиболее компактно в корпусе конденсатора.

Емкость одной секции

$$C_{\rm cekugh}=\frac{2\epsilon al}{d},$$

где l — длина электрода, размеры a и d указаны на чертеже. Так как обе стороны электрода являются активными, в формулу входит множитель 2.

Конструкция пакетной секции показана на рис. 15-6. Эта конструкция допускает применение кабельной бумаги (в рулонных секциях кабельная бумага лопается при опрессовке секции). Секции конденсаторов помещаются в металлический или фарфоровый корпус, залитый маслом. В металлическом корпусе вывод концов конденсатора осуществляется через проходные изоляторы.

Диэлектрические потери в конденсаторах выражаются формулой

$$P_{a} = k U^{2} C \operatorname{tg} \delta. \tag{15-2}$$

Вследствие большой емкости С потери в конденсаторах также относительно велики. Теплоотвод из конденсаторов осуществляется по электродам — фольге в направлении к торцам секции и далее через масло к металлическому корпусу. Улучшение теплоотвода достигается присоединением фольги к металлическому корпусу конденсатора. В конденсаторах с фарфоровым корпусом условия теплоотвода ухудшаются, что ограничивает применение таких конденсаторов относительно небольшими емкостями (конденсаторы связи или емкостных трансформаторов напряжения).

В § 7-9 указано, что в бумажно-масляной изоляции резко выражен кумулятивный эффект, заключающийся в накоплении необратимых дефектов при частичных разрядах. Исследования Ю. С. Пинталя (МЭИ) показали, что в конденсаторах переменного напряжения начальные частичные разряды возникают на краях электродов (обкладок), что свидетельствует об об-



Рис. 15-5. Плоскопрессованная рулонная секция конденсатора.

6)

а — общий вид; б — элемент секции; I — электрод из фольги; 2 бумага; 3 — выводы; а — ширина электродов; d — толщина диэлектрика; б — ширина закраии.



Рис. 15-6. Эскиз секции конденсатора пакетного типа.

разовании начальных электронов вследствие автоэлектронной эмиссии (см. § 3-3).

Напряженность поля начальной ионизации *Е*_{н.и} определяется выражением

$$E_{\mu,\mu} = (1,85 - 1,60) \,\delta_{-}^{-0.58}, \, \kappa e/mm, \tag{15-3}$$

где δ_n — толщина изоляции между обкладками, *мм*; коэффициенты 1,85 и 1,60 относятся соответственно к конденсаторной бумаге КОН-1 и КОН-2.

Обычно значения $E_{n.n}$ (на краях обкладок) лежат ниже рабочих напряженностей E_{pa6} и, следовательно, начальные частичные разряды поддерживаются в течение всего срока службы изоляции. Возникающие при частичных разрядах мельчайшие газовые включения растворяются в масле и распределяются с течением времени по всей изоляции. Этому способствует пульсация давления в масляных прослойках между обкладками вследствие действия между ними электростатических сил.

Растворение газа в масле приводит к постепенному снижению электрической прочности изоляции; изоляция стареет. Срок службы изоляции τ (лет) зависит от отношения $E_{\rm pa6}/E_{\rm н.и}$ и может быть оценен по георетической формуле

$$\tau = \frac{T_o}{\left[\left(\frac{E_{\text{pa6}}}{E_{\text{H.B}}} \right)^6 - \left(\frac{E_{\text{pa6}}}{E_{\text{H.R}}} \right)^2 \right] \arccos \frac{E_{\text{H.B}}}{E_{\text{pa6}}}.$$
 (15-4)

Коэффициент T_{π} для изоляции нормального исполнения можно принять 150—200. Расчеты по формуле (15-4) позволяют выбирать изоляцию конденсаторов, исходя из технико-экономических предпосылок.

Внутренние перенапряжения приводят к напряженностям в изоляции, близким к $E_{\rm кр. n}$. Поэтому конденсаторы, подвергающиеся относительно частым внутренним перенапряжениям, например конденсаторы продольной и поперечной компенсации, выполняются с более низкими рабочими напряженностями.

На выбор *Е* значительное влияние оказывает вид рабочего напряжения. Для конденсаторов постоянного напряжения, в которых явления нонизации проявляются в слабой форме и диэлектрические потери исчезающе малы, рабочие напряженности могут быть резко увеличены по сравнению с напряженностями для конденсаторов переменного напряжения 50 гц. С другой стороны, для конденсаторов повышенной частоты рабочие напряженности должны снижаться примерно пропорционально 1/*f*^{1/4}.

В электрических установках применяются следующие типы высоковольтных конденсаторов:

 конденсаторы переменного напряжения (50 гц), служащие для улучшения сос φ потребителя (косинусные конденсаторы), генерирования реактивной мощности вдали от потребителя и для установок продольной компенсации. Корпус металлический. Допускаемые рабочие напряженности для косинусных конденсаторов 12—14 кв/мм, для конденсаторов продольной и поперечной компенсации 7—10 кв/мм;

2) конденсаторы связи, емкостных трансформаторов напряжения, делителей напряжения на выключателях. Все эти конденсаторы имеют относительно малую емкость. Корпус фарфоровый. Рабочие напряженности 7—8 кв/мм;

3) конденсаторы для электропередач постоянного тока, работающие при выпрямленном напряжении, с составляющей (до 10%) переменного напряжения повышенной частоты. Рабочие напряженности 30— 40 кв/мм;

4) конденсаторы постоянного напряжения импульсные, предназначенные для работы в лабораторных схемах. Корпус конденсаторов металлический, фарфоровый или бакелитовый. Рабочие напряженности до 100 кв/мм. Испытания конденсаторов переменного напряжения проводятся повышенным напряжением рабочей частоты. Вследствие высокой емкости конденсаторов для испытания требуются испытательные трансформаторы большой мощности. При отсутствии таких трансформаторов практикуется испытание постоянным напряжением до 50 ном.

15-5. ИЗОЛЯЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОИСТВ

В изоляцию распределительных устройств входит изоляция аппаратов и ошиновки. В открытых распределительных устройствах (ОРУ) гибкая или полужесткая ошиновка подвешивается на подвесных изоляторах линейного типа; в закрытых распределительных устройствах (ЗРУ) жесткая ошиновка обычно монтируется на опорных изоляторах. ЗРУ применяются для напряжений до 10 кв, а в районах с загрязненной атмосферой — и для более высоких напряжений. В ОРУ число изоляторов в гирляндах берется на единицу выше, чем на линиях. Этим сравнительно дешевым путем создается дополнительный запас изоляцик на шинах, где короткое замыкание более опасно, чем на линии.

Б ОРУ и ЗРУ минимальные изоляционные воздушные промежутки выбираются исходя из испытательных напряжений оборудования (см. гл. 13) с учетом требований техники безопасности. Промежутки между фазами должны по крайней мере на 10% превышать промежутки фаза — земля, выбранные по условиям испытательных напряжений.

Большое распространение получили комплектные распределительные устройства (КРУ) на напряжения до 35 кв. КРУ состоят из ячеек в металлических шкафах, полностью собираемых на заводе. За последние годы наметилась тенденция к повышению компактности КРУ за счет применения твердых изоляционных материалов. Применение изолированных шин уже дает существенный эффект; основой материала покрытия обычно служит эпоксидная смола. Отказ от разъединителей позволяет еще более повысить компактность КРУ. Внешнее присоединение ячеек осуществляется штепсельными разъемами. Следующим шагом в развитии КРУ является создание ячейки в виде единого аппарата с литой эпоксидной изоляцией. В таком аппарате необходим точный расчет электрического поля для сокращения изоляционных расстояний и хорошо разработанная технология изготовления изоляции для исключения воздушных включений в твердой фазе. В последнее время изготовляются КРУ на 110—220 кв с заполнением сжатым воздухом при давлении 5—6 ат или газом SF₆ при давлении 1 ат.

Вопросы для самопроверьи

1. Используя рисунки гл. 15, опишите изоляционные конструкции: а) масляных и воздушных выключателей; б) трансформаторов напряжения; в) трансформаторов тока; г) конденсаторов.

2. Укажите профилактические испытания, проводимые для изоляционных конструкций, указанных в вопросе 1.

Глава шестнадцатая

ИЗОЛЯЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБМОТКАХ

16-1. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК

Конструкции трансформаторов изучались в курсе «Электрические машины». Напомним основные схемы соединения и конструкции обмоток. Простейшая схема обмотки — цилиндрическая двухслойная или многослойная. Обмотка наматывается спирально в несколько слоев на бумажно-бакелитовый цилиндр (рис. 16-1,*a*). Между некоторыми слоями выполняются масляные каналы. Обмотки этого типа преимущественно применяются на напряжениях до 35 кв на трансформаторах малой мощности.

Наиболее распространены непрерывные катушечные обмотки (рис. 16-1,б). Каждый виток обмотки состоит из одного или двух-трех параляельных проводов. Каждая катушка имеет несколько (до двухтрех десятков) витков. Между катушками выполняются масляные охлаждающие и изолирующие каналы. Переходы между катушками рас-



Рис. 16-1. Основные конструкции обмоток. а — цилиндрическая слоевая; б — катушечная непрерывная; в — дисковая; 1, 2, 3, 4 — номера каналов между катушками.

полагаются поочередно с внутренней и внешней стороны обмотки; такое расположение переходов достигается в процессе сборки перекладыванием витков половины общего числа катушек. Непрерывные обмотки применяются на напряжении 110 кв и выше, а также на напряжении 3—6 кв для трансформаторов большой мощности.

В тех случаях, когда невозможно или затруднительно выполнить непрерывную обмотку, применяют дисковую обмотку, собираемую из ряда отдельно намотанных катушек (рис. 16-1,*в*). Соединение катушек выполняется пайкой. Обмотки высокого напряжения иногда выполняются частично непрерывными, а в местах ввода, где требуется усиление изоляции, — дисковыми.

В некоторых заграничных конструкциях мощных трансформаторов применяются цилиндрические многослоевые обмотки, отличающиеся от слоевых обмоток трансформаторов 6—35 кв наличием масляных каналов между всеми слоями. Применение многослоевых обмоток для высших классов напряжения оправдано благоприятным распределением напряжения между слоями. Для обмоток СВН возможно применение бумажно-масляной изоляции между слоями; некоторые фирмы предполагают выполнить такую изоляцию для трансформаторов на напряжения до 1 000 кв и возможно даже на более высокие напряжения.

Нейтраль обмоток класса 35 кв и ниже, соединенных в звезду, изолирована или заземлена через дугогасящую катушку. Нейтраль обмоток 110—220 кв обычно (у подавляющего большинства трансформаторов) заземлена. Однако в целях снижения токов несимметричных к. з. ней-

230

§ 16-3]

трали таких обмоток у части трансформаторов могут быть изолированы. Изолированная нейтраль этих обмоток обычно защищается разрядниками. В обмотках напряжением 330 кв и выше нейтраль всегда заземляется.

16-2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Общепринятая классификация изоляции трансформаторов показана на рис. 16-2. Изоляция подразделяется на внутреннюю изоляцию, т. е. изоляцию в баке, и внешнюю изоляцию, к которой относятся воздушные промежутки на вводах, между вводами и баком и между самими вводами. Особо выделяется внутренняя изоляция вводов.



Рис. 16-2. Классификация изоляции трансформаторов.

Внутренняя изоляция подразделяется на изоляцию обмоток и изоляцию отводов, включающую также изоляцию переключателей. Изоляция обмоток подразделяется на главную и продольную. К главной относится изоляция обмотки от заземленных частей и от других обмоток. К продольной относится изоляция между различными участками одной и той же обмотки, в частности изоляция между витками, катушками, слоями и прочими элементами обмотки.

На устройство изоляции и конструкцию обмоток большое влияние оказывают перенапряжения атмосферного и внутреннего происхождения. С воздействием этих перенапряжений связаны переходные процессы, которые рассматриваются в последующих параграфах.

16-3. РАЗВИТИЕ КОЛЕБАНИЙ В ОБМОТКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГРОЗОВЫХ ВОЛН

Волны грозового происхождения, набегающие по линии передачи на подстанцию, приводят к возникновению импульсных напряжений, воздействующих на обмотки трансформатора. В трансформаторе под действием напряжения возникает сложный электромагнитный процесс, приводящий к местным перенапряжениям на изоляции между катушками, между обмотками и изоляцией обмоток относительно заземленных частей. Расчет перенапряжений в обмотках служит основой для выбора изоляционных расстояний в трансформаторах.

Напряжение, воздействующее на одну из обмоток, например ВН, приводит к возникновению в трансформаторе электрического поля, связанного со всеми обмотками. В эксплуатационных условиях обмотка низшего напряжения, как правило, приключена к значительной емкости





Рис. 16-3. К расчету распределения потениналов по обмотке трансформатора в момент t=0.

a — Схема электростатического поля и емкостные элементы ΔC , ΔK ; δ — емкостная цепочка замещения обмотки; s — кривые распределения напряжения вдоль обмотки $U_C(x)$ при заземленной (кривая 2) и изолированной (кривая 3) нейтрали (αl -10). Кривая I — результат расчета по приближенной формуле (16-3). отходящих линий или шин. Пренебрегая падением напряжения на этой емкости, будем считать обмотку низшего напряжения заземленной всеми полюсами, т. е. закороченной и заземленной.

Основные закономерности переходных процессов в трансформаторах рассмотрим на простейшей однофазной схеме катушечной обмотки (рис. 16-3,а), на воздействует которую прямоугольная волна (или импульс) $u(t) = U_0$. В начальный момент времени токи по виткам в силу реакции магнитного потока проходить не могут. На входе обмотки сосредоточивается заряд $q_{\text{вx}} = U_0 C_{\text{вx}}$, где $C_{\text{вx}}$ — входная емкость трансформатора. В электрическом поле заряда q_{BX} все катушки приобретают некоторый потенциал, спадающий от начала к концу обмотки.

Введем в расчетных целях понятие частичных емкостей катушек на землю ΔC и между соседними катушками ΔK . Тогда при t=0 обмотка изобразится цепочкой емкостей (рис. 16-3,6). Для всей обмотки емкость на землю $C = \Delta Cn$, а продольная емкость $K = \Delta K/n$, где n — число катушек в обмотке (емкости ΔC складываются параллельно, а ΔK — последовательно). Обозначим через C_0 и K_0 поперечную и продольную емкости обмотки на единицу длины обмотки. Очевидно, что $C_0 = C/l$ и $K_0 = Kl$, где l полная длина обмотки.

приближенной формуле (16-3). Качественно распределение напряжения вдоль емкостной цепочки было рассмотрено в § 2-4. Принимая значения ΔC и ΔK (а слевательно, и C_0 и K_0) неизменными вдоль цепочки, что приближенно справедливо для обмотки трансформатора, можно выразить распределение напряжения вдоль емкостной цепочки в простых функциях.

Представим емкостную цепочку длинной линией. Согласно теории длинных линий распределение напряжения U круговой частоты ω вдольлинии (по координате x) имеет вид

$$U_{c}(x) = U_{o} \frac{\operatorname{sh} \alpha l \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\operatorname{sh} \alpha l}, \qquad (16-1)$$

если конец емкостной цепочки заземлен, как это имеет место для обмотки трансформатора с заземленной нейтралью, или

$$U_{c}(x) = U_{0} \frac{\operatorname{ch} \alpha l \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\operatorname{ch} \alpha l}, \qquad (16-1a)$$

если конец емкостной цепочки изолирован, как это имеет место для обмотки трансформатора с изолированной нейтралью.

В этих уравнениях а — коэффициент распространения, равный:

$$a = \sqrt{Z_0 Y_0},$$

где Z_0 , Y_0 — продольное сопротивление и поперечная проводимость линии на единицу длины. В данном случае $Z_0 = 1/j\omega K_0$ и $Y_0 = j\omega C_0$ и, следовательно,

$$a = \sqrt{\frac{\overline{C_0}}{K_0}} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\overline{C}}{K}}; al = \sqrt{\frac{\overline{C}}{K}}.$$
 (16-2)

То обстоятельство, что а оказалось независимым от частоты, показывает, что распределение напряжения вдоль емкостной цепочки остается одинаковым при любых частотах, а следовательно, формулы (16-1) справедливы и на фронте прямоугольного импульса (когда возможно замещение обмотки емкостной цепочкой).

Обычно в обмотках $C \gg K$ и коэффициент $\alpha l \gg 1$. Выражая в формулах (16-1) гиперболические функции в виде

sh
$$z = \frac{e^z - e^{-z}}{2}$$
; ch $z = \frac{e^z + e^{-z}}{2}$

и учитывая, что $e^{-\alpha l} \ll 1$, находим, что на большей части длины емкостной цепочки формула для распределения напряжения приобретает простой вид, соответствующий неограниченно продолженной линии:

$$U_{c}(x) = U_{o}e^{-\alpha x} = U_{o}e^{-(\alpha l)\frac{x}{l}}.$$
 (16-3)

Коэффициент al характеризует крутизну спада кривой емкостного распределения. С увеличением al спад кривой возрастает. Кривая $U_C(x)$, называемая кривой емкостного распределения напряжения, показана на рис. 16-3, в. В трансформаторах без специальных устройств или специальных сбмоток для выравнивания поля значение al порядка 10-20; при таких значениях al экспоненциальная кривая $U_C(x)$ спадает весьма быстро. На конце (у нейтрали) обмотки, где x/l=1, напряжение совершенно незначительно, что подтверждает возможность расчета в схеме бесконечной цепочки емкостей. Режим работы нейтрали трансформатора практически не оказывает влияния на емкостное распределение напряжения на его обмотке. Входное сопротивление цепочки емкостей (бесконечно продолженной) на частоте ω равно $\sqrt{\frac{z_o}{y_o}} = \frac{1}{j\omega\sqrt{C_oK_o}}$, откуда следует, чго эквивалентная или входная емкость цепочки равна:

$$C_{\rm BN} = V \overline{C_{\rm o}K_{\rm o}}.$$

Реальные волны имеют фронт некоторой длины, отличной от нуля (t_{фp}>0). При воздействии таких волн ток на фронте уже проникает



Рис. 16-4. К расчету распределения максимальных перенапряжений по обмотке трансформатора с заземленной нейтралью.

a — схема замещения обмотки для t>0: b — принужденное распределение напряжения по обмотке $U_{\rm пp}(x)$; s — определение свободной составляющей $U_{\rm CB}(x)_{t=0}$. разложение се на пространственные гармоники и вычисление ние максимальных перенапряжений.

Для изолированной нейтрали $I_{\rm пp}=0$ и, следовательно, принужденное распределение выражается линией, параллельно оси абсцисс, $U_{\rm пp}(x) = U_0.$ (16-4a)

Эти зависимости изображены на рис. 16-4,6 и 16-5,6. Зная начальное и принужденное распределение напряжения, можно рассчитать свободную составляющую
$$U_{cB}(x) = U_c(x) - U_{np}(x)$$
 в момент времени $t=0$ (рис. 16-4,8 и 16-5,8). Разложим кривые $U_{cB\,t=0}(x)$ на пространственные гармоники. На рис. 16-4,8 и 16-5,8 указаны для простоты по три первые гармоники такого разложения. При заземленной нейтрали потенциалы начала и конца обмотки фиксированы (U_0 и 0), так что свободная составляющая напряжения имеет в этих точках узлы. Поэтому при заземленной нейтрали вдоль обмотки укладываются целые числа

в витки обмотки. Увеличение продольного тока эквивалентно в схеме на рис. 16-3 ΔK возрастанию емкостей до некоторого ΔK_{2} , что ведет к сглаживанию кривой распределения напряжения. Кривая распределения напряжения на фронте таких волн называется кривой начального распределения $U_{\rm H}(x)$. Чем положе фронт волны, тем положе и кривая U_н(x). Для грозовых волн стандартной формы $(t_{\rm dp}) =$ =1,5 *мксек*) кривая $U_{\rm H}(x)$ близка к $U_c(x)$.

После затухания переходного процесса принужденное распределение по виткам напряжения $U_{\rm np}(x)$ будет определяться э. д. с., наводимой в витках суммарным магнитным потоком. Поскольку обмотка однородна, то и падение напряжения по виткам будет равномерным.

В случае заземленной нейтрали напряжение U_{пр} равномерно спадает от U₀ до нуля на нейтрали

$$U_{\rm np}(x) = U_{\rm o}\left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot (16-4)$$

полуволн. При изолированной нейтрали фиксированный потенциал, а следовательно, узел свободной составляющей находится лишь в начале обмотки, а на конце обмотки расположена пучность. Поэтому при изолированной нейтрали вдоль обмотки укладываются целые нечетные числа четвертей волн. Амплитуды гармоник A_k определяются разложением в тригонометрический ряд кривой $U_{cB\,t=0}(x)$. Эти амплитуды равны для заземленной нейтрали

$$A_{k} = \frac{1}{k\pi} \frac{U_{0}}{1 + \frac{K}{C} (k\pi)^{2}}$$
(16-5)

и для изолированной нейтрали

$$A_{k} = \frac{4}{(2k-1)\pi} \frac{U_{0}}{\left\{1 + \frac{K}{C} \left[\frac{(2k-1)}{2}\right]^{2}\right\}},$$
 (16-5a)
rge $k = 1, 2, 3 ...$

Каждая пространственная гармоника (стоячая волна) колеблется во времени около нулевого значения, т. е. около оси абсцисс. При ра-

венстве периодов колебаний гармоник $T_{k} = T$ и отсутствии затухания сумма всех гармоник в любой момент времени дает кривую $u_{cB}(x, t)$ переменной амплитуды, но сохраняющую свою форму. Через время t = T/2 кривая $u_{cB}(x, t)$ достигает значения $U_{\rm CB}(x)_{t=0}$, с с обратным знаком. Арифметически ординаты этой складывая кривой и кривой $U_{\rm mp}(x)$, мы находим максимальные напряжения в обмотке $U_{M}(x)$. Такое построение, показанное на рис. 16-4, в и 16-5, в пунктиром, часто используется для быстрой приближенной оценки максимальных напряжений.

В действительности периоды колебаний пространственных гармоник снижаются с порядковым номером гармоник. Колебания гармоник происходят с затуханием, причем с увеличением порядкового номера гармоники затухание вследствие поверхностного эффекта резко возрастает. К моменту времени Т₁, когда первая гармоника напряжения достигает максимального знавысшие гармоники чения. уже успевают в значитель-



Рис. 16-5. То же, что и на рис. 16-4, но для изолированной нейтрали.

ной степени затухнуть. Затухание первой гармоники в момент $t = T_1/2$

учитывается умножением ее амплитуды на коэффициент е ²≈0,75, найденный путем усреднения ряда экспериментальных значений.

Таким образом, распределение максимальных напряжений в обмогке $U_{\rm M}(x)$ находится путем наложения на кривую $U_{\rm np}(x)$ первой гармоники $U_{\rm CB}(x)$, взятой с обратным знаком по отношению к моменту t=0и умноженной на коэффициент 0,75.



Рис. 16-6. Пространственное расположение первой гармоники напряжения и тока собственных колебаний в первичной обмотке и поток и э. д. с. во вторичной обмотке.

а — первичная обмотка с заземленной нейтралью; б — первичная обмотка с изолированной нейтралью.

Если на трансформатор воздействует импульс длиной $t_{\rm B}$, то напряжения в обмотке достигают максимальных значений при условии $t_{\rm B} > T_{\rm I}/2$. Если $t_{\rm B} \ll T_{\rm I}/2$, то колебания основной гармоники в обмотке не успевают развиться и напряжения в обмотке остаются близки к кривой первоначального распределения $U_{\rm H}(x)$.

Значение T_1 определяется емкостью обмотки и ее индуктивностью для тока свободных колебаний. Для трансформаторов напряжением 110 кв и выше T_1 лежит в пределах 50—100 мксек. Рассмотрим влияние на T_1 состояния вторичной обмотки трансформатора. С этой целью выделим первую гармонику напряжения и тока собственных колебаний первичной обмотки. Ток гармоники отстает от напряжения на 1/4 пространственного периода (рис. 16-6). При заземленной нейтрали ток основной гармоники имеет узел в середние обмотки и пучности по концам: при изолированной нейтрали узел тока расположен на нейтральном коние.

С колебательной составляющей тока в первичной обмотке связан магнитный потск Ψ , пересекающий вторичную обмотку и наводящий э. д. с. є в ее витках. При заземленной нейтрали э. д. с. в витках вторичной обмотки взаимно компенсируются (рис. 16-6, *a*) н, следовательно, ток по виткам этой обмотки проходить не будет. Это означает, что магнитный поток основной гармоники почти не встречает реакции вто-

236

ричной обмотки и, следовательно, свободно проникает в сталь магнитопровода, не образуя, однако, главного магнитного потока. Поэтому размыкание или замыкание вторичной обмотки практически не оказывает влияния на магнитный поток и, следовательно, на значение T₁.

При изолированной нейтрали э. д. с. в витках вторичной обмотки направлены в одну сторону (рис. 16-6,б), что вызывает протекание в короткозамкнутой вторичной обмотке тока, вытесняющего магнитный поток основной гарменики. При размыкании вторичной обмотки это вытеснение прекрашается и поток первичной обмотки проникает в сталь магнитопровода, образуя главный магнитный поток, что резко увеличивает индуктивность первичной обмотки. В результате размыкание вторичной обмотки приводит к увеличению T_1 в десятки раз.

Указанные выше значения T₁ (50—100 *мксек*) относятся к обмоткам с заземленной нейтралью либо к обмоткам с изолированной нейтралью при короткозамкнутой вторичной обмотке.

Напряжения, развивающиеся в процессе колебаний, воздействуют на главную изоляцию обмоток. Как следует из изложенного, при заземленной нейтрали максимальные перснапряжения возникают вблизи линейного конца, а при изолированной нейтрали — в нейтрали. При установке в нейтрали разрядника уровень напряжения в нейтрали. При установке в нейтрали разрядника уровень напряжения в нейтрали ограничивается характеристиками разрядника. Обычно этот уровень весьма мал, и поэтому переходные процессы в обмотках с разрядником в нейтрали развиваются, как в обмотках с заземленной нейтралью.

16-4. ГРАДИЕНТНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В процессе развития колебаний между элементами обмотки возникают перенапряжения, называемые градиентными. Эти перенапряжения воздействуют на продольную изоляцию обмоток. Градиентные напряжения, или сокращенно градиенты, определяются соотношением

$$G = - \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \Delta x,$$

где Δx — расстояние между соседними витками или катушками.

Производная $E = -\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}$ является градиентом потенциала в рассматриваемой точке обмотки, отсюда и название градиентных напряже-

ний (G и E различаются множителем Δx). Измерения потенциалов и градиентов производятся обычно по ка-

измерения потенциалов и градиентов производятся обычно по каналам 1, 3, 5, расположенным с внешней стороны обмотки (см. рис. 16-1,б).

Градиентные напряжения, определяемые мгновенной разностью потенциалов соседних катушек, имеют длительность в несколько микросекунд или даже долей микросекунды.

Изучение закономерности электромагнитных процессов в обмотках позволяет установить и характер развития градиентных перенапряжений. При воздействии отвесного фронта волны напряжения в момент времени t=0 в обмотке устанавливается емкостное распределение потенциала $U_C(x)$. Этому распределению соответствуют так называемые емкостные градиенты

$$G_c(x) = -\frac{d}{dx} U_c(x) \Delta x.$$
 (16-6)

Для экспоненциальной формы распределения напряжения $U_c(x) = U_0 e^{-\alpha x}$ значения G_c равны:

$$G_{c} = a U_{0} e^{-ax} \Delta x. \tag{16-6a}$$

Для точки x = 0, т. е. на первом канале, G_c имеет максимальное значение и равен по абсолютной величине

$$G_{c,x=0} = a U_0 \Delta x = a l \left(\frac{U_0}{l}\right) \Delta x; \qquad (16-7)$$

здесь U₀/l — градиент при равномерном спаде потенциала от линейного конца к нейтрали. Следовательно, емкостный градиент в начале обмотки в в $\alpha l = \sqrt{\frac{C}{K}}$ раз превышает градиент при равномерном распределении напряжения вдоль обмотки.

Формула (16-7) справедлива при отвесном фронте набегающей волны. Чем положе фронт волны, тем более полога кривая первоначального распределения $U_{\rm H}(x)$ и, следовательно, тем меньше градиентные перенапряжения в обмотке. При пологом фронте волны, соответствующем реальным волнам на подстанции, начальный градиент между катушками обозначают через $G_{\rm H}(x)$.

Колебания в обмотке, возникающие в переходном режиме, приводят к распространению высоких градиентных напряжений в глубь об-

(x);t=0 υt υt χU_l (I) 8 MOMENTS (

Рис. 16-7. Построение кривой распределения градиентов G(x) в момент времени t > 0.

мотки. Если в момент t=0 градиенты выражаются кривой $G_{\rm H}(x)$, то при t>0 эта кривая разделяется на прямую и обратную волны градиента, движущиеся вдоль обмотки. Волны градиентов движутся вдоль витков обмотки со скоростью распространения электромагнитного поля в диэлектрической среде $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} \approx \frac{c}{2} (c - скорость)$ света, равная 300 м/мксек).

Градиентные перенапряжения G(x, t) в переходном режиме в любой точке обмотки могут быть приближенно определены графически следующим образом (рис. 16-7). Начальная кривая градиентов $G_{\rm H}(x)$, построенная на реальной обмотке и ее зеркальном отражении, разделяется на две волны половинной амплитуды la и l6, которые начинают двигаться в разные стороны вдоль обмотки со скоростью v. Сумма обеих кривых в реальной части обмотки в разные моменты времени дает функцию G(x, t), показанную кривой 2.

Из приведенного построения следует, что максимальные градиенты, имеющие наибольшее значение в начале обмотки, быстро сладают примерно до половины своего первоначального значения в глубине обмот-



238

ки. При дальнейшем распространении по обмотке волны градиентов амплитуда их понижается за счет затухания. У нейтрали имеет место некоторое возрастание градиентов за счет отражения волны (от заземления — в случае заземленной нейтрали и от емкости нейтрали — в случае изолированной нейтрали). Высокие градиентные напряжения возникают на каналах регулировочных катушек вследствие возрастания Δx в этих местах обмотки. Кривая максимальных градиентов вдоль обмогки обозначается через $G_{\rm M}(x)$.

Высокие градиентные перенапряжения могут возникать не только на фронте волны, но и при срезе

на фронте волны, но и при срезе волны вблизи трансформатора, например в результате перекрытия наружной изоляции. Схема среза показана на рис. 16-8, а. При срезе емкость трансформатора и участка линии длиной *l* разряжается на индуктивность петли среза. На обмотку трансформатора воздействует напряжение колебательной формы, показанной на рис. 16-8, б.

Форму волны, воздействующей на обмотку, можно представить в виде наложения двух составляющих: фронтовой волны $u^{(1)}$ и обратной волны $u^{(2)}$. Волны $u^{(1)}$ и $u^{(2)}$ — противоположного знака. Волна $u^{(2)}$, имеющую бо́льшую амплитуду и крутизну, чем волна $u^{(1)}$, создает в обмотке высокие градиентные напряжения.

Ввиду возможности среза волн типовые импульсные испытания трансформаторов включают испытание срезанной волной (см. § 13-2). Большое значение имеет коэффициент перехода через нуль $k_{\rm n}$, равный отношению амплитуд $\frac{\Delta U}{U_{\rm cp}}$. При даль-



Рис. 16-8. Срез волны искровым промежутком.

 а — схема среза; б — форма срезанной волны и ее разложение на составляющие.

нем срезе этот коэффициент доходит до 1. Исследования, проведенные на кафедре ТВН МЭИ, показали, что при установке и срабатывании РВ у трансформатора активное сопротивление РВ демпфирует колебания при срезе и коэффициент $k_{\rm m}$ снижается до 0,3—0,4.

На развитие градиентных перенапряжений влияет также рабочее возбуждение трансформатора. Это видно из следующего. Пусть на фазе, рабочее напряжение на которой равно — U_{Φ} , воздействует волна, подымающая импульсное напряжение до напряжения среза + U_0 . Применяя метод наложения, можно раздельно рассмотреть действие импульсной волны с амплитудой $U_0 + U_{\Phi}$ и напряжения рабочей частоты с амплитудой — U_{Φ} . Действие первой волны создает градиентные перенапряжения с максимальным значением $G_{C, x=0} = \alpha (U_0 + U_{\Phi}) \Delta x$. Действие второй составляющей создает малые градиентные напряжения рабочей частоты. Отсюда следует, что если трансформатор испытывается без возбуждения, то волна, эквивалентная с точки зрения воздействия на продольную изоляцию обмотки, должна иметь повышенную амплитуду. Расчеты показывают, что эта добавка составляет U_н/2, где U_н — номинальное напряжение обмотки, ко_{действ} (см. табл. 13-1).

16-5. ПЕРЕХОД ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ОДНОЙ ОБМОТКИ На другую

Падение волн на одну из обмоток трансформатора приводит в некоторых режимах к перенапряжениям и на остальных обмотках. В этих случаях говорят о переходе электромагнитных волн с одной обмотки на другие. Передача напряжения с возбуждающей на возбуждаемую обмотку возможна через электростатические и магнитные связи.

В начальные моменты времени электростатическое поле, связанное с зарядом $q_{\rm Bx}$ на входной емкости транформатора, создает потенциал на всех обмотках. В упрощенной схеме на рис. 16-9 потенциал обмотки 2 связан с потенциалом обмотки 1 соотношением

$$U_{2} = U_{1} \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}}.$$
 (16-8)

В значение емкости C_{22} входит как емкость самой обмотки 2 на землю, так и емкость всех подключенных токоведущих элементов сети. Если к обмотке 2 приключены линии, то их емкость столь велика, что можно положить $U_2=0$, что и было ранее принято при исследовании переходных процессов. Сколько-нибудь значительные потенциалы могут быть наведены лишь на отключенной обмотке 2.



Рис. 16-9. Переход воли через емкостную связь между обмотками.



Рис. 16-10. Схема замещения трансформатора для расчета перенапряжений при электромагнитной передаче напряжения между обмотками.

Строго говоря, соотношение (16-8) справедливо лишь при очень малых продольных емкостях вторичной обмотки K_2 . Поэтому его можно использовать только для расчета напряжения на вводе обмотки 2 (U_2) по напряжению на вводе обмотки 1 (U_1). Внутри же обмотки 2 потенциал повышается даже при заземлении ее ввода. Особенно высокие потенциалы наводятся через емкостные связи обмоток в том случае, когда обмотка 1 имеет ввод в середину.

Переход волн между обмотками осуществляется также через их магнитную связь. Э. д. с. в обмотке 2 индуктируется током в обмотке 1 примерно в соответствии с коэффициентом трансформации. Приближенно можно использовать обычную схему замещения трансформатора в виде его индуктивности рассеяния L_s (рис. 16-10), за которой включены волновые сопротивления приключенных к обмотке 2 линий или вращающихся машин z и сосредоточенная емкость C, учитывающая, в частности, емкость самой обмотки.

При падении на первичную обмотку волны с амплитудой U_0 напряжение на выводе обмотки 2 будет стремиться к значению U_0/k , где $k \rightarrow$

коэффициент трансформации. Если в схеме на рис. 16-10 выполняется условие

$$z \ll \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_s}{C}}, \tag{16-9}$$

U0

UD ABH

4U₀

200

Q CH

a

 $U_{\mu}(x)$

(x)

όсн

б

·U_(x)

это нарастание напряжения будет происходить по экспоненте с постоянной времени $T = L_s/z$, т. е. не явится источником опасных перенапряжений.

Условие (16-9) выполняется в большинстве схем. Если, однако, на шинах, подключенных к выводу обмотки 2, будет включена большая сосредоточенная емкость (порядка ми-

крофарад или нескольких десятых микрофарады), условие (16-9) может ока-Тогда нарастание заться нарушенным. напряжения к амплитуде Uo/k будет пронсходить путем затухающих собственных <u>.</u>. В проколебаний с частотой $\omega_0 =$ цессе этих колебаний амплитуда напряжения на выводе обмотки 2 окажется близкой к $2U_0/k$, что может оказаться опасным для изоляции, например, подключенных к обмотке 2 генераторов.

При автотрансформаторном соединении обмоток наличие гальванической связи между ними приводит к опасным перенапряжениям. Рассмотрим процесс трансформации волн при автотрансформаторном соединении обмоток ВН и CH (рис. 16-11,а). При воздействии волны напряжения U_0 со стороны ввода ВН и холостой обмотки СН переходные процессы развиваются, как в одной обмотке с заземленной нейтралью (рис. 16-11,6). Колебание напряжения около кривой принужденного распределения $U_{\rm ID}(x)$ может привести к повышению напряжения на вводе СН до значений, близких к $2U_0/k$ (на рис. 16-11 принято k=2).

При воздействии волны и на ввод СН начальное распределение напряжения по обе стороны обмотки от ввода СН имеет практически одинаковую форму, как это было показано в § 16-3 (рис. 16-11,в). В принужденном режиме через обмотку СН-0 потечет сквозной ток іпр, который наведет через главный магнитный поток одинаковые э. д. с. во всех витках обмотки ВН-0. В результате

кривая U_{пр}(x) будет иметь вид прямой с координатами U₀ в точке CH и 0 в нейтрали. В точке ВН напряжение равно kU₀, где k — коэффициент трансформации. В результате колебаний напряжение на вводе ВН теоретически может достигнуть значения 2kUo и даже выше. Защита от столь высоких перенапряжений должна осуществляться с помощью разрядников, постоянно приключенных к обмоткам трансформатора.





16-6. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

В предыдущих параграфах переходные процессы в обмотках рассматривались в однофазных схемах. Такое рассмотрение соответствует случаю симметричного (трехфазного) набегания волн на трансформатор со стороны звезды либо падению волны по одной фазе при соединении обмотки в звезду с заземленной нейтралью.

Разберем теперь особенности переходных процессов в обмотках



Рис. 16-12. Падение волны на одну фазу обмотки трехфазного трансформатора, соединенной в звезду с изолированной нейтралью.

а — исходная схема; б — распределение напряжений вдоль обмотки.



Рис. 16-13. Падение волны по трем фазам на обмотку трансформатора, соединенную в треугольник. а — исходная схема; б — распределение напряжения вдоль обмотки АВ.

в некоторых иных случаях воздействий волн перенапряжений. Общий метод расчета переходных процессов остается прежним: определяются кривые первоначального Н принужденного распределения потенциалов по обпо разности моткам и этих кривых вычисляются составляющие свободного режима.

Падение волны на одну фазу трансформатора, соединенного звездой ней-С изолированной 16-12,a). тралью (рис. Две другие фазы трансформатора (В и С), заземленные через малые волновые сопротивления отходящих линий, сохраняют потенциал, близкий к нулевому. Для упрощения выводов полагаем, что фазы В и С заземле-Объединяя ны наглухо. по правилам параллельного сложения полных сопротивлений фазы В и С, переходим к однофазной схеме обмотки с заземленным концом. Первонараспределение чальное напряжения по обмотке ввиду резкого спада в начале обмотки выражается приближенно по-прежнему по закону $U_{\rm H}(x) \approx$ $\approx U_{o}e^{-\alpha x}$.

Принужденное распределение имеет перелом в точке x = l, поскольку индуктивное сопротивление параллельно соединенных обмоток B и C вдвое меньше сопротивления обмотки A (рис. 16-12,6). Потенциал нейтрали в переходном режиме не превосходит $2/_{3}U_{0}$.

Падение волны по двум фазам обмотки трансформатора, соединенной в звезду с изолированной нейтралью. Применив использованный выше способ, легко найти, что потенциал нейтрали в этом случае может достигнуть примерно 1,3U₀.

Падение волн по трем фазам на обмотку трансформатора, соединенную в треугольник (рис. 16-13,а). Рассмотрим напряжения, которые возникнут в ветви обмотки АВ (напряжения в ветвях АС и ВС будут, очевидно, такими же). Сначала определяем напряжения, возникающие в обмотке АВ при падении волны по фазе А. Точка В может считаться при этом заземленной. Соответствующие значения $U_{\rm H}(x)$ и $U_{\rm np}(x)$ снабжены на рис. 16-13,6 индексами А. Затем определяем напряжения в обмотке АВ от волны, падающей с фазы В, причем заземленной теперь считаем фазу A. Соответствующие значения $U_{\rm H}(x)$ и $U_{\rm mp}(x)$ снабжены на рис. 16-13, б индексами В. Суммируя $U_{\mu}^{A}(x)$ и $U_{\mu}^{B}(x)$, а также $U_{nn}^{A}(x)$ и $U_{nn}^{B}(x)$, определяем кривые соответственно начального и принужденного распределения напряжения в обмотке АВ при падении обеих волн. По найденным кривым $U_{\mu}(x)$ и $U_{\mu p}(x)$ легко определить кривую максимальных перенапряжений U_м. Из построения на рис. 16-13,6 видно, что максимальные напряжения, достигающие 20, возникают в середине обмотки.

16-7. ВНУТРЕННЯЯ ЗАЩИТА В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Рациональной конструкцией обмоток трансформатора и введением в конструкцию специальных устройств можно существенно снизить перенапряжения, воздействующие на продольную и главную изоляцию.

Из соотношения (16-7) следует, что емкостные градиенты, имеющие максимальные значения, пропорциональны коэффициенту аl. Следовательно, перенапряжения, ложащиеся на продольную изоляцию, могут быть снижены путем выравнивания кривой первоначального распределения напряжения.

Перенапряжения, ложащиеся на главную изоляцию, связаны с колебаниями свободной составляющей напряжения. Снижение этих перенапряжений возможно путем снижения амплитуды свободной составляюшей $U_{cB}(x) = U_{H}(x) - U_{np}(x)$. Так как принужденная составляющая $U_{np}(x)$ имеет неизменную форму, то снизить $U_{cB}(x)$ можно путем приближения $U_{H}(x) \\ K U_{np}(x)$, т. е. также путем выравнивания кривой первоначального распределения.

Рассмотрим ряд мероприятий, практически применяемых для внутренней защиты трансформаторов.

Экранирующие кольца. В связи с тем что максимальные градиенты перенапряжения ложатся на первые катушки обмотки, изоляция витков этих катушек и межкатушечная изоляция выполняется усиленной. Это ведет к увеличению расстояний между катушками и соответственно к уменьшению емкостей ΔK в начале обмотки. При этом возрастает доля напряжения, ложащаяся на первые катушки. Такое явление приводит к недоиспользованию исходного мероприятия — усиления изоляции в начале обмотки. Мерой, компенсирующей уменьшение ΔK первых катушек, является устройство емкостного или экранирующего кольца, по-казанного на рис. 16-14. Кольцо, присоединенное к началу обмотки, выравнивает электрическое поле на первых катушках и тем самым снижает градиенты перенапряжения. Изоляция кольца должна выдерживать напряжение, ложащееся на первую катушку.

Компенсационные экраны. Выровнять кривую $U_{\rm H}(x)$ можно путем компенсации токов, стекающих по емкостям ΔC (см. § 2-4). Такая компенсация может быть осуществлена с помощью специального металли-

ческого щита, окружающего обмотку и присоединяемого к ее линейному концу (рис. 16-15). Ток, подтекающий по частичным емкостям ΔC_1 , компенсирует ток, стекающий по емкостям ΔC . В результате ток, текущий по емкостям ΔK , будет оставаться неизменным и кривая первоначального распределения будет выражаться уравнением прямой $U_{\rm H}(x) =$

 $=U_{\mathfrak{o}}\left(1-\frac{x}{l}\right)$

В этом случае в обмотке с заземленной нейтралью кривая $U_{\rm H}(x)$ совпадает с кривой $U_{\rm np}(x)$ и, следовательно, в обмотке не возникают колебания.



Ряс. 16-14. Емкостное кольцо катушечной обмотки. 1 — емкостное кольцо; 2 — катушка обмотки.



Рис. 16-15. Схема емкостной компенсации обмоток трансформаторов.

(16-10)

Для того чтобы получить равномерный спад напряжения по емкостям ΔK , необходимо, чтобы емкости ΔC_1 изменялись вдоль обмотки в соответствии с уравнением



Рис. 16-16. Устройство емкостной компенсации обмотки 220 кв.

1 — емкостное кольцо: 2 — катушка обмотки; 3 — экранирующне витки; 4 — нэоляция экранирующих витков; 5 — прокладки для создения масляных каналов между экранирующими витками и катушками. Для этого необходимо, чтобы компенсационный щит располагался к обмотке наклонно. Обмотки, отличающиеся равномерным спадом кривой первоначального распределения по емкостной цепочке, называются нерезонирующими.

 $\Delta C_1 = \frac{l-x}{x} \Delta C.$

Резкий спад кривой первоначального распределения вызывается в основном стеканием токов по частичным емкостям ΔC в начале обмотки, где еще высоки напряжения катушек. Устройства, компенсирующие емкостные токи лишь в начале обмотки, оказываются поэтому при большой простоте и дешевизне весьма эффективными. На рис. 16-16 показано устройство екостной компенсации, применяемое в настоящее время для высоковольтных обмоток трансформаторов 110-220 кв. С торца обмотки расположено емкостное кольцо, присоединяемое к линейному вводу; с емкостным кольцом электрически связаны незамкнутые экранирующие витки. Емкостное кольцо и экранирующие витки отделены от основной обмотки изоляцией, растущей с возрастанием порядкового номера катушек. На рис. 16-17 показаны кривые максимальных градиентов $G_{M}(x)$ в процентах от U_0 в обмотке 220 кв с емкостной компенсацией и без нее. Из сравнения кривых видно, что устройство емкостной компенсации снижает $G_{\rm M}$ почти вдвое.

В трансформаторах с емкостным экраном весьма значительными оказываются напряжения между экранирующими витками и катушками обмотки, называемые линеалами. Это определяет необходимость высокой изоляции экранирующих витков от катушек обмотки. Как уже указывалось, изоляция экранирующих витков выполняется ступенчатой в соответствии с ростом линеалов по мере возрастания порядкового номера катушки.

Увеличение продольных емкостей применением специальных обмоток. Выравнивание кривой первоначального распределения возможно путем.





Рис. 16-17. Градиенты в обмотке 220 кв при воздействии волны 1,5/40 *мксек. I* – с экранирующими витками; 2 – без экранирующих витками;

Рис. 16-18. Два варианта (а и б) выполнения петлевой обмотки.

увеличения продольных емкостей ΔK_3 . Достигается это в так называемых петлевых обмотках. Конструкция катушек с петлевыми обмотками в двух вариантах показана на рис. 16-18. В этой конструкции удаленные по порядковому номеру витки оказываются расположенными рядом, что ведет к увеличению ΔK_3 и весьма равномерному распределению напряжения ($U_{\rm H}(x)$). Петлевые обмотки получили в настоящее время большое распространение в трансформаторах высшего класса напряжения.

Повышенными значениями ΔK обладают также обмотки с широкими дисковыми катушками. Такие обмотки имеют, в частности, реакторы поперечной компенсации на сверхвысокие напряжения.

Слоевые обмотки (рис. 16-1, а) обладают весьма благоприятными свойствами в отношении распределения напряжения и колебаний при импульсах. Особенностью слоевых обмоток является очень большая емкость между слоями и малая емкость слоев на землю, за исключением первого и последнего слоев.

В отечественном трансформаторостроении слоевые обмотки применяются для трансформаторов напряжения 35 кв и ниже с изолированной нейтралью. Для дополнительного выравнивания электрического поля обмотки снабжаются экраном, приключенным к линейному концу. На рис. 16-19 показано типичное распределение потенциалов на двойной слоевой обмотке трансформатора 35 кв. Потенциал экрана, равный напряжению приложенного импульса, передается через межслоевые емкости на все слои обмотки. В результате кривая максимальных потенциалов в обмотке лишь незначительно отличается от кривой первоначального распределения и нигде не превышает 100%!

При заземленной нейтрали использование слоевых обмоток дает существенную экономию в изоляции, поскольку изоляция (главная) наружного слоя включает в себя изоляцию всех слоев обмотки. Слоевые



Рис. 16-19. Распределение напряжения в слоевой обмотке трансформатора 35 кв. 1 — начальное распределение U_H(x); 2 — максимальные напряжения U_K(x).

обмотки поэтому применяются некоторыми иностранными фирмами для трансформаторов 154 кв и выше с заземленной нейтралью. Испытательные трансформаторы на высокие напряжения выполняются исключительно со слоевыми обмотками.

16-8. КОНСТРУКЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

На напряжении до 110 кв обмотки выполняются с линейным вводом на конце. Электрическое поле на конце обмотки существенно неравномерно (рис. 16-20, a), поэтому выполнение ввода на конце обмотки создает трудности в достижении высокой электрической прочности главной изоляции. По этой причине на напряжениях 220 кв и выше обмотки выполняются с линейным вводом в середину, где поле практически равномерно (рис. 16-20, b). Обмотка ВН при этом оказывается состоящей из двух параллельных ветвей, что удобно для мощных трансформаторов.

Типовая конструкция изоляции обмотки 110 кв показана на рис. 16-21. Главная изоляция состонт из масляных каналов и барьеров в выде изолирующих цилиндров. Барьеры затрудняют образование проводящих мостиков в масле и тем самым резко повышают электрическую прочность изоляционной конструкции (§ 7-6). На концах обмотки электрическое поле неоднородно, что создает опасность поверхностного разряда по барьерам. С целью увеличения разрядного пути изолирующие цилиндры выпускают за край обмоток. Для класса изоляции 110 кв и выше необходимым дополнением к изолирующим цилиндрам должны быть угловые шайбы, удлиняющие путь поверхностного разряда на концах обмотки. Продольная изоляция обмоток 110 кв и выше состоит из изоляции, покрывающей провода и катушки, и масляных каналов между катушками. Обмотка снабжена компенсирующим экраном. Характерная конструкция изоляции для трансформаторов более высокого напряжения показана на рис. 16-22. Обмотка 500 кв имеет петлевую конструкцию, так что в установке компенсирующих экранов нет необходимости. Угловые шайбы установлены не только между обмотками, но и на внешней стороне обмотки 500 кв.

Уровень изоляции обмоток трансформатора определяется не только конструкцией изоляции и изоляционными расстояниями, но и качеством изоляционных материалов. Для покрытия проводов и катушек применяется кабельная бумага; изолирующие цилиндры и угловые шайбы выполняются из прессшпана. В лучших образцах изолирующие цилиндры выполняются из электрокартона, а угловые шайбы штампуют-

ся из бумажно-целлюлозной массы. Все элементы волокнистой изоляции пропитываются маслом. Большое значение имеет технологическая обработка изоляции трансформатора, в частности сушка изоляции.

§ 16-8]

Масляно-барьерная изоляция современных трансформаторов, показанная на рис. 16-21 и 16-22, позволяет применять рабочие напряженности до 1—2 кв/мм. Существенно большие $E_{\rm раб}$ допустимы для бумажно-масляной изоляции. Трансформаторы с бумажно-масляной главной изоляцией выпущены фирмой BBC (рис. 16-23). Главная трудность выполнения такой изоляции состоит в необходимости



Рис. 16-20. Электрическое поле в изоляции обмоток.

а — концевой изоляции класса 110 кв с вводом на конце; б — между обмотками автотрансформатора 500/220 кв с вводом в середниу; показаны эквипотенциальные линин с указанием процента от полного напряжения; поле построено на полупроводящей бумаге (по данным Т. И. Морозовой).





Рис. 16-21. Конструкция изоляции двухобмоточного трансформатора 110 кв с вводом на конце обмотки ВН.



Рис. 16-22. Конструкция изоляции трехобмоточного автотрансформатора 500 кв.

получения плотного прилегания бумаги к катушкам, так как при наличии больших зазоров электрическая прочность изоляции резко снижается (см. § 7-9). В изоляционной конструкции, показанной на рис. 16-23, силовые линии поля в зазоре между обмоткой ВН и НН и магнитопроводом направлены примерно перпендикулярно слоям бумаги. Отсутствие тангенциальной coставляющей в напряженности электрического поля также необходимо для обеспевысокой электричечения ской прочности бумажномасляной изоляции.

Обычно вводы в трансформаторы осуществляются проходными изоляторами <u>(см. § 14-3).</u> Ha крупных ГЭС применяются кабельные вводы к обмоткам ВН. Применяются маслонаполненные кабели или кабели в стальных трубах с маслом под давлением. Конструкция маслонаполненного ввода кабеля В трансформатор 135 *кв* показана на рис. 16-24.

Проблема создания электропередач на предельные напряжения решается в зависимости от успехов трансформаторостроения в конструировании изоляции. В настоящее время уже созданы эксплуатируются И трансформаторы на напряжение 750 *кв.* На очереди конструирование трансформаторов на напряжения 1000-1200 кв. Но на этих напряжениях трансформаторы уже приобретают вес и габариты, предельные ΠO условиям железнодорожных перевозок. Дальнейшие возможности открываются при организации сборки трансформаторов на площадках подстанций или же на пути



Рис. 16-23. Бумажно-масляная главная изоляция силового трансформатора высокого напряжения.

— стержень магнитопровода; 2 — обмотка НН; 3 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 5 — обмотка ВН; 6 — отворот бумажного цилиндра; 7 — прокладка между отворотами.

использования новых конструктивных принципов. Предложено использовать каскадные (двухступенчатые) схемы выполнения трансформаторов, аналогичные каскадным испытательным установкам. В частности,

вольтодобавочные трансформаторы, располагаемые на потенциале, позволяют выбирать напряжение электропередач соответственно передаваемым мощностям, а не связывать их жестко с классом напряжения трансформаторов.

16-9. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ Трансформатора и его влияние на изоляцию

Волокнистая изоляция класса А, применяемая в трансформаторах, под действием высокой температуры старится, что в первую очередь выражается в потере ею механической прочно-



Рис. 16-24. Непосредственный ввод маслонаполненного кабеля в трансформатор.

сти. В результате под действием механических ударных усилий, возникающих в обмотках при сверхтоках, в изоляции могут появиться трещины, что ведет уже к снижению ее электрической прочности. Старение изоляции сопровождается также ее усадкой, что ведег к ослаблению крепления обмоток и их деформации при сверхтоках.

Сроки старения волокнистой изоляции в зависимости от температуры были рассмотрены в § 7-10. Исходя из разобранных закономерностей, для трансформаторов разработаны производственные инструкции по допустимым нагрузкам в зависимости от температуры окружающего воздуха, длительности перегрузки и наличия систем искусственного охлаждения.

Высокая температура приводит также к старению масла в трансформаторе. Это старение выражается в окислении и выпадении шлама. Но в отличие от твердой изоляции масло можно сменить или восстановить при капитальном ремонте трансформатора. Эффективная защита трансформаторного масла от окисления осуществляется устройством расширителя, в котором площадь соприкосновения масла с атмосферным воздухом сведена до минимума. Еще лучшими свойствами обладает азотная защита. В этой системе пространство над маслом в расширителе заполняется инертным газом — азотом. Газ в расширителе соединяется с атмосферой через масляный затвор.

Другой метод защиты масла заключается в непрерывной регенерации масла в трансформаторе с помощью термосифонного фильтра, заполненного адсорбентом, очищающим масло. Фильтр присоединяется к баку трансформатора аналогично радиатору. Масло в фильтре циркулирует (как и в радиаторе) под действием термосифонного эффекта снизу вверх. В фильтре масло проходит через адсорбент, обычно силикагель, непрерывно очищаясь от вредных примесей. Периодически (примерно раз в год) силикагель в фильтре заменяется.

16-10. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для контроля технологического режима обработки изоляции (в ходе сушки, пропитки), проверки состояния изоляции трансформатора перед включением и для профилактических испытаний изоляции в эксплуатации применяются следующие измерения характеристик изоляции, физическое обоснование которых было дано в гл. 8:

а) измерение сопротивления изоляции R₆₀;

б) измерение угла диэлектрических потерь tg 8;

в) измерение отношения или приращения емкости при низкой и высокой частотах C_2/C_{50} или $\Delta C/C_{\infty}$;

г) измерение отношения емкости при высокой и низкой температуре С_{гор}/С_{хол};

д) химический анализ масла из бака.

В трансформаторах с их сложной изоляцией часто прибегают к измерениям характеристик изоляции по зонам. Обычно измерения проводятся для трех зон: ВН — земля (схема «а»), ВН — НН (схема «б») и НН — земля (схема «в»). При схеме «а» обмотка НН приключается к экрану измерительного прибора и тем самым из измерения исключаются зоны ВН — НН и НН — земля. Аналогично проводится измерение по схеме «в». В схеме «б» рабочие выводы измерительного прибора приключаются к обмоткам ВН и НН, а экран заземляется. Для возможности выполнения таких зонных измерений все измерительные приборы (мегомметры, мосты для измерения tg & и C, приборы контроля влажности и др.) снабжаются экранами.

Характеристики изоляции служат обычно индикатором увлажнения изоляции и выпадения шлама на изоляции. Так как наличие шлама можно более точно установить по физико-химическому анализу масла,

250

то измерение характеристик изоляции служит в основном для определения степени увлажнения изоляции. В этом отношении характеристики $\lg \delta$, C_2/C_{50} , $C_{\text{гор}}/C_{\text{хол}}$ равноценны и их совместное измерение служит только для более уверенного заключения о результатах испытания. Часто поэтому довольствуются одной характеристикой, например C_2/C_{50} , которая проще всего измеряется.

Разряд во внутренней изоляции трансформатора имеет преимущественно ионизационную форму. Поэтому выявление частичных разрядов может служить хорошим индикатором возникновения и развития разряда, приводящего с течением времени к пробою изоляции трансформатора. Опыты по измерению частичных разрядов в трансформаторах проводятся в настоящее время во многих странах. Трансформатор возбуждается рабочим или повышенным напряжением со стороны обмотки НН. На выводе обмотки ВН через разделительный конденсатор *C*, свободно пропускающий колебания высокой частоты, приключается индикатор частичных разрядов, схема которого была приведена в § 8-7.

Измерения частичных разрядов могут вестись в эксплуатационных условиях. Внедрение таких измерений в программу профилактических испытаний целесообразно в первую очередь для мощных трансформаторов со сниженными уровнями изоляции.

16-11. СУШКА ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Волокнистая изоляция трансформаторов при соприкосновении с атмосферным воздухом или увлажненным маслом впитывает в себя влагу, в результате чего ее электрическая прочность резко снижается



Рис. 16-25. Характеристика изоляции ΔС/С∞, tg δ, R₆₀ трансформатора в процессе вакуумной сушки при 100° С.

и изоляция быстро стареет. Поэтому сушка является важнейшей технологической операцией при производстве и монтаже силовых трансформаторов.

Сушка трансформаторов в заводских условиях проводится в вакуум-сушильных шкафах с паровым или электрическим обогревом и

[Гл. 17

теплоизоляцией. Для ускорения сушки применяется температура 100— 110°С, максимально допустимая для волокнистой изоляции трансформатора. Обычно сушка проводится при давлении около 70 *мм рт. ст.* Дальнейшее снижение давления еще более повышает эффективность сушки, однако требует усиления механической прочности шкафов. Процесс сушки продолжается несколько часов.

Для сокращения времени сушки применяется принудительная циркуляция воздуха по замкнутому циклу с промежуточным осушением воздуха. Весьма эффективен также прогрев обмотки током. В заводских условиях применяют постоянный ток плотностью около 1 a/mm^2 . Внутреннее повышение температуры в обмотке создает термодиффузионный эффект перемещения влаги к поверхности изоляции.

В эксплуатационных условиях сушка изоляции производится в собственном баке с нагревом от паровых обогревателей, воздуходувок или токами нулевой последовательности, пропускаемыми через обмотки.

Большую ценность имеет измерение характеристик изоляции для контроля сушки трансформатора. Прекращение (в некотором интервале времени) выделения конденсата еще не может служить вполне объективным критерием конца сушки, так как в обмотках еще может находиться остаточная влага. Путем измерения R_{60} и особенно tg δ и $\Delta C/C_{\infty}$ (§ 8-5) можно надежно контролировать процесс сушки. Типичные кривые этих характеристик в процессе сушки силового трансформатора 110 кв приведены на рис. 16-25. Признаком конца сушки является стабилизация величины tg δ и снижение $\Delta C/C_{\infty}$ до значения порядка 10%.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Рассчитайте и постройте в координатах U, x огибающую емкостных и максимальных потенциалов вдоль обмотки трансформатора при воздействии прямоугольной волны перенапряжения с амплитудой $U_0 = 100\%$. Число катушек n = 40, емкости $\Delta C = = 20 \ n\kappa\phi$, $\Delta K = 800 \ n\kappa\phi$. Нейтраль трансформатора: а) заземлена, б) изолирована.

2. Для условий задачи 1 постройте кривую распределения емкостных и максимальных градиентов в обмотке.

3. Опишите развитие колебаний в обмотках трехфазного трансформатора, соединенных в звезду с изолированной нейтралью, при падении волн на одну, две и три фазы трансформатора.

 Опишите переход волн между обмотками автотрансформатора при падении волны:

а) на ввод высокого напряжения, ввод среднего напряжения разомкнут;

б) на ввод среднего напряжения, ввод высокого напряжения разомкнут.

5. Нарисуйте (эскизно) устройства для выравнивания распределения напряжения вдоль обмотки. Какое влияние оказывают эти устройства на градиентные напряжения, на амплитуды колебаний в обмотке?

6. Используя рисунки гл. 16, опишите характерные особенности изоляционных конструкций трансформаторов.

7. Каким испытаниям подвергается изоляция трансформаторов: а) на заводе?
6) в эксплуатации? Нарисуйте схемы испытаний.

Глава семнадцатая

ИЗОЛЯЦИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

17-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К вращающимся машинам относятся генераторы (в том числе генераторы реактивной мощности — синхронные компенсаторы) и электродвигатели. Генераторы — источники электрической энергии в энергетических системах—являются наиболее ответственным оборудованием, к которому предъявляются высокие требования в отношении всех эксплуатационных показателей, в том числе надежности изоляции.
Номинальные напряжения генераторов составляют 3,15; 6,3; 10,5; 21 кв. Для генераторов мощностью 50 Мвт и выше допускаются номинальные напряжения 13,8; 15,75; 18 и 20 кв, а напряжения свыше 21 кв устанавливаются по индивидуальным техническим условиям.

Максимальная единичная мощность турбогенераторов, находящихся в эксплуатации, равна 500 тыс. квт; в настоящее время ведутся работы, направленные на доведение мощности в одной единице до 800— 1 000 тыс. квт; при этом номинальное напряжение генератора повысится до 24—36 кв. Максимальная мощность гидрогенераторов достигла 500 тыс. квт.

Несмотря на то что номинальные напряжения генераторов относительно малы по сравнению с номинальным напряжением остального электрического оборудования электростанций, проектирование, изготовление и эксплуатация изоляции генераторов, в первую очередь турбогенераторов, связаны со значительными техническими трудностями, обусловленными конструктивными особенностями электрических машин. Ни в каком другом высоковольтном устройстве (за исключением только конденсаторов) нет такого жесткого ограничения по размеру изоляционного промежутка, как в отношении толщины изоляции статорной обмотки турбогенератора. Поэтому для изоляции статорных обмоток применяют электрически наиболее прочные изоляционные материалы, а пазу и стержню придается наиболее рациональная форма, обусловливающая максимально возможное выравнивание электрического поля, в котором работает изоляция.

Изоляция электрических машин испытывает также значительные механические нагрузки, в том числе ударные нагрузки при коротких замыканиях и вибрации, вызванные вращением ротора. Это налагает высокие требования также на механическую прочность изоляции.

Изоляция машин работает в напряженном температурном режиме, определяемом активными потерями в меди обмогки и условиями охлаждения. В машинах применяют изоляцию класса В. В настоящее время ведутся изыскательские работы по созданию высоковольтной изоляции класса F. При полных нагрузках «срок жизни» изоляции исчисляется в 20—25 лет. Практически в энергосистемах работают генераторы со значительно бо́льшим «сроком жизни».

На работу изоляции, как следует из изложенного, большое влияние оказывает система охлаждения генератора. В генераторах малой и средней мощности применяется поверхностная система охлаждения воздухом или водородом. При этой системе охлаждения тепловой поток от меди обмотки проходит через изоляцию, к которой в этом случае предъявляются жесткие требования и в отношении теплопроводности. В машинах большой мощности (200 тыс. квт и выше) применяется внутреннее водяное, масляное или водородное охлаждение обмоток. При этой системе охлаждения изоляция разгружается от теплового потока и служит только в качестве изолирующего элемента.

Изоляцию машин можно подразделить на корпусную (или главную) и междувитковую. Современные турбогенераторы большой мощности имеют обмотку с одновитковыми стержнями, и, следовательно, в этих машинах междувитковая изоляция в стержне отсутствует.

17-2. КОРПУСНАЯ (ГЛАВНАЯ) ИЗОЛЯЦИЯ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ¹

Конструкция корпусной изоляции машин с внутренним охлаждением показана на рис. 17-1. Стержни состоят из ряда параллельных

¹ § 17-2-17-4 написаны при содействии Л. Л. Хаймовича.

медных проводников, разделенных низковольтной изоляцией — асбестовым волокном или стекловолокном. Высоковольтной изоляцией является изоляция стержня относительно корпуса и между стержнями.

По материалу высоковольтная изоляция разделяется на термопластичную (старые и современные конструкции) и термореактивную (новейшие конструкции мощных машин). Нагревание термопластичной изоляции сопровождается размягчением пропиточного состава; при охлаж-



Рис. 17-1. Поперечный разрез паза статора турбогенератора.

а — с непосредственным охлаждением обмотки водой;
 б — с непосредственным охлаждением обмотки водородом:
 1 — клин;
 2, *12*, *13* — прокладки изоляционные:
 3 — медный проводник изолированный;
 4 — медный полый проводник изоляционные;
 3 — колированный;
 4 — медный полый проводник изоляционные;
 4 — медный проводников;
 6 — корпусная изоляция,
 7 — полупроводящая лента;
 8 — изоляция мест переходов транспозиции проводников;
 9 — изоляционная прокладка с закруглением;
 11 — алюминиевая фольга;
 14 — немагнитная вентиляционная трубка;
 15 — изоляция вентиляционной трубки.

дении этот состав вновь затвердевает. В результате изоляции могут образо-B воздушные включеваться ния, снижающие ее электрическую И механическую прочность. При первом нагревании термореактивной изоляции пропиточный COстав переходит в неплавкое состояние, что препятствует образованию воздушных включений.

По конструкции изоляция разделяется на гильзовую (старые конструкции) и непрерывную (современные и новейшие конструкции).

При применении гильзовой комбинированной изоляции пазовая и лобовая части стержня оформляются по-разному: пазовая часть, как более напряженная, выполняется в виде гильзы из микафолия, а лобовая часть, электрически менее напряженная, — на основе изоляционных лент (микаленты, лакотканевой ленты и др.). В этом случае места стыка изоляции пазовой и лобовой

частей располагаются за пределами паза на определенном удалении от стали статора, зависящем от номинального напряжения машины. Наличие стыка изоляции, где имеет место нарушение ее непрерывности, приводит к резкому ослаблению ее электрической прочности в этом месте. Этот принципиальный недостаток, присущий изоляции такого типа, ограничивает ее применение только для машин относительно малой мощности и невысокого напряжения.

Непрерывная изоляция, выполняемая из одного и того же материала на всей длине стержня, лишена вышеуказанного недостатка и имеет практически одинаковую электрическую прочность в пазовой и лобовой частях.

Современные машины имеют непрерывную микалентную компаундированную изоляцию. Микалента — гибкий электроизоляционный материал, состоящий из двух слоев специальной бумажной подложки, между которыми располагаются пластинки слюды. Слюда в микаленте между подложками удерживается склеивающим масляно-битумным лаком. Для изоляции высоковольтных обмоток используется слюда типа мусковит, имеющая наилучшие диэлектрические характеристики.

На стержень микалента наносится обычно вполнахлеста: число слоев микаленты обусловливается толщиной изоляции в зависимости от номинального напряжения машины. После нанесения слоев микаленты стержни помещаются в специальные компаундировочные котлы, где изоляция сушится, вакуумируется и пропитывается под давлением расплавленным асфальтовым битумом. Этот процесс называется компаундированием изоляции, он призван повысить и стабилизировать физико-механические свойства изоляции — электрическую прочность, диэлектрические потери, механическую прочность, влагостойкость Н Т. Д.

Высоковольтные стержни, имеющие довольно большое количество слоев микаленты, изолируются в несколько приемов и столько же раз подвергаются компаундированию.

Непрерывная микалентная компаундированная изоляция является термопластичной. При достаточно высокой культуре производства она и сегодня еще с успехом применяется для машин единичной мощности до 200 тыс. квт и номинальным напряжением до 15,75 кв.

В последние 10 лет в отечественном турбогенераторостроении и за границей наметилась четкая тенденция перехода в высоковольтной изоляции к изготовлению обмотки статора на термореактивном связующем. Благодаря своим исключительным свойствам высоковольтная термореактивная изоляция позволяет создать машины предельных мощностей-300-800 тыс. квт. Основными материалами, применяемыми для изолировки стержней в этом случае, являются стекломикалента и стеклослюдинитовая лента. В этих лентах диэлектрический барьер — слюда или слюдинитовая бумага — располагаются между двумя слоями тонкой специальной стеклотканевой подложки. Для пропитки изоляции применяются так называемые 100%-ные лаки и компаунды с активными растворителями, отверждение которых идет без выделения летучих продуктов. Это свойство 100% ных лаков и компаундов позволяет создать монолитную композицию, практически лишенную полостей (воздушных включений) с возможными внутренними разрядами, что особенно важно для высоковольтной изоляции машин. Пропитывающие составы для изоляции высоковольтной обмотки выполняются на основе модифицированных эпоксидных и полиэфирных смол. Эти отвержденные пластифицированные компаунды отличаются высокой механической прочностью, эластичностью, очень хорошей адгезией, высокой электрической прочностью, малыми диэлектрическими потерями, короностойкостью, маслостойкостью.

17-3. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ОБМОТКИ С ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

После укладки в паз статора стержень занимает свое рабочее положение, при этом в зависимости от степени загрузки изоляции вдоль его длины различают три участка: пазовая часть, места выходов стержня из паза и лобовые части.

Пазовая часть (рис. 17-1). Уровень напряженности электрического поля, при котором работает изоляция паза стержня, зависит от номинального напряжения машины, толщины изоляции и конфигурации поверхности меди стержня и паза статора. Как правило, современные мощные турбогенераторы имеют пазы и стержни прямоугольной формы. При такой форме электродов максимальные напряженности электрического поля имеют место на углах меди стержня, а изоляция по объему паза нагружается крайне неравномерно.

Степень выравнивания электрического поля в пазу статора характеризуется коэффициентом неравномерности электрического поля K, равным отношению максимальной напряженности поля $E_{\rm M}$, имеющей место в пазу, к напряженности равномерного поля E_0 . Коэффициент неравномерности электрического поля паза сильно зависит от величины радиуса закругления ребер меди стержня; как видно из рис. 17-2, он



Рис. 17-2. Коэффициент неравномерности поля К в зависимости от отношения раднуса закругления r к толщине изоляции h.

резко уменьшается с увеличением радиуса закругления r от 0 до 0,5 h(h — толщина изоляции) и при дальнейшем увеличении радиуса изменяется незначительно.

Для выравнивания электрического поля на верхнюю и нижнюю грани стержня накленваются изоляционные прокладки с необходимым радиусом закругления (рис. 17-1), поверх которого наносятся профильные прокладки из металлической фольги, электрически соединенные со стержнем. Таким образом формируется эквипотенциальная поверхность неизолированного стержня с необходимыми для выравнивания поля раднусами закругления на ребрах. Вместо металлической фольги для выполнения радиуса закругления ребер используется также полупроводящая лакоткань, стеклоткань или бумага. Величина радиуса закругления ребер составляет обычно 3-5 мм, что при существующих толщинах изоляции обеспечивает вполне удовлетворительное распределение поля в пазу статора.

Толщины изоляции в пазу в зависимости от номинального напряжения машины характеризуются кривыми, приведенными на рис. 17-3.

Кривая I относится к современной микалентной компаундированной изоляции; кривая 2 является предельной для новых типов изоляции. При переходе к новой изоляции напряженность электрического поля в равномерной части поля повышается от 2,5—3,0 до 3—4 кв/мм, а максимальная напряженность при радиусе закругления ребра меди, равном 0,5 мм, повышается от 5,0—8,5 до 5,5—10,5 кв/мм. Сокращению толщины изоляции способствует в значительной мере выравнивание электрического поля в пазу, приводящее к более эффективному и равномерному использованию изоляции во всем объеме паза.

Поверх изоляции стержня наносится полупроводящее покрытие, электрически соединяемое со стенками паза. Тем самым воздушные прослойки между стержнем и стенкой паза разгружаются от электрического поля.

Место выхода стержня из паза. На участках выхода стержня из паза имеет место краевой эффект, обусловливающий повышенную напряженность электрического поля как внутри твердой изоляции стержня, так и в окружающей его газовой среде (воздух, водород). Если не принять меры по ослаблению поля, то в воздухе или в водороде возникает коронирование, постепенно разрушающее изоляцию стержня.

Для устранения эффекта коронирования необходимо обеспечить плавное распределение электрического потенциала по поверхности изоляции лобовых частей стержней, при котором составляющая напряженности электрического поля вдоль поверхности была бы меньше критической напряженности начала ионизации воздуха или водорода (меньше 2 кв/мм). В настоящее время для выравнивания электрического

поля в месте выхода стержня из паза применяются два способа регулирования потенциала на поверхности изоляции: омический — с помощью полупроводящих покрытий, наносимых на поверхность изоляции стержня, и емкостный — с помощью проводящих или полупроводящих прокладок экранов, встраиваемых в толщу изоляции.

Более простым по исполнению и поэтому более распространенным является способ противокоронной защиты с помощью специально выполненного полупроводящего покрытия изоляции лобовой части в месте выхода из паза (рис. 17-4). Для получения равномерного распределения потенциала по поверхности изоляции необходимо, чтобы удельное поверхностное сопротивление покрытия вдоль стержня изменялось обратно пропорционально плотности тока, протекающего в покрытии. Обычно на длине, где требуется произвести выравнивание поля, по-





1 — микалентная компаундированная; 2 — термореактивная.

крытие выполняется в две-три ступени: за пределы паза на расстояние 50—100 мм выводится полупроводящее покрытие с поверхностным сопротивлением $\rho_s = 10^3 - 10^5$ ом, далее следует участок длиной 200— 300 мм с более высоким удельным сопротивлением $\rho_s = 10^7 \div 10^9$ ом и, наконец, оставшийся участок лобовой части до головок имеет поверхностное сопротивление, свойственное собственно изоляции, $\rho_s = 10^{13} \div 10^{14}$ ом.

Противокоронное полупроводящее покрытие выполняется на основе асбестовой ленты, пропитанной полупроводящими масляно-битумными или глифталь-масляными лаками, в которых в качестве проводящей компоненты использованы сажа либо графит.

Для повышения стабильности и эффективности противокоронной защиты, а также для предотвращения повреждения полупроводящих лент покрытие защищается слоем изоляции толщиной 0,4—0,5 мм. В этом случае покрытие, находясь в твердой среде, электрическая прочность которой выше прочности воздуха или водорода, дает более благоприятное распределение потенциала на поверхности изоляции и повышает напряжение начала коронирования примерно в 1,5 раза. Такое покрытие — полупроводящее покрытие утопленного типа — нашло применение для машин на номинальное напряжение 20—24 кв.

Для выравнивания электрического поля в месте выхода из паза по способу емкостного распределения внутрь изоляции встраиваются расположенные определенным образом друг относительно друга проводящие или полупроводящие конденсаторные прокладки. Прокладки ступенчато располагаются между краем пазового полупроводящего покрытия, выведенного за пределы паза, и медью стержня и образуют цепочку 17—641 емкостей, по которым распределяется напряжение, приложенное к стержню (рис. 17-5). Принцип распределения напряжения по поверх-



Рис. 17-4. Схема полупроводящего противокоронного покрытия в месте выхода стержня из паза.

I — асбестовая лента, пропитанная полупроводящим лак $(M, \rho_s = 10^3 + 10^5 \text{ ом}; 2$ — асбестовая лента, пропитанная полупроводящим лаком, $\rho_s = -10^7 + 10^9 \text{ ом}; 3$ — стеклянная лента, пропитанная изоляционным лаком, $\rho_s = 10^{12} + 1^{19} \text{ ом}.$

ности изоляции с помощью конденсаторных прокладок был рассмотрен в § 2-6.

Емкостный способ противокоронной защиты изоляции обмотки статора при правильном его исполнении обладает наибольшей надежностью и стабильностью, практически не зависящими ни от воздействия повышенной температуры и окружающей среды, ни от срока службы обмотки, так как эффективность этого способа определяется лишь неизменностью расположения

прокладок относительно края паза. Недостатком этой конструкции противокоронной защиты, из-за которого она пока не нашла широкого распространения, является сложность ее исполнения, связанная с требованием точного расположения прокладок внутри изоляции.

Лобовая часть. В лобовых частях (рис. 17-6) стержни с их изоляцией находятся в газовой среде (воздух, водород). Большая часть на-

пряжения падает на газовые промежутки. Поэтому эти промежутки выбираются из условия недопущения коронирования при нормальном напряжении машины.

В обмотках с внутренним водяным охлаждением вода подводится через головки лобовых частей. Подача (и слив) воды к обмотке осуществляется по специальным изоляционным шлангам, которые соединяют наконечники головок обмотки, находящиеся под высо-



Рис. 17-5. Схема противокоронной защиты емкостного типа в месте выхода стержня из паза.

I — асбестовая лента, пропитанная полупроводящим лаком, ρ_s=10³÷10⁵ ом; 2 — корпусная изоляция; 3 — полупроводящие (проводящие) прокладки; 4 — медь стержия; 5 — стеклянная лента, пропитанная изоляционным лаком.

ким потенциалом с заземленным водосборным коллектором. Шланги обычно выполняются из фторопласта или тепломаслостойкой резины.

17-4. ВИТКОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Раньше было указано, что современные крупные генераторы имеют обмотку с одновитковыми стержнями. Обмотки машин малой и средней мощности (до 30 *Мвт*) имеют стержни с несколькими витками. Рабочее напряжение между витками не превышает нескольких сотен вольт. Междувитковая изоляция выбирается соответственно определенной кратности по отношению к этому рабочему напряжению, что позволяет выполнять эту изоляцию на невысокие испытательные напряжения — в пределах 1 000—2 250 в. В машинах напряжением до 11 кв междувитковая изоляция состоит из одного-двух слоев микаленты с наложенным сверху одним слоем стеклоленты.



Рис. 17-6. Лобовая часть обмотки статора с водяным охлаждением.

1 — верхний стержень; 2 — нижний стержень; 3 — колпачок (изоляция головок); 4 — изоляционный кронштейн крепления обмотки; 5 — шланг водоподвода; 6 — изолятор коллектора.

17-5. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА И Его влияние на изоляцию

В электрических машинах применяется изоляция класса В, для которой допустима температура 130° С (см. § 7-1). Однако для машин допускается максимальная температура 105° С. Это объясняется тем, что температура размягчения пропиточного компаунда лежит в пределах 105—110° С, а также возможностью местных небольших перегревов над температурой, измеряемой заложенными в изоляцию термометрами.

Под воздействием высоких температур, а также механических воздействий (вибраций, ударных нагрузок при коротких замыканиях и несинхронных включениях) изоляция старится. Срок службы изоляции генераторов (как и трансформаторов) может быть охарактеризован формулой (7-10). Накопленный опытный материал показывает, что с ростом температуры на каждые 10° С срок службы изоляции машины снижается вдвое.

17-6. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ НА ГЕНЕРАТОРЫ И ВОЛНОВЫЕ Процессы в обмотках

Как правило, генераторы работают в блоках с трансформаторами или приключены непосредственно к кабельной сети. Поэтому генераторы не подвергаются непосредственному воздействию грозовых волн. Изоляция генераторов нормального исполнения не рассчитывается на перенапряжения атмосферного происхождения, и в изоляционных конструкциях генераторов отсутствуют устройства для выравнивания распределения напряжения по обмотке при импульсах. В этом коренное отличие конструкции изоляции генераторов от трансформаторов.

В то же время на генератор, работающий в блоке с трансформатором, могут воздействовать импульсы атмосферного происхождения, переходящие через обмотки трансформаторов. На изоляцию генераторов воздействуют также коммутационные импульсы, в частности при дуговых замыканиях на землю в кабельной сети и при несинхронных включениях генератора на сеть. Наконец, в ряде случаев для удешевления сетевого строительства допускается работа генераторов малой и средней мощности непосредственно на воздушные сети 3—10 кв. Все эти случаи послужили причиной постановки ряда исследований для изучения импульсной прочности изоляции машин и волновых процессов в обмотках.



Рнс. 17-7. Схема замещения обмотки для расчета волновых процессов в виде цепочки со звеньями ΔL , ΔC .

Коэффициент импульса главной изоляции β в среднем составляет 1,25. Максимальная амплитуда импульса, допустимая для изоляции машин, равна βU_{исп} $\sqrt[7]{2}$, где $U_{исп}$ — испытательное напряжение главной изоляции на промышленной частоте.

Под воздействием импульсного напряжения в обмотке возникает переходный процесс. Схема замещения обмотки машины может быть



Рис. 17-8. Волновое сопротивление обмотки машины (одной фазы) в зависимости от параметра Мат/ V кв при движении волн по одной фазе (кривая I) и по трем фазам (кривая 2).



Рис. 17-9. Движение волны по витку обмотки машины.

представлена аналогично трансформаторной обмотке в виде цепочки элементов ΔC , ΔK и ΔL , где ΔC и ΔL — емкость на землю и индуктивность витков, ΔK — междувитковая емкость. В отличие от трансформаторов емкости ΔK малы и незначительно влияют на переходный процесс, поэтому схема замещения обмотки может быть представлена В виде цепочки элементов обмотки на все более мел-

 ΔC и ΔL (рис. 17-7). При разбиении обмотки на все более мелкие звенья схема вырождается в линию с распределенными постоянными с волновым сопротивлением $z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ и скоростью распространения волны $v = \sqrt{\frac{1}{L_0C_0}}$, где L_0 и C_0 – индуктивность и емкость на единицу длины. Таким образом, слабая электромагнитная связь катушек позволяет замещать обмотку линией с усредненным волновым сопротивлением, по которой движется волна, причем обратным «проводом» служит сталь статора. Волновые сопротивления обмотки снижаются с увеличением мощности машины, когда растет емкость обмотки и снижается ее индук-

тивность. По этой же причине волновые сопротивления обмотки растут с повышением номинального напряжения. Зависимость z от параметра *Мат*/ $\sqrt{\kappa a}$, приведенная на рис. 17-8, получена усреднением данных обмеров большого числа турбогенераторов.

Поверхностный эффект в стали на высоких частотах приводит к вытеснению импульсного тока к поверхности паза. Это вытеснение вызывает интенсивное затухание и сглаживание фронта волны. Форма бегущей волны показана на рис. 17-9. Начало фронта движется со скоростью $v_0 = c/\sqrt{\epsilon'}$, где ϵ' — относительная диэлектрическая постоянная изоляция, c — скорость света. Практически, однако, за начало фронта волны следует принять точку A, где начинается быстрый подъ-



Рис. 17-10. Средняя скорость распространения волн по обмотке машины в зависимости от мощности при движении волн по одной фазе (кривая 1) и по трем фазам (кривая 2).

ем напряжения. Скорость v перемещения точки A существенно ниже v₀. С ростом мощности машины скорость v падает (рис. 17-10).

Полагая, что волна в обмотке имеет косоугольный фронт с крутизной *a*, найдем, что на междувитковую изоляцию машин средней и малой мощности действует напряжение

$$\Delta U = \frac{al}{v}, \qquad (17-1)$$

где *v* — скорость распространения волны, *м/мксек*;

l — длина витка, *м*;

а — крутизна, кв/мксек.

Приравнивая ΔU допустимому импульсному напряжению на междувитковой изоляции, определяем допустимую среднюю крутизну волны:

$$a_{\text{gov}} = \frac{U_{\text{men,B}} \tilde{\gamma} \, \overline{2} \, \cdot 1, 25 \, v}{l}, \qquad (17-2)$$

где U_{исп.в} — испытательное напряжение междувитковой изоляции.

Расчеты показывают, что для защиты междувитковой изоляции снижения крутизны до 5—6 кв/мксек вполне достаточно.

При падении волн по всем трем фазам напряжение на изолированной нейтрали может за счет отражения подняться до двойной величины. Как и в трансформаторных обмотках, столь значительный подъем напряжения возможен только при воздействии на обмотку волны с достаточно крутым фронтом. Из расчетов следует, что опасные для изоляции нейтрали повышения напряжения отсутствуют, если $a \le \le 2 \kappa в/мксек$.

17-7. ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК

Основным видом контроля изоляции статорных обмоток является испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Эти испытания позволяют исключить слабые места изоляции обмоток и, таким образом, своевременно предупреднть некачественное изготовление обмотки на заводе-изготовителе (пооперационные технологические испытания) и аварийные выходы машины из строя в процессе эксплуатации (профилактические испытания). Оптимальный уровень испыта-



Рис. 17-11. Испытательные напряжения изоляции обмотки статора в зависимости от номинального напряжения.

1 — готовый стержень после нэготовления; 2 — обмотка после сборки и испытания машины (пофазио); 3 — обмотка перед сдачей машины в эксплуатацию (пофазио). тельного напряжения, а также длительность приложения его к испытываемому объекту устанавливаются на основании анализа эксплуатации и результатов испытания на электрическую, прочность выбранного типа изоляции с учетом технической и экономицелесообразности. Испытательное ческой напряжение не должно быть чрезмерно завышенным, чтобы исключить необратимое старение изоляции и неоправданный отсев за счет пробоя стержней с изоляцией удовлетворительного уровня, и в то же время испытательное напряжение не должно быть настолько низким, чтобы не выявить стержни с действительно заниженным уровнем прочности изоляции. Длительность приложения испытательного переменного напряжения составляет 1 мин.

Величины испытательных напряжений, применяемые в процессе изготовления обмотки и сдачи генератора в эксплуатацию, определяются в зависимости от номинального напряжения машины согласно кривым на рис. 17-11. Снижение испытательных на-

пряжений по мере монтажа машины объясняется возможностью образования в изоляции микроскопических трещин, в частности при закладке стержней в пазы.

Величина испытательного напряжения при периодически проводимых профилактических испытаниях изоляции в процессе эксплуатации генератора составляет $U_{\text{нсн}} = (1,5 \div 1,7) U_{\text{ном}}$.

В последние годы для проверки качества состояния изоляции обмотки используются испытания высоким постоянным напряжением. Преимущества таких испытаний были рассмотрены в § 8-8. Испытание постоянным напряжением особенно широко применяется для оценки состояния изоляции на местах установки машин и на основании этого опыта начинает внедряться при пооперационном контроле сборки обмотки на заводах-изготовителях. При приемо-сдаточных испытаниях машины производят испытание изоляции постоянным напряжением величиной $U_{\rm исп}$ =1,15 ($2U_{\rm n}$ +3) ка с одновременным измерением токов утечки при увеличении напряжения от нуля до испытательного значения. По абсолютной величине токов утечки и по характеру изменения токов утечки от напряжения судят о степени увлажненности изоляции и возможности проведения более жесткого испытания — переменным напряжением напряжением (кривая 3 на рис. 17-11) непосредственно перед пуском машины в эксплуатацию.

§ 17-8]

Кроме испытания изоляции повышенным переменным и постоянным напряжением, качество изоляции контролируется также путем измерения диэлектрических потерь. Это испытание проводится обычно только на заводах-изготовителях для контроля технологических процессов изготовления изоляции — пропитки, опрессовки, термообработки и пр., определяющих однородность и монолитность изоляции. Измерение tg & производится при номинальном напряжении машины и при изменении напряжения от 0,5 $U_{\rm ном}$ до 1,5 $U_{\rm ном}$.

17-8. СОЗДАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОЧЕНЬ ВЫСОКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

На современных ГРЭС генераторы обычно работают в блоках с повышающими трансформаторами. Весьма заманчива идея создания генераторов на очень высокие напряжения — 35, 110 и даже 220 кв, что позволило бы питать распределительные сети (кабельные и воздушные) этих номинальных напряжений непосредственно от генераторов.

Повышение напряжения генераторов в их современном испольнении связано с большими трудностями. Разработана рациональная конструкция генератора на повышенные напряжения с бумажно-масляной корпусной изоляцией. Статор с обмоткой отделен от вращающегося ротора изоляционной перегородкой. Пространство статора заполнено маслом, которое служит (как и в трансформаторах) в качестве охлаждающей и изоляционной среды. Изоляция обмоток бумажно-масляная. Высокая электрическая в очность такой изоляции позволяет подымать рабочее напряжение генераторов до 35 кв и выше.

В СССР ведутся работы по созданию генераторов на напряжения 110—220 кв. Так как генераторы 110—220 кв могут приключаться к воздушным линиям, то изоляционные конструкции этих генераторов должны быть рассчитаны на воздействие грозовых волн.

Вопросы и задачи для самопроверки

 Какие виды корпусной изоляции применяют в мощных генераторах? Укажите характерные особенности этих видов изоляции.

2. Используя рис. 17-1, объясните, какими средствами снижают напряженности электрического поля в пазе. Каким путем устраняют разряды в газовой прослойке между стержнем и стенкой паза? Какое влияние на электрическую прочность изоляции оказывает внутреннее охлаждение стержней обмотки?

 Покажите схематически методы устранения коронирования в местах выхода стержня из паза. Укажите преимущества и недостатки этих методов.
 Для машины 10,5 кв мощностью 20 Мвт (с несколькими витками в пазу) опре-

4. Для машины 10,5 кв мощностью 20 Мвт (с несколькими витками в пазу) определите волновое сопротивление z и допустимую крутизну набегающей волны $a_{\pi \circ \pi}$, приняв $U_{\pi \circ \pi,\pi} = 2,25$ кв и длину активной части стали статора равной 3 м.

 Опишите методы и укажите нормы профилактических испытаний корпусной изоляции генераторов.

Часть вторая

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Источником возникновения атмосферных перенапряжений в системах является грозовой разряд, обычно в виде молнии между облаком и землей. Если перенапряжение возникло в результате поражения молнией проводов сети, то говорят о перенапряжениях прямого удара молнии (п. у. м.). При отсутствии непосредственного поражения молнией проводов атмосферное перенапряжение называется индуктированным. Перенаяряжения прямого удара молнии могут достигать значений, достаточных для перекрытия изоляции линий любого класса напряжения. Основной мерой защиты линий передачи от прямых ударов молнии является подвеска хорошо заземленных тросов, экранирующих провода. Важным средством повышения надежности линий является автоматическое повторное включение.

Волны перенапряжений, возникающие на линии, набегают на подстанцию, где они воздействуют на изоляцию трансформаторов, аппаратов и ошиновки. Основным средством защиты подстанционной изоляции служит вентильный разрядник РВ. Успехи в конструировании РВ и в разработке схем защиты обеспечивают в настоящее время создание надежной защиты трансформаторных подстанций, а также вращающихся машин, приключенных к воздушным линиям.

Изучение атмосферных перенапряжений на линиях и подстанциях основывается на теории волновых процессов в линиях и в схемах, содержащих линии. Поэтому гл. 18 настоящего раздела посвящена изложению основ этой теории. Материалы этой главы используются также при изучении внутренних перенапряжений (раздел 7). Далее изучаются характеристики молнии, молниеотводов, заземлителей и грозозащитных разрядников. На основе этих характеристик осуществляется грозозащиты та линии, подстанций и вращающихся машин; методы грозозащиты излагаются в гл. 19, 20, 21.

Явления, связанные с развитием молнии и грозозащитой, имеют существенно статистический характер. Поэтому большинство расчетных параметров задается вероятностными кривыми (или функциями). Но и эти кривые, установленные на основе ограниченного числа измерений или наблюдений, а иногда и косвенных признаков, достоверны только в той ограниченной области, в которой результаты расчетов не расходятся с практикой грозозащиты. Исследования параметров молнии и устройств грозозащиты, продолжающиеся во многих странах, будут вносить коррективы в исходные вероятностные данные.

Глава восемнадцатая

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНИЯХ И В СХЕМАХ С ЛИНИЯМИ

18-1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА НА ЛИНИИ БЕЗ ПОТЕРЬ

Волновой процесс на линии создается при любом электромагнитном возмущении, например включении линии на источник напряжения, отключении линии, коротком замыкании, поражении линии грозовым разрядом. Электромагнитное возмущение в какой-либо точке линии вызывает движение волн от этой точки в обоих направлениях. В реальных линиях волновой процесс при высоких напряжениях сопровождается потерями энергии на нагрев проводников и корону. Однако в практических расчетах очень часто пренебрегают этими потерями, что дает значительное упрощение. Дифференциальные уравнения волнового процесса на линии без потерь имеют вид:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_{\bullet} \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C_{\bullet} \frac{\partial u}{\partial t}, \tag{18-1}$$

где L₀ и C₀ — индуктивность и емкость линии на единицу длины.

Решением этих уравнений являются волновые функции или волны напряжения и тока:

$$u = u^{+} + u^{-} = F^{+}(x - vt) + F^{-}(x + vt);$$

$$i = i^{+} - i^{-} = \frac{1}{z}F^{+}(x + vt) - \frac{1}{z}F^{-}(x + vt),$$
(18-2)

где $z = \sqrt{L_{0}/C_{0}}$ — волновое сопротивление линии без потерь; $v = \frac{1}{V L_{\bullet} C_{\bullet}} = \frac{c}{V \epsilon' \mu'}$ - скорость распространения волны; с — скорость света, равная 3.10¹⁰ см/сек = 300 м/мксек.

Для воздушной линии $\mathfrak{e}' = \mu' = 1$ и v = c. Для кабельной линии $\mu' = 1$, $\mathfrak{e}' \approx 4$ н $v = c/2 = 150 \ \text{м/мксек}.$

Волна $u^+ = F^+(x - \tilde{v}t)$ называется прямой волной, волна $u^- = F^-(x + vt)$ —обратной волной.

Волны $F^+(x - vt)$ и $F^-(x + vt)$ записаны как функции пространственных координат x - vt и x + vt в заданный момент времени t. Эти же волны можно записать как функции времени. Представим, что к линин, вдоль которой движется прямая волна и+, в точках x_1 и x_2 приключены осциллографы. В обеих точках осциллографы запишут функцию $f^+(t')$, где t' — время, отсчитываемое от момента прихода начала волны

в точку х. Очевидно, $t' = t - \frac{x}{v}$, где t – время, отсчитываемое от начала процесса

в точке x = 0, а v - скорость волны. Следовательно, прямая волна запишется в виде $f^+(t') = f^+\left(t - \frac{x}{n}\right)$. Аналогично обратная волна может быть записана в виде $t - \left[t - \left(-\frac{x}{v}\right)\right] = t^{-} \left(t + \frac{x}{v}\right).$

Переход от изображения волн в функции времени к изображению в функции пространственной координаты производится умножением аргумента на скорость волны. Соответствие между длиной волны, выраженной в единицах длины и единицах времесоответствие между длиной волны, выраженной в единицах длины и единицах време-ни, обозначим знаком ~. Так, например, длина волны атмосферного происхождения 1,5/40 мксек на воздушной линии (v=300 м/мксек) ~450/12 000 м, а на кабельной линии (v=150 м/мксек) ~225/6 000 м. Полупернод волны промышленного напряже-ния 0,01 сек на воздушной линии ~3 000 км. Как видно из формулы (18-2), ток и напряжение прямых и обратных волн связа-

ны соотношением

$$i^+ = \frac{u^+}{z}; i^- = \frac{u^-}{z}.$$
 (18-3)

Для однопроводной воздушной линии волновое сопротивление равно:

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 60 \ln \frac{2h}{r} = 138 \log \frac{2h}{r}.$$
 (18-4)

В этих формулах \hbar — средняя высота провода над землей, r — радиус провода. Для линии с расщепленными проводами r принимается равным эквивалентному радиусу пучка проводов согласно формуле (1-15).

Величина z для воздушных линий разных конструкций изменяется в относительно узких пределах — от 350 до 400 ом для линий с расщепленными проводами и до 450— 550 ом для линий с одиночными проводами, так как определяющие значение z геометрические размеры находятся под знаком логарифма.

Волновое сопротивление кабельных линий в силу их большой удельной емкости C_0 и малой удельной индуктивности L_0 — порядка 5—20 ом. Поэтому при одном и том же напряжении волны ток волны и в кабельной линии много выше, чем в воздушной линии.

Из выражений $z = \sqrt[4]{L_0/C_0}$ и $v = 1/\sqrt[4]{L_0C_0}$ следует, что индуктивность и емкость линии длиной l равны:

$$L = L_{\bullet}l = \frac{z}{v} l;$$

$$C = C_{\bullet}l = \frac{1}{zv} l.$$
(18-5)

Так как v — постоянная величина, то по значениям волнового сопротивления однозначно определяются удельная и полная индуктивности и емкости линии.

18-2. ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН В УЗЛОВЫХ ТОЧКАХ ЛИНИИ

Положим, что прямая электромагнитная волна *u*⁺, *i*⁺, движущаяся по линии с волновым сопротивлением *z*, набегает на «узловую точку» *A* (рис. 18-1), к которой при-

 $\begin{array}{c} & u^{*} \cdot \iota^{*} \\ & u^{$

ключена нагрузка z_a, в общем случае состоящая из любой комбинации r, L, C. Падение волны на узловую точку приводит вследствие изменения соотношения между напряжением и током к преломлению и отражению волны. В данном случае прямую волну u⁺, i⁺ обычно называют падающей волной, обратную волны u⁻, i⁻ — отраженной волной, а напряжение и ток в узле u, i — преломленной волной. Найдем расчетную схему, по которой можно вы-

числить напряжение и ток преломленной волны. С этой целью перепишем уравнения (18-2) в виде

$$u = u^+ + u^-; \quad iz = u^+ - u^-$$

и сложим их. Получаем:

$$u + iz = 2u^+.$$
 (18-6)

Уравнение (18-6) справедливо для любой точки линии, в том числе и для узловой точки, к которой приключена нагрузка $z_{\rm B}$. В этой точке напряжение *и* есть напряжение на нагрузке, а *i* — ток в нагрузке. Уравнению (18-6) соответствует следующая расчетная схема замещения (схема Петерсена):

На заданный источник напряжения $u_0=2U^+$ включаются последовательно соединенные активное сопротивление и нагрузка $z_{\rm H}$ (рис. 18-1).

Вычисленные в этой схеме и и і есть напряжение и ток преломленной волны. Значение расчетной

схемы на рис. 18-1, б состоит в том, что цепь с распределенными параметрами замещается цепью с сосредоточенными параметрами, расчет переходных процесов в которой известен.

Вычислив преломленное напряжение, можно легко определить отраженную волну, используя равенство

$$u^- = u - u^+.$$



Рис. 18-1. К расчету преломле-

ния волны в узловой точке.

а — исходная схема; б — расчетвая

схема замещения.

Связь набегающей волны u⁺ с преломленной u и отраженной u⁻ можно выразить через коэффициенты преломления α и отражения β:

$$u = \alpha u^+; u^- = \beta u^+,$$
 (18-7)

где коэффициенты а и в (в общем случае операторные) равны:

$$\alpha = \frac{2z_{\rm H}}{z+z_{\rm H}}; \ \beta = \frac{z_{\rm H}-z}{z_{\rm H}+z}.$$
 (18-8)

Как следует из формулы (18-8), $\alpha - \beta = 1$.

В случаях, когда нагрузка чисто активная, коэффициенты α и β — действительные числа. В предельном случае, когда линия на конце разомкнута ($z_{\rm B} = \infty$), коэффициент $\alpha = 2$ и $\beta = 1$; волна напряжения на конце линии отражается с сохранением знака, а волна тока — с обратным знаком, в результате чего напряжение удваивается, а ток спадает до нуля. В другом предельном случае, когда линия на конце закорочена ($z_{\rm H} = 0$), $\alpha = 0$ и $\beta = -1$; волна напряжения на конце линии отражается с обратным знаком, а волна тока — с сохранением знака, в результате чего напряжение собратным знаком, а волна тока — с сохранением знака, в результате чего напряжение спадает до нуля, а ток удваивается.

18-3. ТИПОВЫЕ ФОРМЫ ВОЛН В РАСЧЕТАХ ГРОЗОЗАЩИТЫ

Типовыми элементарными формами воли являются прямоугольная $u_0(t) = U_0$; косоугольная $u_0(t) = at$ и экспоненциальная $u_0(t) = U_0 e^{-at}$. На рис. 18-2 показано, что путем наложения этих элементарных воли можно образовать прямоугольную волну длиной $t_{\rm B}$ (рис. 18-2,*a*), волну с косоугольным фронтом длиной $t_{\rm \Phi p}$ (рис. 18-2,*b*) и апернодический импульс $u_0(t) = U_0(e^{-at} - e^{-3t})$.

При воздействии на схему единичной волны $U_0=1$ искомое преломленное напряжение (или ток) называется переходной функцией и обозначается через h(t). Найдя h(t), можно затем с помощью интеграла Дюамеля найти искомое преломленное напряжение u(t) при воздействии на схему волны $u_0(t)$ произвольной формы.

жение u(t) при воздействии на схему волны $u_0(t)$ произвольной формы. Вычислив один раз значения u(t) для указанных на рис. 18-2 типовых элементарных падающих волн, можно с помощью принципа наложения найти u(t) для значительного количества волн, образуемых их суммированием.

18-4. АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ СХЕМ

 Прямоугольная волна и⁺ набегает на подстанцию, от шин которой отходит несколько линий. Определить напряжение на шинах подстанции, если:

а) к шинам приключена емкость С (рис. 18-3,а) или

6) в рассечку линии, по которой набегает волна, включена индуктивность L (рис. 18-3,6).

Составляем расчетные схемы замещения. В этих схемах искомое напряжение на шинах подстанции является напряжением на сопротивлении z_1 , равном эквивалентному сопротивлению отходящих линий. Расчет ведем операторным методом. Изображение прямоугольного скачка напряжения $2U^+=U_0$ имеет вид $U_0 \cdot 1/p$. Определяем по схеме замещения на рис. 18-3 напряжение на сопротивлении:

для схемы с С

$$U(p) = U_0 \frac{1}{p} \frac{z_a \left\| \frac{1}{pC} - U_0 \frac{1}{zC} - U_0 \frac{1}{zC} \frac{1}{p\left(p + \frac{z + z_1}{Czz_1}\right)};$$

для схемы с L

$$U(p) = U_0 \frac{1}{p} \frac{z_1}{z + z_1 + pL} = U_0 \frac{z_1}{L} \frac{1}{p\left(p + \frac{z + z_1}{L}\right)}.$$

Переходя к оригиналам, находим для обеих схем преломленную волну:

$$u(t) = U_0 \frac{z_1}{z + z_1} \left(1 - e^{-\frac{1}{T}} \right), \tag{18-9}$$

где постоянная времени равна:

для схемы с С

$$T_C = C \frac{z z_1}{z + z_1};$$

для схемы с L

$$T_L = \frac{L}{z + |z_1|}.$$

Структура выражений u(t) одинакова для схем с C и L. Емкость C и индуктивмость L сглаживают фронт проходящей волны в соответствии с постоянной времени T



Рис. 18-2. Типовые формы волн.

а — прямоугольная длиной t_B; б прямоугольная с косоугольным фронтом длиной t_B; в — апериодический импульс.



Рис. 18-3. Падение волны на подстанцию.

а — на шинах подстанции приключена емкость С; б — в рассечку линии включена индуктивность L; в — форма волны напряжения на шинах подстанции при прямоугольной падающей волне конечной длины.

(преломленная волна изображена на рис. 18-3 на линиях, отходящих от подстанции). Оценим возможное значение T для схемы с емкостью. Если на шинах отсутствуют специальные конденсаторы, то C представляет собственную емкость шин с приключенной аппаратурой. Эта емкость порядка 0,001—0,005 мкф. Тогда для тупиковой подстанции с приключенной воздушной линией (z = 500 ом) $T_c = Cz = 0,5 \div 2,5$ мксек. В случае кабельных линий z совершенно незначительно. Включение конденсаторов емкостью 0,5—1 мкф повышает постоянную времени при воздушных линиях до $T_c = 250 \div 500$ мксек, а в случае кабельных линий — до 10—20 мксек.

Аналогично оценим значение T_L для схемы с L. Индуктивность реактора примем $L=2\div5$ мгн, $z_1=z=500$ ом (проходная подстанция). Тогда $T_L=\frac{L}{z+z_1}=2\div5$ мксек.

Если отходящие линии кабельные с малыми волновыми сопротивлениями, то постоянная времени T_L возрастает до 100—500 *жсек.* Для тупиковой подстанции, когда $z_1 = = \infty$, $T_L = 0$ и реактор не оказывает сглаживающего эффекта на фронт преломленной волны напряжения.

Полученные данные позволяют сделать заключение, что емкости и индуктивности могут весьма значительно сглаживать крутизну фронта преломленных волн. На подстанциях с воздушными линиями особенно эффективно применение емкостей, на подстанциях с кабельными линиями — индуктивностей.

Если падающая волна и+ имеет конечную длину, то, как показано на рис. 18-2, она может быть представлена наложением двух бесконечных волн обратного знака,

сдвинутых на расстояние $t_{\rm B}$. Соответственно и преломленная волна определяется суммированием составляющих, вычисленных для бесконечных волн. На рис. 18-3, в показана форма напряжения на шинах подстанции при падении на схему 18,3,а или б конечной прямоугольной волны. Максимум преломленной волны приходится на момент времени $t=t_{\rm B}$, и, следовательно,

$$U_{\rm M} = U_0 \, \frac{z_1}{z+z_1} \left(\begin{array}{c} -\frac{t_{\rm B}}{T} \\ 1-e \end{array} \right).$$

Из этого выражения следует, что индуктивность и емкость могут оказать заметное влияние на амплитуду проходящей волны лишь в том случае, когда длина волны $t_{\rm B}$ существенно меньше постоянной времени T. В этом случае можно воспользоваться разложением

 $e^{-\frac{t_{B}}{T}} \approx 1 - \frac{t_{B}}{T}$ и приближенно оценить

$$U_{\rm M} \approx U_{\bullet} \frac{z_1}{z_1 + z_2} \frac{t_{\bullet}}{T}$$
. (18-10)

Численные значения, найденные выше для *T*, показывают, что практически используемые на подстанциях индуктивности и емкости могут резко снизить амплитуду коротких срезанных волн, а в некоторых случаях также и амплитуду полных волн.

Ранее была показана идентичность действия емкости C и индуктивности L на проходящую (преломленную) волну. Отраженные волны в обеих схемах существенно отличны. Емкость в начале процесса (t=0) эквивалентна



L



а — расчетная схема; б — кривые U_{См}/U₀ при разных формах набегающих на колебательный контур волн.

закороченной цепи, в соответствии с чем коэффициент отражения β_c в первый момент равен —1. В схеме с индуктивностью волна в начале процесса отражается как от открытого конца, т. е. $\beta_L = +1$. Можно сказать, что защитное действие емкости простирается по всем направлениям, в то время как индуктивность, сглаживающая проходящую волну, создает подпор напряжения со стороны набегающей волны.

2. В расчетах волновых процессов в электрических цепях часто рассматривается воздействие волны на колебательный контур LC (рис. 18-4,*a*). При воздействии прямоугольного импульса U_0 напряжение на емкости

$$U_{C}(p) = \frac{U_{0}}{p} \frac{1}{pL + \frac{1}{pC}} = \frac{U_{0}}{LC} \frac{1}{p\left(p^{2} + \frac{1}{LC}\right)} \div U_{0}\left(1 - \cos 2\pi \frac{t}{T}\right),$$

где период контура $T = 2\pi \sqrt{LC}$. При t = T/2 u_C достигает максимума $2U_0 = 4U^+$. Следовательно, для того чтобы волна могла как говорят, раскачать" контур до максимального значения $4U^+$, длина волны должна быть по крайней мере равна T/2. Для волны конечной длиной $t_{\rm s} < T/2$ расчет выполняется приемом наложения двух бесконечных прямоугольных волн разной полярности, сдвинутых на время $t_{\rm s}$. Получаем

$$u_{C}(t) = U_{0}\left\{\left[1 - \cos 2\pi \frac{t}{T}\right] - \left[1 - \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - t_{n}\right)\right]\right\} =$$
$$= 2U_{0} \sin \frac{\pi t_{n}}{T} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{t_{n}}{2}\right).$$

Максимум u_{C} наступает при $t = \frac{t_{s}}{2} = \frac{T}{4}$ и будет равен:

$$U_{CM} = 2U_0 \sin \frac{\pi t_{,B}}{T}.$$
 (18-11)

При малых $t_{\rm B}$ можно принять в расчет лишь первый член разложения sin $\frac{\pi t_{\rm B}}{T} \approx \frac{\pi t_{\rm B}}{T}$, и. следовательно,

$$U_{CM} \approx 2U_0 \frac{\pi t_B}{T}$$
.

При воздействии косоугольной волны $u_0(t) = at$ значение $u_C(t)$ может быть найдено с помощью интеграла Дюамеля:

$$u_{C}(t) = u_{0}(t) h(0) + \int_{0}^{t} u'_{0}(t-\tau) h(\tau) d\tau.$$

Подставив $u_0(t) = at$ и $h(t) = 1 - \cos \omega_0 t$, где $\omega_0 = 2\pi/T$, получим:

$$u_{\mathcal{C}}(t) = at - \frac{a}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \tag{18-12}$$

При воздействии волны с косоугольным фронтом длиной $t_{\rm dp}$ (рис. 18-2) напряжение на емкости при временах $t < t_{\rm dp}$ определяется формулой (18-12), а при $t > t_{\rm dp}$ равно разности составляющих (18-12), сдвинутых на отрезок времени $t_{\rm dp}$:

$$u_{C}(t) = \left[at - \frac{a}{\omega_{0}}\sin\omega_{0}t\right] - \left[a(t - t_{\Phi P}) - \frac{a}{\omega_{0}}\sin\omega_{0}(t - t_{\Phi P})\right].$$

С учетом того, что $at_{\Phi p} = U_0$ и $\omega_0 = 2\pi/T$, получим:

$$u_{\mathcal{C}}(t) = U_{\theta} \left[1 - \frac{\sin \frac{\pi t_{\Phi p}}{T}}{\frac{\pi t_{\Phi p}}{T}} \cos \omega_{\theta} \left(t - \frac{t_{\Phi p}}{2} \right) \right].$$
(18-13)

Напряжение u_C достигает максимума при $\omega_0\left(t-\frac{t_{\Phi P}}{2}\right) = -\pi$ и выражается формулой

$$U_{CM} = U_0 \left[1 + \frac{\sin \frac{\pi t_{\Phi P}}{T}}{\frac{\pi t_{\Phi P}}{T}} \right].$$
(18-14)

Как видно из этой формулы, U_c достигает $2U_0$ при $t_{\Phi p}=0$ (случай воздействия прямоугольной волны). Напряжение на емкости снижается при увеличении $t_{\Phi p}$ и снижении постоянной времени $T=2\pi \sqrt{Lc}$.

На рис. 18-4,6 показаны зависимости U_{CM}/U_0 при воздействии на колебательный контур типовых волн с амплитудой U_0 от характерного параметра т.

В табл. 18-1 приведены формулы для вычисления преломленных волн в типовых схемах.

Таблица 18-1	Постоянная времены схемы	$T = \frac{L}{z+z_1}$	$T = C \frac{zz_1}{z + z_1}$	$T = 2\pi V \frac{LC}{LC}$ $\omega_0 = \frac{1}{V \frac{LC}{LC}}$
Расчетные формулы для преломленных воля в схемах	Экспоненциальная волна $2u^{+}(t) = U_{0}e^{-\alpha t} = U_{0}e^{-\frac{t}{T}}$	$u_{a}(t) = U_{0} \frac{z_{a}}{z_{1} + z_{a}} \frac{T_{a}}{T_{a} - T} \times \\ \times \left(e^{-\frac{t}{T_{a}}} - e^{\frac{t}{T}} \right)$	$u_{a}(t) = U_{0} \frac{z_{1}}{z_{1} + z_{1}} \frac{T_{n}}{T_{n} - T} \times \\ \times \left(e^{-\frac{t}{T_{n}}} - e^{-\frac{t}{T}}\right)$	$u_{a}(t) = U_{o} \frac{\omega_{0}^{2}}{\alpha^{2} + \omega_{0}^{2}} \times \\\times \left(e^{-\alpha t} + \frac{\alpha}{\omega_{o}} \sin \omega_{o} t - \cos \omega_{o} t\right)$
	Косоугольная волна 2ut ⁺ (t) = at	$u_{3}(t) = a \frac{z_{3}}{z_{1} + z_{3}} \left(t - T + Te^{-\frac{t}{T}} \right)$	$u_{\mathbf{s}}(t) = a \frac{z_{\mathbf{s}}}{z_1 + z_{\mathbf{s}}} \left(t - T + Te^{-\frac{t}{T}} \right)$	$u_{2}(t) = a\left(t - \frac{\sin \omega_{0} t}{\omega_{0}}\right)$
	Прямоугольная волна $2u^{+}(t) = U_{0}$	$u_{\mathbf{s}}(t) = U_{\mathbf{s}} \frac{z_{\mathbf{s}}}{z_{\mathbf{s}} + z_{\mathbf{s}}} \times \times \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$	$u_{s}(t) = U_{e} \frac{z_{s}}{z_{1} + z_{s}} \times \times \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$	$u_{1}\left(t\right)=U_{0}\left(1-\cos\omega_{0}t\right)$
	Схема			

•

18-5. РАСЧЕТ ПРЕЛОМЛЕННЫХ И ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В УЗЛОВЫХ ТОЧКАХ, НА КОТОРЫЕ НАБЕГАЮТ ВОЛНЫ С НЕСКОЛЬКИХ ЛИНИЙ

В сложных схемах, например в схемах подстанций, к узловой точке может быть приключено несколько линий, по каждой из которых набегает волна. Такой случай показан на рис. 18-5, а. Волны набегают с i=1, 2, ..., п линий с волновыми сопротивлениями 2; на узел х. Обозначны набегающие (прямые) волны, движущиеся по i-й линии к узлу x (или от i-го узла к x-му узлу), через uix, a отраженные (обратные) волны —

через ихі. Составим схему замещения, в которой каждая набегающая волна представляется источником 2uix, включенным через сопротивление zi. Преломленная волна напряжения в узле х согласно принципу наложения выражается формулой

$$u_x = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ix} \, u_{ix}. \tag{18-15}$$

где a_{ix} коэффициент преломления каждой из волн u_{ix} (i=1, 2, ..., n), в предположении, что на остальных линиях отсутствуют набегающие волны.

Отраженные от узла х волны на і-й линии (обратные волны) находятся из соотношения

$$u_{xi} = u_x - u_{ix}.$$

Формуле (18-15) можно придать и другой вид, если волны uix, набегающие с волновых сопротивлений 2;, заместить эквивалентной волной

 $u_{\mathfrak{d}} = \left(\sum_{i=1}^{n} Y_{\mathfrak{d}}\right)^{-1} \sum_{i=1}^{n} u_{i\mathfrak{d}} Y_{\mathfrak{d}}.$

Рис. 18-5. Схемы падения волн с нескольких линий на узловую точку. а - исходная; б — эквивалентная.

набегающей на узел с эквивалентного волнового сопротивления

$$z_{\mathfrak{p}} = \left(\sum_{i=1}^{n} Y_{\mathfrak{n}}\right)^{-1},$$

При такой замене формулу (18-15) можно записать в виде

$$u_x = \alpha_{\theta x} u_{\theta}, \tag{18-15a}$$

где

 $a_{yx} = \frac{2z_{H}}{z_{H} + z_{H}}.$

Рассмотрим волновой процесс на линии длиной *l*≈т с волновым сопротивлением z, включенной между узлами *l* и 2 (рис. 18-6). Сопротивления z₁ и z₂ могут представлять волновые сопротивления линий или активные сопротивления. Волновой процесс в схеме связан с многократными отражениями волн на линии г от узлов 1 и 2.

Для расчета волнового процесса удобно представить воздействующую волну $u^+(t)$ рядом дискретных значений U^{k} — числовыми значениями ординат в дискретные моменты времени $t_{\kappa} = k\Delta t$ (k=0, 1, 2, 3...). Расчетный интервал (или расчетный шаг) Δt должен быть достаточно мал для того, чтобы приращение функции $u^+(t)$ за время Δt было также мало. Для того чтобы сохранить дискретность в процессе многократных отражений, интервал Δt должен составлять кратную долю или по крайней мере быть равным двойному интервалу времени т пробега волны по линин г.





Для дискретных значений функций сохраняются формулы преломления и отражения. Так, например, формулы (18-55) приобретают вид:

$$U_{x}^{k} = \sum_{i=1}^{n} a_{ix} U_{ix}^{k}$$
(18-16)

И

$$U_{xi}^{k} = U_{x}^{k} - U_{ix}^{k}$$
 (18-16a)

где k — порядковый номер момента времени t_k , общий для всех набегающих на узел x на k-м расчетном шаге волн.

Пример 18-1. Кабельная линия с волновым сопротивлением z=40 ом и длиной l=30 м включена в рассечку воздушной линин $z_1=z_2==400$ ом. На кабельную вставку падает волна $u_{A1}(t)$; определить форму волны напряжения на конце вставки (рис. 18-6). Воздушные лании A1 и 2Б считать бесконечно длинными.

Скорость распространения волны по кабелю можно принять равной 150 м/мксек. Тогда время пробега волны по кабельной вставке равно $\tau = 30/150 = 0.2$ мксек. Примем $\Delta t = 2\tau = = 0.4$ мксек.

Расчет преломленных и отраженных волн ведем по формулам (18-1), причем значения коэффициентов преломления равны:

$$\alpha_{A1} = \frac{2 \cdot 40}{400 + 40} = 0,182;$$

$$\alpha_{25} = \alpha_{1A} = \frac{2 \cdot 400}{400 + 40} = 1,82.$$

Расчет удобно вести с помощью сетки многократных отражений (рис. 18-6,6). Сетка строится по направлениям преломленных и отраженных волн; над каждым направлением пишутся дискретные значения прямых, обратных и преломленных волн. Интервал сетки между ступенями в вертикальном направлении соответствует двойному пробегу волны по кабельной линии длиной 30 м.

Вычисленные при помощи сетки многократных отражений дискретные значения волн в узле 2 нанесены на графике рис. 18-6, в и соединены плавной кривой.

Как видно из расчета, кабельный подход привел к значительному сглаживанию фронта набегающей волны. Действие кабельного подхода в известной степени аналогично действию емкости, обоснование чему будет дано в § 18-10.





Рис. 18-6. Многократные отражения волн на участке линии при прохождении волны.

a — исходная схема; δ — сетка многократных отражений; δ — графики u_{A1} и $u_2(t)$.

18-7. РАСЧЕТ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН В УЗЛАХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ Сопротивлениями

В схемах защиты от перенапряжений в некоторых узлах схем включены защитные аппараты — вентильные разрядники, содержащие искровые промежутки и нелинейные сопротивления, вольт-амперная характеристика которых обычно задана графически. До пробоя искрового промежутка наличие РВ не сказывается на преломлении волн в узле схемы; после пробоя искрового промежутка к узлу оказывается подключенным нелинейное сопротивление. Расчет преломления волн в таком узле удобно производить графически.

Для схемы на рис. 18-7. в которой внешняя цепь сведена к эквивалентной линии с волновым сопротивлением z₃, по которой падает волна U₃, графический расчет 18-641

показан на рис. 18-7,6. Для каждого дискретного значения U^{*}, падающей волны напряжение на нелинейном сопротивлении PB U^{*} связано с током I^{*} двумя зависимостями:

а) U - I характеристикой нелинейного сопротивления; б) уравнением $U^{k} = 2U_{9}^{k} - I^{k}z_{3}$. Точку A пересечения этих зависимостей дает напряжение на сопротивлении и ток через него. Заметим, что до пробоя искрового промежутка $U^{k} = 2U_{9}^{k}$.



Рис. 18-7. Графический расчет импульсного тока в разряднике. а — расчетная схема; б — графический расчет.



18-8. ВОЛНОВОЙ И ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕССЫ В СХЕМАХ С ДЛИННЫМИ ЛИНИЯМИ

В ТВН часто используются термины «волновой» и «переходный» применительно к процессам в схемах с длинными линиями. Уточним различие в эгих понятиях.

Волновой процесс возникает на линии при грозовом поражении, а также некоторых коммутациях. Характерной особенностью волнового процесса является большая скорость изменения и и і вдоль линии (крутой фронт волны). В математической форме это отражено в описании волнового процесса дифференциальными уравнениями в частных производных.

При относительно медленном изменении u и i в волновых уравнениях (18-1) можно перейти от производной $\partial/\partial x$ к конечным разностям $\Delta/\Delta x$, и тогда уравнения (18-1) записываются в виде

$$\Delta i = L_0 \Delta x \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt};$$
$$\Delta u = C_0 \Delta x \frac{di}{dt} = C \frac{di}{dt}.$$

Это обыкновенные дифференциальные уравнения, которым соответствует замещение участков линии Δx П- или Т-образными звеньями.

Таким образом, между волновым и переходным процессами нет принципиальной разницы. Переходный процесс можно изучать в волновой форме, равно как и волновой процесс можно изучать в форме переходного процесса на цепочечной схеме. Приведем два важных частных случая замещения линии сосредоточенными по-

Приведем два важных частных случая замещения линии сосредоточенными постоянными. Линия 1-2 в схеме на рис. 18-8, а в переходном режиме может быть замещена П-образной схемой, показанной на рис. 18-8, б. Если сопротивления z_1 и z_2 много меньше z, то токи в емкостях C/2 малы по сравнению с токами в z_1 и z_2 и емкостями можно пренебречь. Тогда линия 1-2 окажется замещенной индуктивностью $L = \frac{z}{v}l$ [см. формулы (18-5)]. Если же сопротивления z_1 и z_2 много больше z, то можно пренебречь падением напряжения на индуктивности L по сравнению с напряжениями на

$$z_1$$
 и z_2 . В этом случае линия окажется замещенной емкостью $C = \frac{1}{zv} l$ (рис. 18-8, г),

z,

22

Замена участков линий в переходном процессе индуктивностями и емкостями часто используется в расчетах грозозащиты. Такая замена позволяет не проводить расчета многократных отражений, а вычислять искомые волны в схеме с сосредоточенными постоянными. Так, в примере 18-1, где удовлетворяется условие $z_1 = z_2 \gg z$ отрезок кабельной линии можно заменить сосредоточенной емкостью $C = \frac{1}{zv} l = \frac{30}{40 \cdot 150} =$ $= 0,005 \ \text{мr}\phi$; переход к сосредоточенным постоянным удобен, если воздействующая волна задана аналитически.

18-9. РАСЧЕТ ТОКА В ВЕНТИЛЬНОМ РАЗРЯДНИКЕ В РЕЖИМЕ МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

В качестве примера расчета переходного процесса с заменой участка линии сосредоточенными L или C рассмотрим схему на рис. 18-9, а, важную для построения схем защиты подстанций. На схеме показан случай грозового поражения линии на расстоянии I вблизи подстанции, на которой установлен вентильный разрядник PB.



Рис. 18-9. Расчет тока в вентильном разряднике в режиме многократных отражений. а — исходная схема; б — расчетная схема с заменой участка линии индуктивностью L; х — пробой искрового промежутка.

В месте грозового поражения включено сопротивление R_3 , на котором образуется напряжение $U_3 = i_M R_3$, где i_M — ток молнии,

$$i_{\mathbf{M}} = I_{\mathbf{M}} e^{-\frac{I}{T_{\mathbf{B}}}}.$$

Волна U_s , набегая на подстанцию, вызывает срабатывание PB, в результате чего к проводам подключается нелинейное сопротивление PB. Произойдет отражение волны от PB с изменением знака; отраженная волна, дойдя до места поражения, вновь отразится с изменением знака от заземления R_s и создаст новую набегающую волну того же знака, что и первоначальная волна. В результате многократных отражений на участке *l* будет происходить нарастание импульсного тока в разряднике.

На концах участка l включены сопротивления R₃ и рабочее сопротивление PB. Оба эти сопротивления существенно меньше волнового сопротивления линии. В этих условиях участок линии l в режиме многократных отражений можно заменить индук-

тивностью $L = \frac{z}{C} l$. Расчетная схема при такой замене показана на рис. 18-9,6.

Запишем дифференциальное уравнение для этой схемы

$$U_{s} e^{-\frac{t}{T_{g}}} = L \frac{di}{dt} + u_{p}, \qquad (18-17)$$

где u_p — падение напряжения на вентильном разряднике. В момент максимума тока di/dt=0 и, следовательно,

$$U_{a} e^{-\frac{t_{\rm M}}{T_{a}}} = U_{\rm p}.$$

где t_м обозначает время, соответствующее максимуму тока. Из этого уравнения находим:

$$t_{\mu} = T_{\mu} \ln \frac{U_{s}}{U_{\mu}}.$$

Умножим теперь исходное дифференциальное уравнение (18-17) на dt и проинтегрируем в пределах от 0 до $t_{\rm M}$:

$$\int_{0}^{t_{\mathbf{M}}} U_{\mathbf{s}} e^{-\frac{t}{T_{\mathbf{p}}}} dt = \int_{0}^{t_{\mathbf{M}}} L \frac{di}{dt} dt + \int_{0}^{t_{\mathbf{M}}} u_{\mathbf{p}} dt.$$
(18-17a)

Первый интеграл равен $U_{s}T_{p}\left(1-e^{-\overline{T_{p}}}\right)$. Второй интеграл равен LI_{p} , где I_{p} — амплитуда тока в вентильном разряднике, соответствующая моменту времени t_{M} .

При определении третьего интеграла полагаем в первом приближении, что напряжение ир для разрядников с пологой вольт-амперной характеристикой постоянно, т. е. не зависит от тока. Тогда.

$$\int_{0}^{t_{\rm M}} U_{\rm p} dt = U_{\rm p} t_{\rm M}.$$

Итак, уравнение (18-17) после интегрирования приводится к виду

$$U_{3}T(1-e^{t_{M}/T_{3}})=LI_{p}+U_{p}t_{M}$$

Подставляя значение

$$t_{\rm st}=T_{\rm \cdot B}\ln\frac{U_{\rm s}}{U_{\rm p}},$$

находим значение

$$I_{\rm p} = \frac{T_{\rm a}}{L} \left[U_{\rm a} - U_{\rm p} \left(1 - \ln \frac{U_{\rm a}}{U_{\rm p}} \right) \right]. \tag{18-18}$$

Задаваясь значениями U_p , по уравнению (18-18) строят кривую $I_p = f(U_p)$. Пересечение этой кривой с вольт-амперной характеристикой разрядника определяет искомые значения I_p и U_p .

18-10. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ С ЗАМЕЩЕНИЕМ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Участками линий (волновой метод расчета)

Расчет преломления и отражения волн в узловых точках, к которым приключены реактивные элементы L и C, основывается на решении операторных уравнений и при сложных воздействующих волнах весьма громоздок. Такой расчет может быть упрощен заменой реактивных элементов участками некоторых фиктивчых линий, оказываю-



Рис. 18-10. Замещение реактивных элементов фиктивными линиями.

а — замещение L короткозамкнутой линией; б замещение C разомкнутой линией. щих на волны то же действие, что соответственно L и C. Коэффициенты преломления и отражения становятся при этом алгебраическими величинами. Переход к методу многократных отражений сводит расчет волнового процесса к большому числу простых арифметических операций. Поэтому такой прием получил распространение с внедрением цифровых вычислительных машин.

Волновые сопротивления и скорость, длина линии и ее индуктивность и емкость связаны соотношениями (18-5). Эти формулы можно записать и в виде $L=z\Delta\tau$ и $C=\Delta\tau/z$, где интервал $\Delta\tau$ время пробега волны на линии в прямом или обратном направлениях.

Заменим индуктивность L, включенную в узел схемы (рис. 18-10,а), фиктивной линией длиной 1~Дт, короткозамкнутой на конце и имеющей волновое сопротивление $z_L = L/\Delta \tau$. Индуктивность такой линии равна $L = z_1 \Delta \tau$, т. е. заданной, а емкость $C = \frac{\Delta \tau}{z_L} = \frac{\Delta \tau^2}{L}$. При достаточно малом $\Delta \tau$ емкость C пренебрежимо мала, и тогда погреш-

ность от замены индуктивности L линией г_L также мала.

Включенную в узел схемы емкость \tilde{C} (рис. 18-10,6) заместим фиктивной линией длиной $l \sim \Delta \tau$, разомкнутой на конце и ныеющей волновое сопротивление $z_C = \Delta \tau C$. Емкость этой линии равна заданной, а индуктивность $L = z_C \Delta \tau = \frac{\Delta \tau^2}{C}$ при малом $\Delta \tau$ пренебрежимо мала; соответственно мала и погрешность от замены емкости линией гс.

При расчете методом многократных отражений целесообразно длину фиктивных линий $\Delta \tau$ принимать равной половине расчетного шага ($\Delta \tau = \Delta t/2$). При этом $\Delta \tau$ должно быть достаточно мало, чтобы удовлетворялись условия малости $\Delta \tau^2/L$ и $\Delta \tau^2/C$.

18-11. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ НА ИЗОЛЯЦИИ, ЗАЩИЩЕННОЙ ВЕНТИЛЬНЫМ РАЗРЯДНИКОМ, УСТАНОВЛЕННЫМ НА РАССТОЯНИИ / ОТ ИЗОЛЯЦИИ

В качестве примера изложенной методики рассмотрим расчет напряжения на изоляции и на вентильном разряднике в схеме защиты подстанционной изоляции 500 кв (рис. 18-11,а). Разрядник установлен на расстоянии 1=60 м от изоляции. Набегающая волна имеет косоугольный фронт длиной 4 мксек ≈ 1200 м (v=300 м/мксек). Разрядное напряжение искрового промежутка РВ $U_{\pi p}=1050$ кв; вольт-амперная характеристика РВ соответствует характеристике разрядника типа РВМГ-500. Емкость изоляции 4 500 nφ.

Выбираем расчетный шаг $\Delta t = 0,05$ мксек. Емкость [изоляции C = 4500 nф = = 0,45 $\cdot 10^{-3}$ жкф замещается линией дляной $\Delta \tau = \frac{\Delta t}{2}$ с волновым сопротивлением

$$z_C = \frac{\Delta \tau}{C} = \frac{0.25 \cdot 10^{-2}}{4.5 \cdot 10^{-3}} = 5.5 \text{ om}.$$

Составляем расчетную схему (рис. 18-11,6). Коэффициенты преломления в узлах 2 и 1 до срабатывания РВ вычисляются по формуле (18-8). В узле 1 после срабатыва-



изоляции в схеме защиты подстанции (расчет выполнен В. С. Шатиным). а – схема защиты; б – расчетная схема; в – формы волн на РВ и изоляции.

ния РВ преломленное напряжение вычисляется графически. Расчет ведется с помощью сетки многократных отражений (см. § 18-7). Рассчитанные кривые напряжения на разряднике (узел 1) и изоляции (узел 2) приведены на рис. 18-11, в. Форма кривой напряжения на изоляции (трансформаторе) примерно та же, что и на рис. 13-1, положенная в основу выбора кривой допустимых напряжений (см. § 13-2).

8)

18-12. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МНОГОПРОВОДНОЯ СИСТЕМЕ БЕЗ ПОТЕРЬ

Электромагнитные волны в многопроводной системе параллельных линий без потерь распространяются (рис. 18-12), как и на однопроводной линии, без искажения и затухания. В силу плоского характера поля потенциал любого из проводов определяется зарядами, сосредоточенными в данном сечении на всех проводах системы. Для однопроводной линии из волнового соотношения u=iz вытекает связь напряжения и заряда на линии: $u=iv\frac{z}{v}=\frac{1}{C}q$, где zv=1/C н i=qv. Справедлив

и обратный переход от электрического соотношения $u = \frac{1}{C}q$ к волновому u = iz.

Аналогичный переход осуществим и для многопроводной системы. В этой системе связь потенциалов и зарядов устанавливается через потенциальные коэффициенты а. Потенциальные коэффициенты отнесены к единице длины линии; единица измерения а





Рис. 18-13. Индукция волны напряжения на изолированном проводе 2 в поле волны на проводе 1.

метр на фараду (μ/ϕ). Произведение α на линейную плотность заряда q дает напряжение волны:

$$\begin{array}{c} u_1 = a_{11}q_1 + a_{12}q_2 + a_{13}q_3 + \dots \\ u_2 = a_{21}q_1 + a_{22}q_2 + a_{23}q_3 + \dots \\ u_3 = a_{31}q_1 + a_{32}q_2 + a_{33}q_3 + \dots \\ \dots \end{array}$$

$$(18-19)$$

Умножаем члены в правой стороне уравнений (18-19) на v/v, где v — скорость волнового процесса. На любом, например *n*-м, проводе произведение $q_n v$ равно волновому току *n*-го провода i_n . Вводя обозначение $\alpha_{nm}/v=z_{nm}$, приходим к системе уравнений, связывающей потенциалы (напряжения относительно земли) и токи параллельных линий:

$$u_{1} = z_{11}i_{1} + z_{12}i_{2} + z_{13}i_{3} + \dots$$

$$u_{2} = z_{21}i_{1} + z_{22}i_{2} + z_{23}i_{3} + \dots$$

$$u_{3} = z_{31}i_{1} + z_{32}i_{2} + z_{33}i_{3} + \dots$$
(18-20)

Коэффициент $z_{nm} = z_{mn} = \alpha_{nm}/v$ называется взаимным волновым сопротивлением *n*-й и *m*-й линий. Взаимное волновое сопротивление z_{mn} устанавливает отношение напряжения, индуктируемое на *n*-й линии к индуктирующему току *m*-й линии. Волновые сопротивления с одинаковыми индексами z_{nn} являются собственными волновыми сопротивлениями линии и характеризуют отношение напряжения, индуктированного на *n*-м проводе, к ндуктирующему его току в этом же проводе. Для воздушной линии значения z_{nm} и z_{mn} определяются по формулам:

$$z_{nn} = 138 \lg \frac{D_{nn}}{r_{n}}; \ z_{nm} = 138 \lg \frac{D_{nm}}{d_{nm}},$$
(18-21)

где геометрические параметры D_{nn} , r_n , D_{nm} , d_{nm} поясняются рис. 18-12.

Численные значения взаимных волновых сопротивлений на воздушных линиях электропередачи обычно лежат в пределах 100—200 ом. Решач систему уравнений (18-20), можно установить токи волн при задакных напряжениях или, наоборот, напряжения по заданным токам волн. Если число неизвестных превышает число уравнений, например задано лишь напряжение волны одной из линий, то недостающие уравнения составляются по граничным условиям.

Пример 18-2. Линия *I* включена на источник напряжения $u_0(t)$. Линия *2* разомкнута (рис. 18-13). Определить напряжение, возникающее на линии 2. На разомкнутой линии ток равен нулю. Система уравнений (18-20) приобретает вид $u_1 = z_{11}i_1$; $u_2 = z_{12}i_1$, откуда

$$u_2 = u_1 \frac{z_{12}}{z_{11}} = ik_0.$$

Коэффициент $z_{i2}/z_{11} = k_0$ называется геометрическим коэффициентом связи. Коэффициент связи показывает отношение напряжения, индуктируемого на изолированном проводе, к напряжению индуктирующей волны.

Коэффициент связи двух проводов тем больше, чем меньше расстояние между проводами и чем больше высота их подвеса. На линиях электропередачи коэффициенты связи обычно лежат в пределах 0,2--0,3.

Пример 18-3. Определить коэффициент связи в системе из нескольких проводов и дзух тросов. Под коэффициентом связи двух тросов с проводом понимается отношение индуктированного напряжения на проводе к напряжению воли, распространяющихся по тросам, приклю-



Рис. 18-14. К расчету распространения волн.

а — вдоль жилы и оболочки кабеля; б вдоль центрального провода в системе проводов.

ченным к одному источнику. Пронумеруем тросы цифрами 1, 2, а провод цифрой 3. Используя уравнения (18-20), легко найти эквивалентное волновое сопротивление для движения индуктирующей волны по двум тросам (провода линии считаем изолнрованными, а их токи — равными нулю).

 $z_{a(!)} = z_{11} + z_{12}$

причем $z_{11} = z_{22}$.

Ток волны в каждом тросе равен

$$i = \frac{u}{z_{s(1)}} = \frac{u}{z_{11} + z_{12}}.$$

Напряжение, индуктированное на проводе 3 волной тока i₁, равно

$$i_1 z_{12} = \frac{u}{z + z_{12}} z_{12},$$

а волной тока і, равно

$$i_2 z_{23} = \frac{\mu}{z + z_{12}} z_{23}.$$

Складывая, получаем индуктированное напряжение на проводе 3:

$$u_{1} = u \frac{z_{11} + z_{22}}{z_{11} + z_{12}},$$

откуда находим коэффициент связи:

$$k_0 = \frac{u_1}{u} = \frac{z_{13} + z_{23}}{z_{41} + z_{12}}.$$

Пример 18-4. Представим линию, окруженную параллельными проводами, столь тесно расположенными, что мы можем принять их за непрерывную металлическую оболочку. Мы приходим тогда к случаю распространения волн вдоль жилы 1 и оболочки кабеля 2 (рис. 18-14,a). С током i2, проходящим по оболочке кабеля, связан магнитный поток, полностью охватывающий и жилу кабеля Погенциал на оболочке, являющейся своего рода электростатической клеткой, полностью передается и жиле кабеля. Это означает, что собственное волновое сопротивление оболочки z22 равно взаимному волновому сопротивлению оболочки и жилы z21; следовательно, коэффи-

ГГл. 18

циент связи оболочки с жилой $k_0 = z_{21}/z_{22} = 1$. С другой стороны, магнитный поток тока *i*₁ в жиле кабеля лишь частично связан с оболочкой. Следовательно, *z*₁₂ < *z*₁₁.

По жиле и оболочке кабеля, приключенных к одному источнику напряжения, распространяется волна напряжения и. Пишем в соответствии с общими уравнениями млогопроводной системы:

$$u = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 = z_{22}i_1 + z_{22}i_2.$$

Поскольку $z_{12} = z_{21} = z_{22}$, то должно быть $z_{11}i_1 = z_{12}i_1$, но так как $z_{11} \neq z_{12}$, то равенство возможно лишь в случае $i_1 = 0$.

Итак, по жиле кабеля ток не проходит. Весь ток волны вытесняется на оболочку кабеля и потенциал оболочки передается вследствие полной электростатической связи жиле. Что препятствует прохождению тока в жиле? При прохождении тока в оболочке в жиле индуктируется э. д. с., равная по величине и обратная по направлению приложенному напряжению. Это явление аналогично поверхностному эффекту, природа которого также обусловлена возрастанием противоэлектродвижущей силы для слоев, приближающихся к центру провода. В проводе без потерь вследствие поверхностного эффекта ток целиком проходит на поверхности.

Кабельная оболочка представляет предельный случаи полной электромагнитной связи. Весьма значительное вытеснение тока с центрального провода имеет место такжє в системе трех или большего числа линий (рис. 18-14,6).

18-13. ИСКАЖЕНИЕ ВОЛН НА ЛИНИЯХ С ПОТЕРЯМИ В ЗЕМЛЕ

Протекание волнового тока по проводникам с активным сопротивлением связано с тепловыми потерями. Расход энергии волны на необратимые тепловые потери ведет к искажению и затуханию волны. Для волны, распространяющейся между проводом и землей, основную роль играют потери в земле; по сравнению с ними потерями в проводах из цветного металла можно пренебречь. Фронт волны эквивалентен току высокой частоты. На высокой частоте в массивном проводнике — земле резко проявляется поверхностный эффект, в результате которого линии тока подтягиваются к поверхности земли и активное сопротивление земли возрастает. Под влиянием сопротивления земли прямоугольный фронт волны приобретает приближенно косоугольную форму (см. рис. 18-2,6). Характерным признаком искажения волны под действием по-терь в земле является независимость этого искажения от амплитуды напряжения. Значение длины деформировавшегося фронта первоначально прямоугольной волны $t_{\Phi P}$ определяется по формуле

$$t_{\Phi P} = \frac{\rho l^2}{260 h^2 z^2}, \qquad (18-22)$$

где ρ — удельное сопротивление земли, *ом* · *м*; l — пройденный путь, *м*;

h — средняя высота подвеса провода над землей, м;

z — волновое сопротивление линии, ом;

top выражено в микросекундах (*мксек*).

Пример 18-5. Определить $t_{\phi p}$ после пробега расстояния l=2 км на линии z==500 ом, h=10 м, p=10³ ом м. Подставив заданные числовые значения в формулу (18-22), находим:

$$t_{\phi p} = \frac{10^3 \cdot 4 \cdot 10^6}{260 \cdot 10^2 \cdot 25 \cdot 10^4} = 0.6 \text{ mkcek.}$$

Как видно из примера 18-5, заметное сглаживание фронта волны наблюдается лишь при грунтах с высоким удельным сопротивлением ($\rho > 10^2 \ om \cdot m$).

В многопроводных системах составляющие волн распространяются по фазным и междуфазным каналам. Междуфазные волны испытывают незначительное искажение и затухание. Соответствующая теория волновых процессов разработана М. В. Костенко и его учениками.

18-14. ИСКАЖЕНИЕ И ЗАТУХАНИЕ ГРОЗОВЫХ ВОЛН ПОД ДЕЙСТВИЕМ импульсной короны

Основное влияние на грозовые волны высокого напряжения оказывает корона, причем в импульсной ее форме, рассмотренной в § 10-9. По сравнению с потерями на корону активные потери в проводниках незначительны, и ими обычно пренебрегают. Волны грозового происхождения (прямого удара молшии) преимущественно отрицательной полярности. Положительная корона более интенсивна, чем отрицательная, и,

следовательно, более благоприятствует затуханию опасных перенапряжений. Поэтому обычно расчет ведется для волн отридательной полярности.

До начала развития импульсной короны связь заряда q и напряжения на проводе u выражается линейной зависимостью. При $u > U_{\rm m}$, где $U_{\rm m}$ — начальное коронное напряжение, эта связь выражается кулон-вольтовой характеристикой вида

$$q = C_{\bullet} u \,(1 + Bu). \tag{18-23}$$

Дифференциальные уравнения волнового процесса на линии при развитии импульсной короны приобретают вид:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_{\bullet} \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t}.$$

Входящая во второе уравнение производная $\partial q/\partial u$ называется дифференциальной или динамической емкостью провола $C_{\kappa}(u)$. Из уравнения (18-23) следует, что

$$C_{\kappa}(u) = C_{\bullet}(1 + 2Bu). \tag{18-24}$$

Индуктивность линии L_0 остается неизменной и постоянной, так как на магнитнос поле тока в проводе корона не оказывает заметного влияния.

При использовании понятия динамической емкости дифференциальные уравнения волнового процесса имеют вид:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C_{\mu} \frac{\partial u}{\partial t}.$$
 (18-25)

Решением этих уравнений является по-прежнему волновая функция (рассматривается только прямая волна)

$$u = F(x - v_{\rm s}t),$$
 (18-26)

где v_R — скорость распространения волны на линии при развитии импульсной короны, зависящая от величины напряжения и равная

$$v_{\rm F} = \frac{1}{\sqrt{L_{\rm o}C_{\rm o}(u)}}.$$
(18-27)

В случае распространения волны по воздушной линии $v_{\rm R} = \frac{c}{\sqrt{1+2Bu}}$, где c —ско-

рость света.

Движение волны по коронирующей линии можно представить в следующей наглядной форме (рис. 18-15). Падающая волна разбивается по напряжению на узкие полосы, каждая из которых распространяется в соответствии с формулой (18-27) со своей скоростью $v_{\rm R}$, являющейся функцией напряжения полосы *и*. С увеличением напряжения скорость $v_{\rm R}$ убывает. Нижняя полоса, соответствующая условию $u < U_{\rm R}$, распространяется с наибольшей скоростью. Различие скоростей полос приводит к искажению фронта волны по мере ее движения.

кажению фронта волны по мере ее движения. Используя формулу (18-27), легко рассчитать по точкам деформацию фронта волны после пробега ею некоторого расстояния *l*. Отставание полоски, соответствующей напряжению *u*, будет равно:

$$\Delta t(u) = \frac{1}{v_{\rm K}} - \frac{1}{c} = \frac{1}{c} \left[\sqrt[4]{1 + 2Bu} - 1 \right] \approx \frac{1}{c} Bu. \tag{18-28}$$

При получении окончательного выражения (18-28) предполагалось, что $2Bu \ll 1$. Расчет по формуле (18-23) выполняется до пересечения кривой деформированного фронта с хвостом исходной волны. На хвосте волны дальнейшее развитие короны прекращается и коронный чехол медленно распадается. В первом приближении можно считать форму хвоста бегущей волны неизменной.

Коэффициент B, от которого зависит степень искажения и затухания волны, в свою очередь зависит от диаметра провода. Эта зависимость показана на рис. 18-16.







Рис. 18-16. Зависимость коэффициента В от диаметра провода.



Рис. 18-17. К примеру 18-5.

Значение В провода (для расщепленных проводов эквивалентного диаметра) резко спадает при увеличении диаметра проводов с 10—15 до 30—40 мм (провода линий 110—220 кв), стремясь с дальнейшим возрастанием к постоянному значению $\sim 0.2 \cdot 10^{-3}$ 1/кв.

Пример 18-6. а) В начале линейного подхода к подстанции задана волна напряжений u(t), показанная на рис. 18-17, а. Определить форму фронта и амплитуду волны, набегающей на шины подстанции. Длина подхода l=1,5 км. Коэффициент В принят $0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/кв. Начальное коронное напряжение $U_{\rm H}=220$ кв.

Рассчитываем значение смещения Δt по формуле Ů (18-28), подставляя (*KB*), x=1 (м) и c=300 м/мксек. Для U = 200кв находим $\Lambda t =$ =0,5 мксек, для 400 кв $\Delta t =$ =1 мксек и т. д. Нанося значения Δt , находим форму фронта волны напряжения после пробега расстояния $l = 1,5 \kappa M$. Пересечение смещенного фронта с хвостом волны первоначальной формы определяет амплитуду волны, равную 1 000 кв.

б) При указанных условиях вычислить деформацию фронта и затухание срезанной волны u(t), показанной на рис. 18-17,6. Построение смещенного фронта из предыдущего примера остается в силе. Однако теперь пересечение фронта со срезом (хвостом) волны первоначальной формы определяет амплитуду равной 650 кв.

Как показывают примеры, амплитуда коротких, например срезанных, волн под действием потерь на корону снижается весьма быстро; наоборот, длинные

волны затухают незначительно. Однако искажение фронта волн не зависит от длины волны. Поскольку фронт волны при напряжениях меньше начального коронного распространяется без искажения, на фронте волны, пробежавшей некоторое расстояние, возникает характерная ступенька при $u = U_{\rm H.K.}$

18-15. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И КОЭФФИЦИЕНТ СВЯЗИ ДЛЯ ЛИНИИ С ИМПУЛЬСНОЙ КОРОНОЙ

Для каждой "полосы" волны (рис. 18-15) справедливо соотношение $di = \frac{1}{z'_n} du$,

где
$$z'_{\kappa} = \sqrt{\frac{L}{C_{\kappa}}} = \frac{z_{\bullet}}{\sqrt{1+2Bu}}$$
 - волновое сопротивление коронирующей линии при напря-

жении и, соответствующем взятой полосе. Интегрируя это выражение, имеем:

$$i = \frac{1}{z_0} \int_0^u \sqrt[n]{1+2Bu} \, du,$$

где z. - волновое сопротивление линии при отсутствии короны.

Сравнивая полученное выражение с формулой $i = \frac{1}{z_{\rm R}} u$, находим, что полное волновое сопротивление коронирующей линии $z_{\rm R}$ зависит от амплитуды волны следующим образом:

$$z_{\kappa} = z_{0} \frac{3Bu}{\left[(1 + 2Bu)^{3/2} - 1 \right]} \approx \frac{z_{0}}{\sqrt{1 + Bu}}.$$
 (18-29)

При напряжениях до 1000—1500 кв волновое сопротивление воздушной линии снижается с 450—500 до 400 ом. При напряжениях в несколько тысяч киловольт волно-

вое сопротивление линии снижается до 300-350 ом. При развитии короны вокруг провода сосредоточивается объемный заряд, который искажает плоское электрическое поле волны на линии без потерь, что ведет к возникновению продольной (направленной вдоль линии) составляющей напряженности электрического поля E_x (рис. 18-18). На параллельной изолированной линии 2 эта составляющая вызывает подтекание вблизи максимума волны зарядов знака, обратного знаку индуктирующей волны на линии 1. Потенциал линии 2 определяется наложением полей зарядов линии 1 и линии 2. Поскольку эти заряды противоположного знака, потенциал линии 2 снижается по сравнению с наведенным потенциалом в электростатической системе. Снижается соответственно и коэффициент связи.

Подробный анализ этого сложного процесса показывает, что коэффициент связи при наличии импульсной короны определяется формулой

$$k_{\kappa} = k_0 \frac{z_0}{z_{\kappa}} \approx k_0 (1 + Bu),$$
 (18.30)

где k_0 — коэффициент связи на линии без потерь.



Рис. 18-18. Возникновение продольной составляющей электрического поля E_x и индукция волны напряжения на изолированном проводе 2, находящемся в поле коронирующей линии 1.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Прямоугольная волна длиной $t_{\rm B}{=}5$ мксек, движущаяся по воздушной линии с $z{=}500$ ом, проходит через кабельный участок длиной $l{=}100$ м, $z{=}30$ ом. Определите форму волны за кабельным участком.

Указание. Представить кабельный участок сосредоточенной емкостью.

2. На подстанцию (рис. 18-3,6) набегает прямоугольная волна с косоугольным фронтом $t_{\rm dpp}=4$ мксек. Число приключенных линий n=3 (включая линию, по которой набегает волна). Волновое сопротивление линий z=400 ом. Индуктивность L=5 мгн. Определите формы волн на шинах и перед индуктивностью.

3. Прямоугольная волна с косоугольным фронтом длиной $t_{\phi p} = 4$ мксек воздействует на колебательный контур с параметрами L=1 мгн, $C=1\,000\,$ пф. Определите амплитуду напряжения (в долях от амплитуды набегающей волны) на емкости.

4. Опишите порядок расчета схемы с многократными отраженнями воли в схеме на рис. 18-11 и поясните его цифровыми величинами, указапными на сетке многократных отражений.

5. В схеме на рис. 18-9 ток молнии $I_{\rm M} = 100$ ка, протекающий через сопротивление заземления $R_3 = 10$ ом, создал напряжение $U_8 = 1000$ кв. Длина подхода l = -1000 м, волновое сопротивление линии $z_0 = 400$ ом. Вольт-амперную характеристику (110 кв) построить по точкам I = 3 ка, U = 315 кв; I = 5 ка, U = 335 кв; I = 10 ка, U = 367 кв. Рассчитайте амплитуду тока в РВ.

6. Объясните, почему при соединении жилы и оболочки кабеля импульсный ток вытесняется на оболочку.

7. Рассчитайте затухание волны $u_{(-)} = U_0 e^{\overline{T}_B}$, где $U_0 = 1\,000\,\kappa s$, $T_B = 5\,\kappa ce\kappa$ при пробеге 4 км по воздушной линии с проводами $2r = 50\,\kappa m$.

8. Рассчитайте коэффициент связи $k_{\rm R}$ (с учетом импульсной короны) между тросом и проводом при расстояниях (см. рис. 18-12) D_{12} =30 м, d_{12} =6 м; радиус троса $r_{\rm TP}$ =5 мм, радиус провода $r_{\rm TP}$ =20 мм. Напряжение волны на тросе U_0 = =2000 кв.

Глава девятнадцатая

молния и ее воздействия

19-1. РАЗВИТИЕ ГРОЗОВОГО РАЗРЯДА

Происхождение гроз — этого величественного явления природы с давних времен и по сей день служит предметом многочисленных исследований. Образование грозовых облаков рисуется современной теорией в следующем виде.

В атмосфере, насыщенной водяными парами, под действием мощных восходящих воздушных потоков происходит разбрызгивание водяных капель. Опыты показали, что образующаяся при разбрызгивании мельчайшая водяная пыль оказывается заряженной отрицательно, а остающиеся тяжелые капельки — положительно (рис. 19-1). Ветер разносит отрицательно заряженную водяную пыль на значительные расстояния, образуя основной массив грозового облака. Положительно



Рис. 19-1. Электрические заряды и воздушные потоки в грозовом облаке.

заряженные капли выпадают в виде дождя на землю или удерживаются во взвешенном состоянии, образуя в грозовом облаке местное скопление положительных зарядов. Таким образом, началом грозового явления служит электризация облаков в результате механического разделения зарядов противоположного знака и сосредоточения в различных частях облака значительных объемных униполярных зарядов.

Измерения с помощью шаров-зондов показали, что в верхних слоях тучи, выше изотермы — 10°, сосредоточены положительные заряды.

В этих слоях действует иной механизм разделения зарядов, связанный с электризацией кристалликов льда.

Грозовое облако, заряженное с нижней стороны в основном отрицательными зарядами, образует гигантский конденсатор, другой «обкладкой» которого является земля, где на поверхности индуктируются положительные заряды. Средняя напряженность электрического поля конденсатора облако — земля редко превышает 10 кв/м. Однако в местах, где плотность электрического заряда велика, создаются условия для коронного разряда. В частности, на земле наблюдаются светящиеся разряды с остроконечных предметов. В том случае, когда напряженность электрического поля у облака или у земли достигает критического



Рис. 19-2. Развитие молнии. а — оптическая картина; б — токовая картина.

значения 25—30 кв/см, создаются условия для развития молнии. Из всех видов грозовых разрядов (разряды между облаками, шаровая молния, четочная молния и пр.) наибольший интерес представляет разряд между облаком и землей в форме линейчатой молнии, поскольку именно с этим видом разряда связано подавляющее большинство повреждений, наносимых электрическим установкам.

Разряд молнии в основных чертах подобен длинной искре, возникающей в воздухе между проводящими электродами (см. § 4-9, 4-10), отличаясь от нее рядом особенностей, связанных с физическими свойствами грозового облака, как одного из электродов разрядного промежутка. В настоящее время в результате обширных лабораторных и полевых исследований, проводившихся в Советском Союзе и за границей, физическая картина развития грозового разряда и характеристики молнии в значительной степени выяснены.

Разряд между облаком и землей обычно начинается с прорастания от облака к земле слабо светящегося канала, движущегося толчкообразно со средними скоростями 10⁷—10⁸ см/сек. Этот предварительный разряд назван ступенчатым лидером. Средняя длина ступени — порядка 50 м, пауза между отдельными толчками составляет 30—90 мксек. Скорость прорастания каждой ступени — порядка 5 · 10⁹ см/сек.

На рис. 19-2, а показана стилизованная оптическая картина развития разряда при съемке разряда на движущуюся фотопленку. Ступенчатый лидер показан нитевидными линиями с засвеченными участками на концах; эти участки соответствуют прорастанию ступеней. Лидер показан разветвленным. Обычно лишь одна из ветвей лидерного канала достигает земли.

Когда лидер достигает земли, начинается фаза главного разряда, воспринимаемая невооруженным глазом как собственно разряд молнии. По оптическим записям главный разряд представляет собой волну интенсивного свечения, движущуюся от земли к облаку (жирная линия на рис. 19-2,*a*). Эта волна свечения носит название главного канала. Скорость главного разряда у земли лежит в пределах ¹/₂₀—¹/₂ скорости света, что составляет 15—150 м/мксек. По мере удаления от



Рис. 19-3. Развитие тока молнии. а — накопление зарядов в лидерной стадии; б — нейтрализация зарядов в стадии главного разряда.

земли интенсивность свечения и скорость продвижения главного разряда снижаются.

Главный разряд завершается, когда волна интенсивного свечения достигает облака. В последующей стадии (заштрихованная область на рис. 19-2,а) яркость канала молнии резко уменьшается, но свечение, так называемое «послесвечение», еще длится тысячные и даже сотые доли секунды. Стадией послесвечения завершается структура одного импульса.

Лидер молнии, так же и лидер искрового заряда, можно грубо схематически представить в виде спускающегося от облака к земле проводящего канала с большой плотностью (на единицу длины) отрицательных электрических зарядов (рис. 19-3), которую обозначим через $q_{\rm M}$ (κ/m). Когда лидер достигает земли, по его каналу с большой скоростью распространяется от земли к облаку разрядная волна, эквивалентная стеканию в землю отрицательных зарядов лидера. Эта разрядная волна представляет собой главный разряд, характеризуемый интенсивным свечением канала молнии. Разрядная волна создает ток, протекающий в канале молнии и в пораженном объекте. С этим током, который и называется собственно током молнии, связано возникновение волн перенапряжений в электрических установках. Обозначив скорость разрядной волны через $v_{\rm M}$ ($m/ce\kappa$), ток молнии можно выразить соотношением, аналогичным (4-14),

$$i_{\rm M} = q_{\rm M} v_{\rm M}, \ a. \tag{19-1}$$

Поскольку скорость главного разряда велика, амплитуда тока молнии достигает десятков и даже сотен тысяч ампер, однако длительность тока молнии ограничена в основном временем пробега разрядной волны по каналу лидера.

Главный разряд приводит к резкому возрастанию проводимости канала молнии. Через этот канал по завершении главного разряда стекают остаточные заряды лидера и облака. В этой стадии ток, называемый током послесвечения, достигает сотен ампер и лишь изредка тысяч ампер. Этим током через канал молнии переносится основной заряд той части грозового облака, откуда начался грозовой разряд. В стадии послесвечения молния может быть уподоблена дуге постоянного тока между облаком и землей. Эта дуга поддерживается в течение тысячных или даже сотых долей секунды. Кривая тока молнии, соответствующая оптической картине развития грозового разряда, приведена на рис. 19-2, б.

Примерно в 40% случаев разряд молнии имеет многократный характер, в среднем с тремя-четырьмя импульсами в одном разряде. Изредка наблюдаются разряды и со значительно большим числом импульсов. Причиной возникновения повторных импульсов являются внутренние разряды в грозовом облаке между нейтрализованной областью и соседними скоплениями зарядов. Лидер повторных импульсов, так называемый стреловидный лидер, не имеет ступеней и движется непрерывно по пути первого заряда со скоростью порядка 10⁸ см/сек. В остальном структура повторных импульсов не отличается от описанной выше.

Токи молнии повторных импульсов, как правило, ниже тока первого импульса. Общая продолжительность разряда молнии достигает десятых долей секунды. Зарегистрирован разряд молнии длительностью 1,33 сек. Суммарный заряд, переносимый молнией, лежит обычно в пределах 20—100 к.

В обрисованной выше картине лидерный разряд развивается от облака к земле. При разряде молнии в высокие строения возможно прорастание встречного лидера. Соединение отрицательного и положительного каналов лидерного разряда на некоторой высоте от поверхности земли дает начало главному разряду.

19-2. ТОКИ МОЛНИИ

В расчетах грозоупорности электрических установок исходной величиной является обычно не напряжение, а ток молнии, так как непосредственно измерены могут быть именно токи молнии.

Для измерения токов молнии в полевых условиях широко применяют регистраторы, представляющие собой стерженьки из ферромагнитного материала. Регистратор 1 располагается в направлении силовых линий 2 магнитного поля проводника 3, обтекаемого током (рис. 19-4,а). При прохождении тока молнии регистратор намагничивается до некоторой остаточной индукции B₀, пропорциональной амплитуде тока. Эта индукция измеряется магнетометром. С помощью специально отградуированных кривых для заданного расстояния s регистратора от оси провода по значению В_о определяют амплитуду импульсного тока в проводе.

Чтобы избежать большой погрешности, регистраторы должны быть выполнены из материала с пологой спинкой кривой намагничивания (рис. 19-4, a), так как только в этом случае индукция *B*, до которой





намагничивается регистратор, будет близка к остаточной индукции B₀. Кроме того, в регистраторе при намагничивании не должны возникать вихревые токи. Этим условиям удовлетворяют стержни из порошка высоколегированной стали, замешанного на изоляционном лаке. В качестве регистраторов пригодны также обыкновенные бритвенные лезвия или отрезки магнитофонной ленты.

С помощью магнитных регистраторов измеряют также крутизны фронта тока молнии. Для этого применяют конструкцию, показанную на рис. 19-4, б. Вблизи проводника, обтекаемого током $i_{\rm M}$, располагается рамка, в которой наводится э. д. с. $E = M \frac{di_{\rm M}}{dt}$, где M — коэффициент взаимоиндукции проводник — рамка. В рамку включена катушка с активным сопротивлением R и индуктивностью L. Постоянная времени



Рис. 19-5. Кривые вероятности токов молнии по рекомендациям Руководящих указаний. 1 — для равнинных районов с малыми переходнымя сопротивлениями в месте разряда; 2 — для горных районов.

T = L/R должна быть много меньше длины фронта волны тока молнии. При этом условии установившийся ток в катушке на фронте волны будет равен i = E/R. Измеряя по остаточной намагниченности регистратора ток *i* и зная *R* и *M*, определяют крутизну тока молнии di_M/dt .

Массовые измерения тока молнии в Советском Союзе и за границей позволили построить кривые вероятности амплитуд и крутизн токов молнии. Эти кривые, естественно, различны для разных районов земного шара. В СССР для равнинных районов страны нормирована кривая вероятности токов молнии, показанная на рис. 19-5 сплошной линией. По оси абсцисс отложены вероятности p_I появления токов, превышающие значения, указанные на ординате. Наиболее часты токи молнии до 50 ка. Токи 50—100 ка наблюдаются редко, а токи свыше 100 ка очень редки и должны, следовательно, учитываться только при проектировании весьма ответственных электрических установок.

С увеличением высоты местности кривые вероятности p_I снижаются. В горных районах Кавказа амплитуды тока молнии составляют при той же вероятности примерно половину от регистрируемых в равнинных районах. Руководящими указаниями для горных районов нормирована кривая, показанная на рис. 19-5 пунктиром. Зависимость токов молнии от высоты местности объясияется в основном влиянием на лидерную стадию разряда молнии.
Аналитическая зависимость вероятности p_I (в долях единицы) от тока молнии $I_{\rm M}$ (ка), нормируемая на рис. 19-5, задается функциями

$$\lg P_{l}^{(1)} = -\frac{I_{\mathbf{x}}}{60} + \lg P_{l}^{(2)} = -\frac{I_{\mathbf{x}}}{30}$$
(19-2).

соответственно для равнинных и горных районов.

В соответствии с распределением зарядов в грозовом облаке токи молнии имеют преимущественно отрицательную полярность. В то же время редкие разряды положительной полярности достигают иногда очень большой силы (большие токи молнии). Это может быть объяснено большой плотностью положительных зарядов в грозовом облаке и условиями прорастания положительно заряженного лидера.



Рис. 19-6. Кривые вероятности крутизи фронта тока молнии по рекомендациям Руководящих указаний. 1 — для равнияных районов с малыми переходными сопротивлениями в месте разряда; 2 — для горных районов.

Важным параметром в расчетах грозоупорности является также скорость (или крутизна) нарастания тока молнии на фронте волны. Этот параметр обозначается буквой $a_{\rm M}$ и измеряется в килоамперах в микросекунду (*ка/мксек*) или килоамперах на метр (*ка/м*). Массовые измерения позволили построить кривые вероятности, показанные на рис. 19-6. Аналитически эти кривые выражаются функциями

$$\lg P_a^{(1)} = -\frac{a_{\mathbf{x}}}{36} \quad \text{is } \lg P_a^{(2)} = -\frac{a_{\mathbf{x}}}{18} \tag{19-3}$$

соответственно для равнинных и горных районов.

Сопоставление данных совместных измерений $I_{\rm M}$ и $a_{\rm M}$ показало, чтокрутизны и амплитуды токов молнии статистически весьма слабо связаны между собой. Этот вывод справедлив по крайней мере для тех областей $I_{\rm M}$ и $a_{\rm M}$, где данных измерений достаточно для их надежного статистического анализа. Поэтому вероятность превышения заданных параме-19—641 тров Ім и ам может, как для независимых явлений, оцениваться по формулам

$$\lg P_{I,a}^{(1)} = -\left(\frac{I_{N}}{60} + \frac{a_{N}}{36}\right)$$
(19-4)

И

$$\lg P_{I,a}^{(2)} = -\left(\frac{I_{\rm M}}{30} + \frac{a_{\rm M}}{18}\right) \tag{19-4a}$$

соответственно для равнинных и горных районов.

Пример 19-1. Молния поразила опору. Расчеты показали, что на опоре произойдет перекрытие изоляции, если:

а) ток молнии I_м>120 ка при любой крутизне фронта; б) ток молнии I_м>80 ка при крутизне фронта а>30 ка/мксек. Определить вероятности перекрытия изоляции, соответствующие двум указанным опасным воздействиям. Район — равничный. В случае «а» необходимо определить вероятность превышения тока молнии

I_м = 120 ка при любой крутизне тока молнии. По формуле (19-2) находим:

$$\lg P_I^{(1)} = -\frac{I_{\rm M}}{60} = -\frac{120}{60} = -2,$$

откуда находим $P_{I} = 0,01.$

В случае "б" находим:

$$\lg P_{l,a}^{(1)} = -\left(\frac{I_{\rm M}}{60} + \frac{a_{\rm M}}{36}\right) = -\left(\frac{180}{60} + \frac{30}{36}\right) = -2,33,$$

откуда $P_{I,a} = 0,0045$.

Таким образом, при первом условии перекрытие изоляции произойдет в одном случае из 1/0,01=100 поражений, при втором — в одном случае из 1/0,0045=220 поражений.

Приведенные в § 19-2 кривые или функции вероятности для токов молнии и их крутизи рекомендованы на основании массовых измерений, проводившихся примерно до 1960 г. За последние годы накоплен новый материал по измерениям токов молний как в СССР, так и за границей. В частности, измерения в Польской Народной Республике показали, что вероятность очень больших токов выше, чем это предполагалось ранее. Уточняется и статистическая связь токов молнии и крутизн. Можно поэтому ожидать, что функции вероятности для параметров токов молнии будут в дальнейшем уточняться в рекомендациях Руководящих указаний.

19-3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДЛЯ МОЛНИИ

В расчетах грозоупорности молния должна быть замещена некоторой эквивалентной схемой. Обычно довольствуются представлением молнии источником тока. Такое замещение основано на том, что именно ток молнии является наиболее изученным ее параметром. Замещение молнии источником тока предполагает, что ток молнии практически не зависит от сопротивления его растеканию в месте поражения. Основанием к этому предположению служит тот косвенный признак, что в полевых измерениях токов молнии не было обнаружено какой-либо статистической зависимости токов молнии от сопротивлений заземлений опор R₃. В последнее время прямыми опытами на моделях показана слабая зависимость амплитуды тока $I_{\rm M}$ от R_3 в пределах $R_3 = 0 \div 25$ ом. С другой стороны, эти опыты показали, что с ростом R₃ до нескольких сотен ом ток молнии значительно снижается. Сопротивление R_a может представлять как действительное сопротивление заземления пораженного объекта, так и волновое сопротивление пораженного провода. Зависимость тока $I_{\rm N}$ от $R_{\rm 3}$ объясняется влиянием $R_{\rm 3}$ на протекание главного разряда тока молнии.

Экспериментально установленный факт наличия связи между $I_{\rm M}$ и сопротивлением R_3 позволяет ввести схему замещения п. у. м., изображенную на рис. 19-7. В основе такой схемы лежит следующее пред-



Рис. 19-7. Схема замещения прямого удара молнии.

ставление. Лидер канала молнии, обладающий высокой проводимостью, несет на своей головке высокий потенциал U_0 . При поражении заземленного объекта возникает ток $I_{\rm M}$, который можно вычислять путем включения U_0 на волновое сопротивление канала молнии $z_{\rm M}$ и сопротивление заземления R_3 . Величину U_0 следует принять равной $I_{\rm M} z_{\rm M}$, где $I_{\rm M}$ — ток молнии в хорошо заземленном объекте. Тогда ток молнии через объект R_3 составит:

$$I_{M}^{*} = I_{M} \frac{z_{M}}{z_{M} + R_{3}}.$$
 (19-5)

Волновое сопротивление $z_{\rm M}$ для канала главного разряда при токах порядка 100—200 ка оценивается в 250—100 ом. Сопротивление заземлителей опор, как правило, меньше 25 ом. Значения в сотни ом имеют волновые сопротивления проводов и тросов. На основании (19-5) можно принять, что при разрядах в провода и тросы (до прихода отраженной волны от заземлителей) ток молнии ограничивается их волновым сопротивлением до половинного значения от тока в хорошо заземленном объекте. Понятно, что при последующем перекрытии на землю ток в канале молнии снова возрастает.

19-4. ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКА МОЛНИИ

Грозовой разряд оказывает электромагнитные, тепловые и механические воздействия.

С главным разрядом связано электромагнитное поле, которое индуктирует напряжение на проводах и проводящих конструкциях вблизи места удара. Индуктированные напряжения на линиях электропередачи могут достигать сотен киловольт. Ток молнии $I_{\rm M}$, протекая через заземленный объект с сопротивлением заземления R_3 , например через опору линии электропередачи, создает на этом сопротивлении падение напряжения $I_{\rm M}R_3$. Ввиду больших значений тока молнии напряжение U_3 может достигать сотен и даже тысяч киловольт. Падение напряжения U_3 совместно с напряжением, индуктированным электромагнитным полем тока молнии, приводит к так называемым перенапряжениям прямого удара молнии.

Индуктированные перенапряжения и перенапряжения прямого удара молнии, объединяемые под общим названием атмосферных перенапряжений, распространяются на все участки электрически связанной системы.

Протекание тока молнии связано с выделением тепла в проводнике. Расчеты показывают, что ток молнии I_{M} (ка), вызывающий нагревание 19*

$$I_{\rm M} = k \; \frac{q}{V \, \overline{t_{\rm B}}},\tag{19-6}$$

где k — коэффициент, значение которого составляет для меди 300—330, для алюминия 200—230;

q — сечение проводника, мм²;

t_в — длина волны, *мксек*.

Практически с тепловым эффектом тока молнии следует считаться лишь при использовании проводников малого сечения, например в плавких предохранителях.

Несколько большую опасность представляет выплавление металла в месте соприкосновения с каналом молнии, температура которого очень высока. Расчеты и эксперименты показывают, что наиболее мощные грозовые разряды могут повести к выплавлению металла на глубину нескольких миллиметров.

Механические воздействия тока молнии проявляются в расщеплениях деревьев, разрушении небольших каменных строений, кирпичных труб, не защищенных молниеотводами, и пр. На линиях электропередачи наблюдаются расщепления деревянных стоек и траверс опор. Механизм этого расщепления таков: ток молнии, протекая по волокнам дерева, приводит к перемещению нитей канала искры (см. § 11-2) и взрывообразному испарению влаги, содержащейся в древеоине. Из столба вырываются щепы длиной до нескольких метров.

Механическое воздействие тока молнии связано также с электростатическими силами, возникающими между зарядами в диэлектрике (дерево, камень), остающимися после прохождения тока молнии. Эти силы, имеющие ударный характер, и приводят к разрушению каменных и кирпичных построек.

Ток молнии, протекая через узкие каналы и щели, вызывает значительные разрывающие усилия. Этот эффект существен для трубчатых разрядников, где ток молнии протекает в канале 6—24 *мм* (см. § 21-10). Критические значения тока, приводящие к разрушениям разрядников, зависят от диаметра канала и прочности трубки по отношению к ударным нагрузкам.

19-5. ХАРАКТЕРИСТИКА ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Как было показано в § 19-1, вертикальные потоки воздуха и воздушные вихри в верхних слоях атмосферы являются основными возбудителями процессов, ведущих к образованию грозовых облаков. По метеорологическим признакам различают грозы фронтальные и тепловые.

При перемещении вдоль земной поверхности масс холодного воздуха на фронте потока образуются мощные вертикальные струи и вихри. В этих условиях возникают так называемые фронтальные грозы. Грозовые облака в виде крупных образований, занимающих большую площадь, перемещаются вместе с основным воздушным потоком. Для фронтальных гроз характерны частые грозовые разряды — преимущественно между облаками и землей.

Тепловые грозы возникают в результате вертикальной конвекции паров воды и воздуха, нагретых солнечными лучами. В горных районах условия для такой конвекции особо благоприятны. Склоны гор обра-



Рис. 19-8. Карта грозовой деятельности на территории СССР.

зуют естественную «трубу» со значительной тягой. Тепловые грозы захватывают относительно небольшие территории; интенсивность их обычно ниже фронтальных; число грозовых разрядов между облаками велико.

Интенсивность грозовой деятельности характеризуют числом грозовых дней в году n_{π} либо числом грозовых часов в году n_{Ψ} . Значения n_{π} или n_{Ψ} устанавливаются как средние арифметические за ряд лет наблюдения. Для грубых расчетов можно принимать, что средняя продолжительность гроз в течение одного грозового дня составляет 1,5 ч.

В настоящее время построена подробная карта грозовой деятельности на европейской части СССР. По этой карте наибольшее число грозовых дней в году наблюдается в некоторых горных районах Кавказа, в южной, степной и центральной полосах. По мере продвижения



Рис. 19-9. К явлению избирательной поражаемости молнии.

к северу число грозовых дней спадает. Весьма слаба также грозовая деятельность в прикаспийских районах. Карта грозовой деятельности для всей территории Советского Союза приведена на рис. 19-8.

Как видно из рис. 19-8, число грозовых дней в году в южных районах СССР достигает 30—35, в средней полосе близко к 20, а на крайнем севере (н в Средней Азии) спадает до 5. Заметим, что в некоторых районах Африки число грозовых дней в году достигает 100—140.

Число грозовых дней в годуявляется, однако, неполной характеристикой грозовой деятельности. Для сравнительной оценки грозозащитных мероприятий желательно определение среднего числа пораже-

ний квадратного километра земной поверхности. Можно провести резкое разграничение между удельной поражаемостью равнинных и горных районов страны. Для равнинных районов среднее число поражений на 1 κm^2 , отнесенное к одному грозовому дню, составляет 0,1. В горных районах большинство грозовых разрядов происходит между облаками и удельная поражаемость земной поверхности снижается до 0,01—0,02. Определяя по карте грозовой деятельности число грозовых дней в году, можно найти и число поражений на 1 κm^2 за один грозовой сезон.

Длительными наблюдениями установлено наличие в некоторых местностях участков с избирательной поражаемостью грозовыми разрядами. Причиной избирательной поражаемости являются почвенные включения высокой проводимости. В лидерной стадии разряда токи проводимости, замыкающие токи смещения в почве, протекают преимущественно по путям с повышенной проводимостью (рис. 19-9). В результате, на ограниченных участках земной поверхности накапливается большая часть заряда, индуктированного приближающимся лидером. Естественно, что разряд будет развиваться по направлению к этим участкам. Избирательно поражаются обычно места выхода на поверхность грунтовых вод и участки стыка пород разной проводимости. В горных районах имеются весьма значительные участки избирательной поражаемости (расщелины, русла рек, склоны гор), для которых число поражений на 1 км² резко превышает среднее значение.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Покажите схему развития грозового разряда во всех его стадиях.

2. Каким образом следует установить магнитные регистраторы на линиях с тросзми для измерения полного тока молнии? Как определить по намагничению установленных регистраторов, произошел ли п. у. м. непосредственно в опору или в трос в пролете?

3. Проектируется линия электропередачи в средних районах Украины. Определите среднее число грозовых разрядов, приходящееся за год на 1 км² вдоль трассы линии, с токами /_м>100 ка и а_м>20 ка/*жксек*.

Глава двадцатая

молниеотводы и заземлители

20-1. ЗАЩИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ МОЛНИЕОТВОДОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

История молниеотвода начинается с 1749 г., когда Франклин предложил защищать строения металлическими стержнями — «громоотводами», как их неправильно называли в прошлом. Франклин предполагал, что эти шесты отводят электричество из воздуха, чем и предотвра-

щается поражение строения молнией. Защитная роль молниеотводов была впервые правильно оценена М. В. Ломоносовым, который указал, что молниеотвод предотвращает поражение защищаемых объектов, принимая на себя разряд молнии. Такое понятие вполне соответствует современной точке зрения. В наше время с установлением физических особенностей развития грозового разряда оказалось возможным найти инженерные основы защиты молниеотводами.

Защитное действие молниеотводов проявляется в лидерной стадии грозового разряда. Траектория лидера молнии, как и вообще длинной искры в воздухе, подчиняется статистическим закономерностям. Из всех вероятных направлений разряда преимущественное направление определяется максимальными напряженностями электрического поля. На больших высотах это направление устанавливается исключительно самим каналом лидера (рис. 20-1,а). Поэтому на большей части путилидера земные объекты практически не влияют на направление развития разряда. Однако на некоторой Н, называемой высотой высоте

ŀ





Рис. 20-1. Эквипотенциальные линии поля и направление преимущественного развития разряда (пунктирная линия) на большой (а) и малой (б) высотах.

ориентировки молнии, начинает сказываться искажение поля земными сооружения. Направление максимальных напряженностей поля, а следовательно, и развитие заряда устанавливаются по отношению к наиболее возвышающимся объектам — молннеотводам (рис. 20-1,б). Вероятность разряда в сооружение вблизи молниеотвода резко снижается. При некоторой высоте превышения молниеотвода над защищаемыми сооружениями практически ни один разряд не будет поражать эти сооружения. Пространство, защищенное от прямых ударов молнии, называется защитной зоной молниеотвода. Любое сооружение, целиком входящее в защитную зону молниеотвода, защищено от прямых ударов молнии.

Зоны защиты молниеотводов определяются на моделях, в которых канал молнии имитируется стержнем, расположенным на высоте ориентировки молнии *H*. На стержень подается волна ГИН. Стержень располагается в местах, откуда вероятность поражения молнией объекта наибольшая.

20-2. ЗОНА ЗАЩИТЫ СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода показана на рис. 20-2. Обозначим высоту защищаемого объекта через h_x и высоту молниеотвода через h. Разность $h_a = h - h_x$, т. е. высота превышения молниеотвода над защищаемым объектом называется активной высо-

Сечение зоны защиты на уровне h_z



Рис. 20-2. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода.



Рис. 20-3. Зона 100%-ного поражения двух стержневых молниеотводов.

той молниеотвода. Зона защиты одиночного молниеотвода образует «шатер», радиус которого r_x на уровне h_x определяется соотношением

$$r_x = h_a \frac{1.6}{1 + \frac{h_x}{h}} p,$$
 (20-1)

где коэффициент p=1 для $h \le 30$ м н p=5,5 V \overline{h} для h > 30 м.

Опыты на моделях показали, что стрежневой молниеотвод обладает некоторой «зоной 100%-ного поражения» (рис. 20-3), в которой лидер молнии всегда развивается по направлению к молниеотводу. На высоте ориентировки молнии радиус r_x этой зоны равен примерно $3,5h_a$, где h_a — активная высота молниеотвода. Если на расстоянии $s=7h_a$ помещен второй молниеотвод, то зоны 100%-ного поражения обоих молниеотводов пересекутся на высоте H. Защитная зона двух стержневых молниеотводов при этом значительно расширяется. Расстояние $s=7h_a$ является предельным расстоянием между молниеотводами, при котором зоны 100%-ного поражения еще пересекаются на высоте *H*. Для исключения вероятности разрядов из точек, лежащих на осн y - y, на некотором расстоянии от оси x - x необходимо сближение молниеотводов.



Рис. 20-4. Зона защиты двух стержневых молниеотводов. *а* — очертания зоны защиты; *б* — расчетные кривые для ширины зоны *b*_x.

На этой основе определяется защитная зона двух стержневых молниеотводов, очертания которой показаны на рис. 20-4,*a*. Радиус защиты r_x определяется по формуле (20-1). Ширина зоны защиты на уровне защищаемого объекта $2b_x$ определяется по кривым, приведенным на рис. 20-4,*б*, в зависимости от заданных s/h_a и высоты защищаемого объекта h_x . По кривым определяется отношение $\frac{b_x}{h_a}p$, откуда находится b_x . Коэффициент *p* по-прежнему равен 1 для молниеотводов с $h \leq 30$ м и 5,5/ \sqrt{h} для молниеотводов с h > 30 м.

[Гл. 20

Ширина защитной зоны $b_x = 0$ при $s = 7h_a p$. Низшая точка 0 защитной зоны между молниеотводами расположена на уровне $h_0 = h - \frac{s}{7} \frac{1}{p}$ и лежит на окружности радиусом R, проходящей через вершины молниеотводов и точку 0.

Защитные зоны четырех и трех стержневых молниеотводов приведены на рис. 20-5. Вне контуров 1-2-3-4 (рис. 20-5,*a*) или 1-2-3(рис. 20-5,*б*) защитные зоны определяются для каждой пары молниеотводов по расчетным соотношениям двойных стержневых молниеотводов.



Рис. 20-5. Защищенная площадь на уровне h_x. а – четырьмя; б – тремя стержневыми молниеотводами.

Условие защищенности всей площади 1—2—3—4 или 1—2—3 выражается соотношением

$$D \le 8h_{\rm a}p,\tag{20-2}$$

где D — наибольшая диагональ четырехугольника 1—2—3—4 или диаметр окружности, построенный по трем точкам 1—2—3. Низшая

точка θ внутри защитной зоны расположена на высоте $h = \frac{D}{8} \cdot \frac{1}{p}$.

Пример 20-1. На рис. 20-6 показана компоновка открытого распределительного устройства 110 кв, которое требуется защитить от прямых ударов молнии. Молинеотводы устанавливаются на конструкциях подстанции.

Места установки молниеотводов выбираем так, как это показано на рис. 20-6. Основанием к этому служит прикидочный расчет размещения минимального числа молниеотводов с активной высотой 5—10 м. Разбивая площадь подстанции на секторы *I—V*, определяем по формуле (20-2) условия защиты каждого сектора.

Минимальная активная высота молниеотводов для защиты прямоугольного сектора II равна $h_a = 55/8 = 6,9$ ж; для защиты прямоугольного сектора I $h_a = 50/8 = 6,25$ ж; для защиты треугольного сектора IV $h_a = 55/8 = 6,9$ ж. Принимаем для всех молниеотводов активную высоту $h_a = 7$ ж.

водов активную высоту $h_n = 7$ м. Как видно из рис. 20-6, порталы А и Б, имеющие высоту 8,2 м, находятся за пределами треугольных секторов III и IV. Проверяем защищенность этих порталов, производя построение защитных зон для двойных стержневых молниеотводов 4—8 и 6—7. Полная высота молниеотводов равна 11+7=18 м (молниеотводы установлены на портальных конструкциях высотой 11 м). Высота превышения молниеотводов над порталом равна $h_n = 18 - 8, 2 = 9,8$ м.

По формуле (20-1) определяем радиус защитной волны (при p=1)

$$r_{\pi} = 9.8 \frac{1.6}{1 + \frac{8.2}{18}} = 10.7 \text{ m}.$$

Находим b_x , экстраполируя по кривым, приведенным на рис. 20-4, 6 для $\frac{s}{h_a} = \frac{46}{9.8} = 4.7$

и $\frac{hx!}{h} = \frac{8.2}{18} = 0.455$; находим $b_x/h_a = 0.58$, и, следовательно $b_x = 0.58 \cdot 9.8 = 5.7$ м.

Построение, выполненное на рис. 20-6, показывает, что порталы А и Б входят в защитную зону молниеотводов.



Рис. 20-6. К примеру 20-1.

20-3. ЗАЩИТНЫЕ ЗОНЫ ТРОСОВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ

Экранирующее действие тросов принято характеризовать углом защиты α , образованным вертикалью, проходящей через трос, и линией, соединяющей трос с проводом (рис. 20-7). Тросы тем надежнее экранируют (защищают) провода, чем меньше угол α . Вероятность P_{α} поражения проводов, защищенных тросами с защитным углом α , или, как говорят, вероятность прорыва молнии через тросовую защиту определяется по формуле

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt[n]{h_{\text{on}}}}{90} - 4. \tag{20-3}$$

Эта формула отражает основные закономерности защиты проводов тросовыми молниеотводами: вероятность прорыва возрастает с увеличением угла α и повышением высоты опор h.

Пример 20-2. Определить вероятность прорыва молнии на линии с $h_{on} = 15$ и 45 м и $\alpha = 30^{\circ}$.

Находим по формуле (20-3) в первом случае $\lg P_{\alpha} = \frac{30 \sqrt{15}}{90} - 4 = -2,7$ и $P_{\alpha} = = 0,002$ и во втором случае $\lg P_{\alpha} = -1,8$ и $P_{\alpha} = 0,016$.

Приведенный пример показывает, что на линиях с высотой опор порядка 15 м защитный угол $\alpha = 30^\circ$ еще обеспечивает удовлетворитель-

ную защиту, но на линиях с высокими опорами необходимы меньшие углы защиты. Формула (20-3) предложена ЛПИ на основе анализа грозовых поражений большого числа линий. По мере накопления наших сведений о механизме поражения линий формула для P_{α} будет уточняться.

Защитный угол ю, указанный на рис. 20-7, относится к защите внешних проводов. Статистика поражений показала, что провод, находящийся между двумя тросовыми молниеотводами, находится в лучших условиях защиты. Эффект возрастания защитной зоны между мол-



Рис. 20-7. Защитный угол а и защитная зона тросовых молниеотводов.

ниеотводами аналогичен указанному в § 20-2 для стержневых молниеотводов. Внутренняя область ограничивается дугой окружности, проходящей через тросовые молниеотводы и среднюю точку 0, находящуюся на высоте

$$h_0 = h - \frac{s}{4}, \qquad (20-4)$$

где s — расстояние между тросами.

Повышенный экранирующий эффект тросовых молниеотводов по отношению к среднему проводу используется для горизонтального разнесения тросов (рис. 20-7) в целях улучшения защиты крайних проводов до 20°. Однако при разносе тросов и снижении расстояний трос — внешние провода по горизонтали возрастает опасность схлестывания проводов и тросов при пляске проводов во время гололеда.

На деревянных опорах снижение углов защиты крайних проводов возможно путем подвески тросов на дополнительной траверсе. Однако значительный горизонтальный разнос тросов или высокая их подвеска ведет к существенному утяжелению опор. Оптимальные углы защиты для линий 35—110 кв с деревянными опорами установлены практикой в пределах 25—30°.

Защитным действием по отношению к нижерасположенным проводам обладают не только заземленные тросы, но и рабочие провода линии, «заземленные» через свои волновые сопротивления. Поэтому, например, на двухцепных линиях, имеющих вертикальное расположение проводов, верхние провода экранируют нижние.

20-4. ВИДЫ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Заземлители молниеотводов служат для отвода тока молнии в землю. В соответствии с требованиями грозоупорности электрических установок сопротивления заземлений молниеотводов на линиях не должны превосходить 10—15 ом, а на подстанциях 4—5 ом. Массовое устройство заземлителей, например на линиях электропередачи с тросами, ставит задачу выбора наиболее экономичных заземлителей, обеспечивающих малое сопротивление растеканию тока при минимуме затраты металла.

На линиях электропередачи и подстанциях в качестве искусственных заземлителей применяются горизонтальные заземлители в виде лучей или контуров, а также составные вертикальные заземлители из труб или стержней, соединенных горизонтальным электродом. Широко используются также все естественные виды заземлителей — фундаменты

Pac	четные формулы для определен	ия R_{\sim} единичных искусственных	Таблица 20-1 Заземлителей
Тип заземлителя	Эскна	Расчетные формулы	Пряжечаняе
Горизонтальный луч		$R_{\sim} = \frac{\rho}{2\pi i} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2t} \right)$	<i>d</i> — диаметр заземлителя
Вертикальный трубчатый или стержневой саземли- тель		$R_{\sim} = \frac{p}{2\pi i} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{2s + \frac{l}{2}}{2s - \frac{l}{2}} \right)$	Для уголковой стали $d=0,95b,$ где $b-$ ширина уголка
Глубинный вертикальный заземлитель в неоднородном грунте		$R_{\sim} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sum_{l=1}^{n} \gamma_{l} t_{l}} \ln \frac{4l}{d}$	Приведенная формула выведена в пред- положении, что электрическое поле в землю плоскопараллельное
Кольцевой или прямоу- гольный контур		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D_0} \left(\ln \frac{8D_0}{d} + \ln \frac{\pi D_0}{4t} \right)$	Для кольца $D_{o} = D$; для прямоуголь- ника $D_{o} = \sqrt{\frac{4AB}{\pi}},$ где A и $B-$ стороны прямоугольника

§ 20-4]

ť

Гл. 20

Таблица 20-2

Коэффициенты использования заземлителей А. Лучевые заземлители

	_	Коэффициенты	использования	
Эскиз заземлителя	Длина лучей, ж	۳~ (7ig	
	При любой длине	1	1	
	10 20 40	0,9 0,93 0,95	0,8 0,8 0,85	
	10 20 40	0,75 0,8 0,85	0,65 0,70 0,75	

Б. Вертикальные заземлители, объединенные горизонтальным электродом

	a	Число верти-	Коэффициенты использования			
Эскиз заземлятеля	1	кальных элек- тродов	T,	ា _ត		
- <u> </u>	23	2	0,9 0,95	0,8 0,85		
a	23	3	0,85 0,9	0,75 0,8		
	2 3	4	0,75 0,8	0,65 0,7		

опор и конструкций на линиях и подстанциях, присоединенные трубопроводы на станциях и подстанциях и т. д.

Заземлитель характеризуется величиной сопротивления растеканию тока промышленной (или близкой к ней) частоты. Это сопротивление обозначается через $R_{...}$ Величина $R_{...}$ — это то сопротивление, которое измеряется приборами типа «измеритель заземления». Сопротивление $R_{...}$ пропорционально удельному сопротивлению грунта ρ и примерно обратно пропорционально линейным размерам (длине) заземлителя. В целях улучшения растекания тока заземлители закладываются в грунт на глубину 0,7—0,8 м и более (для вертикальных заземлителей это глубина закладки верхней кромки труб или стержней). Такая прокладка служит достаточной гарантией от механических повреждений; кроме того, на глубине 0,7—0,8 м грунт в меньшей степени подвержен высыханию в жаркие летние месяцы года.

Расчетные формулы для определения сопротивлений заземлений R_{\sim} некоторых наиболее распространенных заземлителей приведены в табл. 20-1.

На практике часто применяются заземлители, составленные из нескольких горизонтальных и вертикальных заземлителей. Фактором, ухудшающим использование заземлителей, является взаимное экранирование отдельных элементов сложного заземлителя. Вследствие эффекта экранирования проводимость составного заземлителя понижается по сравнению с суммой проводимостей отдельных его участков. Это понижение оценивается коэффициентом использования η_{\sim} , где значок \sim указывает на протекание тока промышленной частоты.

Сопротивление составного заземлителя определяется до формуле

$$R_{\rm c} = \frac{1}{\eta_{\sim} \Sigma \frac{1}{R_{\odot}}},\tag{20-5}$$

где $\Sigma \frac{1}{R_{\perp}}$ — сумма импульсных проводимостей индивидуальных вертикальных и горизонтальных заземлителей, вычисленных согласно формулам табл. 20-1.

Коэффициенты использования η_{\sim} составных заземлителей разного типа приведены в табл. 20-2. Как видно из данных таблицы, коэффициенты использования снижаются при сближении индивидуальных заземлителей. В табл. 20-2 приведены значения импульсных коэффициентов использования $\eta_{\rm H}$, рассматриваемых в § 20-6.

20-5. РАСЧЕТНОЕ УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТА

Удельное сопротивление грунта р является основной величиной, определяющей выбор типа и линейные размеры заземлителя.

Величина ρ, зависящая от структуры грунта, подвержена сезонным колебаниям. Наибольшее влияние на величину ρ оказывает влажность. Количество содержащейся в почве влаги определяется в основном количеством выпавших осадков и процессами высушивания почвы. Особенно сильным колебаниям влажности подвержены поверхностные слои земли. Поэтому чем глубже заложен заземлитель, тем более стабильно его сопротивление R_{2} . Более глубокие слои земли в лучшей степени сохраняют влагу, вследствие чего для заземлителей, расположенных на большой глубине, можно принимать и меньшие расчетные удельные сопротивления почвы ρ.

Сезонные колебания влаги зависят также от структуры грунта. Воздухопроницаемые грунты, например сыпучие грунты с большим диаметром частиц, при длительном отсутствии дождя полностью высыхают. Наоборот, в глинистых грунтах влага хорошо удерживается.

На величину удельного сопротивления влияет также температура почвы. При нагревании почвы ее удельное сопротивление падает. Увеличение проводимости происходит вследствие растворения солей. При температуре 0° удельное сопротивление почвы вследствие замерзания влаги скачкообразно возрастает. Чем глубже расположен заземлитель, тем меньше колебания температуры почвы и, следовательно, тем ниже и стабильнее его сопротивление.

Вдоль трассы линий электропередачи встречаются самые разнообразные грунты, которые при проектировании заземляющих устройств удобно подразделить на несколько групп с общим для каждой группы средним значением удельного сопротивления. Эти группы указаны в табл. 20-3.

Таблица 20-3

Классификация грунтов по их удельному электросопротивлению

Группа	Удельное сопро- тивленяе, ом.м	Твп грунта
1 2 3 4 5	До 100 100—300 300—500 500—1 000 >1 000	Чернозем, глина, суглинки, торф Лёсс, супеси, глина с содержанием влаги до 40% Пески, пески с галькой Сухие пески, пески с галькой и валунами Степные пески при мощности пласта более 10 м и глубоком стоянии грунтовых вод; мягкие грунты при малой мощно- сти слоя (менее 1,5 м) на скальном основании

20-6. ИМПУЛЬСНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Сопротивление заземлителя при протекании импульсного тока $R_{\rm H}$ и сопротивление растеканию промышленной частоты R_{\sim} связаны соотношением

$$R_{\mu} = \alpha_{\mu} R_{\mu}, \qquad (20-6)$$

где а_н — так называемый коэффициент импульса заземлителя.

Особенностями тока молнии являются его большая амплитуда и кратковременность. Обе эти особенности оказывают влияние на величину коэффициента импульса.

При стекании с заземлителя тока плотностью δ в грунте возникает электрическое поле напряженностью $E_{\mu} = \delta \rho_{\mu}$ (рис. 20-9), где $\rho_{\mu} -$



Рис. 20-8. Снижение удельного сопротивления грунта в зависимости от напряженности электрического поля.

удельное сопротивление грунта при стекании импульсного тока. С увеличением в возрастает и напряженность поля E_{μ} . Установлено, что с ростом напряженности поля удельное сопротивление грунтов плавно падает, как это схематически показано на рис. 20-8. Этот эффект, по-видимому, связан с явлением нелинейной проводимости, свойственным всем полупроводникам, в том числе и грунтам. При дальнейшем возрастании плотности стекающего с заземлителя тока напряженность электрического поля вблизи заземлителя достигает пробивной напряженности грунта $E_{\rm mp} \approx 10 \div 12 \ \kappa s/cm$. Искрообра-

зование приводит к резкому снижению падения напряжения вблизи заземлителя, что эквивалентно резкому падению $\rho_{\rm H}$. В расчетах заземлителей обычно пренебрегают падением напряжения в искровом разряде, т. е. считают в искровой зоне $\rho_{\rm H}=0$. Однако в действительности градиенты в искровой зоне достигают при пробое 1,2—1,4 кв/см. При больших токах эти градиенты снижаются. Учитывать падение напряжения в искровой зоне следует при изучении передачи потенциала при разрядах <u>в</u> земле.

При дальнейшем повышении напряжения и с течением времени искровой разряд переходит в дуговой с очень малыми градиентами в дуговой зоне. Так как градиенты в грунте снижаются от максимальных вблизи электрода до исчезающе малых вдали от ввода тока, то при больших импульсах тока вблизи заземлителя возникают все указанные зоны: полупроводниковая, искровая и дуговая (рис. 20-9).

Снижение ρ_{μ} с ростом градиентов служит причиной снижения коэффициента импульса заземлителя α_{μ} . При заданном импульсном токе напряженность электрического поля в грунте $E_{\mu} = \delta \rho_{\mu}$ растет с ростом

его удельного сопротивления. Поэтому коэффициент импульса заземлителя ан ниже в плохо проводящих грунтах. Чем меньше линейные размеры заземлителя, тем при заданном токе I больше плотность стекающего тока 8. Поэтому коэффициент импульса α_и снижается с уменьшением размесосредоточенного Da зазем.тителя. Коэффициент импульса снижается также при возрастании тока І. Однако очевидно, что напряжение на заземлителе $U = IR_{\mu}$ все же растет с ростом ρ , R_{\sim} и I, хотя кривая этого роста резко нелинейна.

Падение ри вследствие искрообразования в грунте эквивалентно увеличению размеров заземли-

теля. Соответственно происходит как бы относительное сближение индивидуальных заземлителей в составной конструкции и снижение ее коэффициента использования. В импульсном режиме коэффициент использования составного заземлителя обозначается через пи. Значения пи для типовых конструкций приведены в табл. 2-20. Формула (20-5) в импульсном режиме приобретает вид:

$$R_{c.n} = \frac{1}{\eta_n \, \Sigma \frac{1}{R_n}}.$$
 (20-5a)

Импульсное искрообразование в грунте происходит с довольно большим запаздыванием. Вследствие этого импульсные коэффициенты заземлителей оказываются зависимыми от времени. Обычно коэффициенты импульса определяются для времен порядка 3—6 *мксек*, когда искровые процессы уже успевают полностью установиться. При малых же временах ($t < 1 \div 2$ *мксек*) импульсный коэффициен $\alpha_{\rm H}$ приближается к 1. Вольт-амперная характеристика дуги имеет петлевой характер. По мере роста тока на фронте волны $R_{\rm H}$ резко снижается. Минимум $R_{\rm M}$ примерно совпадает с максимумом тока (при пологом фронте волны). При спаде волны тока $R_{\rm R}$ незначительно возрастает.

Импульсный характер воздействия напряжения приводит к необходимости подразделять заземлители на сосредоточенные и протяженные. К первым принадлежат заземлители, протяженность которых достаточно мала, чтобы можно было считать потенциалы во всех точках 20—641



Рис. 20-9. Характер процессов в грунте при

прохождении через заземлитель больших

импульсных токов.

заземлителя одинаковыми. Протяженными называют заземлители, вдоль которых необходимо учитывать волновой процесс распространения напряжения и тока. Обычно это заземлители горизонтального типа. Каждый из лучей такого заземлителя может быть представлен цепочечной схемой замещения длинной линии с удельными индуктивностью L_0 и нелинейной проводимостью g_{0x} (рис. 20-10). В первые моменты приложения импульсной волны напряжение на дальних участках заземлителя мало. В эти моменты времени отвод тока с заземлителя осуществляется только на начальных его участках. Затем напряжение



Рыс. 20-10. Цепочечная схема замещения протяженного заземлителя.

вдоль заземлителя выравнивается и весь заземлитель используется для отвода тока. Использование чуча заземлителя в заданный момент времени может быть охарактеризовано отношением U_l/U_0 , где U_l и U_0 — напряжения в конце и начале луча. Чем ближе U_l/U_0 к единице, тем лучше использование заземлителя. Заземлители, у которых $U_l/U_0 \ll 1$, относятся к группе протяженных;

заземлители с отношением U_1/U_0 , близким к 1, — к группе сосредоточенных.

Так как отношение U_l/U_0 всегда растет с уменьшением длины луча заземлителя, то с точки зрения экономии металла выгоднее заземлитель выполнять трех- или четырехлучевым. При дальнейшем увеличении числа лучей снижается коэффициент использования заземлителя вследствие взаимного экранирования лучей, кроме того, осложняются земляные и монтажные работы. Длина лучей в заземлителе выбирается по условиям обеспечения необходимого R_u .

Как и сосредоточенные заземлители, протяженные заземлители характеризуются импульсным коэффициентом аи, который по-прежнему падает с увеличением тока и удельного сопротивления почвы. Однако вследствие резкого спада напряжения вдоль протяженного заземлителя большой длины коэффициент α_и может оказаться больше единицы. Такое недоиспользование длины является характерной особенностью протяженного заземлителя. Следует иметь в виду, что коэффициенты au протяженных заземлителей спадают с временем. Обычно ан измеряются на амплитуде волны тока с фронтом $t_{\phi p} = 3 \div 4$ мксек. Волны тока молнии могут иметь, однако, значительно более пологий фронт. При возрастании top коэффициент an протяженного заземлителя будет снижаться. Кроме того, ан снижается и на хвосте волны, в результате чего с ростом длины заземлителя будет снижаться и длина волны напряжения на заземлителе. По указанным причинам в плохо проводящих грунтах протяженные заземлители даже очень большой длины оказываются, как показал опыт, весьма эффективными.

20-7. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Определение импульсных коэффициентов заземлителей в натуре потребовало бы сооружения в полевых условиях генераторов импульсных токов (ГИТ) на десятки килоампер при напряжениях в сотни киловольт. Такие ГИТ были бы чрезвычайно дороги. Поэтому для исследования характеристик заземлителей широко применяются физические модели. Сопротивления R_{\sim} сложных заземлителей измеряют с помощью электролитической ванны. Для определения коэффициентов а используется моделирование заземлителя в натуральном грунте. На основе теории подобия А. В. Корсунцевым выведены два критерия подобия сосредоточенных заземлителей:

$$\pi_1 = \frac{R_{ns}}{\rho} = \text{const}; \ \pi_2 = \frac{i\rho}{s^3 E_{np}} = \text{const}, \tag{20-7}$$

где s — любой из линейных размеров заземлителя (l, d и пр.);

*Е*_{пр} — пробивное напряжение грунта.

Сохраняя E_{mp} и ρ оригинала, можно резко сократить *s* и *i* за счет увеличения R_{u} .

Протяженные заземлители обычно моделируются цепочкой сосредоточенных заземлителей (воспроизводящих утечки gon схемы по рис. 20-1), соединенных внешними катушками индуктивностей L.

20-8. ИМПУЛЬСНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ По опытным данным и выбор заземлителей

На основе проведенных на физических моделях исследований установлены зависимости импульсных коэффициентов единичных заземлителей от величины импульсного тока (на фронте волны) для различных грунтов. Эти зависимости представлены на рис. 20-11.

Расчет импульсного сопротивления заземлителя $R_{\rm m}$ ведется в следующем порядке:

a) по формулам табл. 20-1 определяются сопротивления единичных заземлителей (луч, контур, вертикальный заземлитель);

б) по заданному значению импульсного тока, отводимого всем заземлителем, рассчитывается ток *I*, приходящийся на каждый единичный заземлитель; расчет ведется в предположении, что ток распределяется обратно пропорционально R_{\sim} ;

в) по кривым на рис. 20-11 для заданных *I*, ρ и линейных размеров заземлителя находится импульсный коэффициент α_n единичных заземлителей;

г) по табл. 20-2 определяется коэффициент использования заземлителя п_и;

д) по формулам (20-5а) рассчитывается искомое значение R_{μ} составного заземлителя.

Пример 20-3. Требуется определить импульсное сопротивление двухлучевого заземлителя, прокладываемого в грунте, с удельным сопротивлением $\rho = 500 \text{ ом} \cdot \text{м}$. Длина лучей l = 20 м. Глубина заложения t = 0.8 м.

Материал заземлителя — полоса 4 × 40 мм². Расчетное значение тока молнии, отводимого заземлителем, 80 ка.

По формуле для горизонтального луча (табл. 20-1) определяем R_{\sim} луча равным 40 ом. Каждый луч отводит импульсный ток $I = \frac{80}{2} = 40$ ка. По рис. 20-11 находим

для l=20 м н $\rho=500$ ом м коэффициент импульса $\alpha_{\pi}=0,6$. Следовательно, импульсное сопротивление луча $R_{\pi 1}=40\cdot0,6=24$ ом. Коэффициент использования двухлучевого заземлителя равен 1 (табл. 20-2). Определяем импульсное сопротивление заземлителя:

$$R_{\rm m} = \frac{24}{1\cdot 2} = 12 \, om.$$

Пример 20-4. При той же общей длине полосы рассмотреть вариант четырехлучевого заземлителя.

В этом варианте длина луча l=10 м. Сопротивление R_{\perp} луча равно 70 ом. Каждъй луч отводит импульсный ток 80/4=20 ка. По рис. 20-11 находим $\alpha_{\rm H}=0,6$, а по 20*



табл. 20-2 а_ж=0,65. По формуле (20-5а) определяем импульсное сопротивление заземлителя:

$$R_{\rm m} = \frac{70 \cdot 0.6}{4} \frac{1}{0.65} = 16 \text{ om}.$$

Расчет показывает, что в данном случае применение четырехлучевого заземлителя неэффективно в основном вследствие низкого коэффициента использования. Увеличение числа лучей, однако, становится необходимым при возрастания длины лучей в плохо проводящих грунтах.

Пример 20-5. а) При той же общей длине полосы рассмотреть вариант кольцевого заземлителя.

Учитывая полеречные связи, выбираем диаметр кольца D=8 м. По формуле для кольцевого заземлителя (табл. 20-1) определяем R_{\perp} кольца равным 37 ом. По рис. 20-11 находим для I=80 ка $a_{\pi}=0,3$. Искомое сопротивление $R_{\pi}=11$ ом.

Кольцевой заземлитель в грунте p=500 ом м оказывается примерно равноценным двухлучевому. Однако прокладка кольцевого заземлителя более сложна

б) Кольцевой заземлитель предыдущего примера «усилен» забивкой четырех труб по периметру. Длина труб l=2 м, диаметр труб d=50 мм.

По данным измерения расчетное удельное сопротивление грунта для трубчатых заземлителей принимается равным 200 ом н.

Сопротивление одной трубы в грунте $\rho = 200 \text{ ом.м}$ равно $R_{\text{тр}} = 80 \text{ ом}$, а четырех труб 80/4 = 20 ом. Сопротивление кольца $R_{\text{к}} = 37 \text{ ом}$. Ток I = 80 ка распределяется пропорционально проводимостям кольца и труб. Приближенно находим $I_{\text{к}} = 25 \text{ ка}$, $I_{\text{тр}} = 55 \text{ ка}$. Импульсный коэффициент кольца при токе $I_{\text{к}} = 25 \text{ ка}$ равен $\alpha_{\text{s}} = 0.5 \text{ н}$ $R_{\text{к.s}} = 37 \cdot 0.5 = 18.5 \text{ ом}$. Импульсный коэффициент трубы длиной l = 2 м при $I = \frac{55}{4} \approx 15 \text{ ка}$ и $\rho = 200 \text{ ом.м}$ равен $\alpha_{\text{s}} = 0.55$ (рис. 20-11). Следовательно

$$R_{\text{тр. m}} = \frac{80}{4} \cdot 0,55 = 11$$
 ом.

Коэффициент использования заземлителя (кольцо с четырьмя трубами) определяется по табл. 20-2 равным

$$\eta_{\rm H} \approx 0.75 \left(\frac{D}{l} = 4 \right).$$

По формуле (20-5а) вычисляем искомое значение

$$R_{\mathbf{c}_{-\mathbf{H}}} = \frac{11 \cdot 18,5}{11 + 18,5} \cdot \frac{1}{0,75} = 9 \ om.$$

Трубы снизили импульсное сопротивление растекания на 20%. Это снижение произошло в основном за счет заложения труб в хорошо проводящем грунте. Нетрудно подсчитать, что заложение труб в грунте с $\rho = 500 \text{ ом} \cdot \text{м}$ не приведет к заметному снижению $R_{c.м}$.

Выбор типа заземлителя связан в основном с характеристиками почвы, в которой прокладываются заземлители. В очень хорошо проводящих грунтах ($\rho < 100 \ om \cdot cm$) для выполнения заземлителя с $R_{\mu} =$ = 10 ом достаточна забивка одной-двух труб или стержней. В грунтах с удельным сопротивлением до 500 ом · м импульсное сопротивление заземления порядка 10 ом обеспечивается устройством двухлучевого заземлителя с длиной луча до 20 м. Эффективность двухлучевого заземлителя в этих грунтах объясняется его максимальным коэффициентом использования $\eta_{\rm H} = 1$. В грунтах с удельным сопротивлением $\rho > 500 \ om \cdot m$ целесообразен переход к многолучевым или к контурным заземлителям.

Как уже указывалось, наименьшим импульсным коэффициентом обладают заземлители с минимальным расстоянием от места ввода тока до наиболее удаленных точек. С этой точки зрения целесообразно выполнять заземлитель в виде многолучевой звезды с малой длиной луча. Однако с увеличением числа лучей падает коэффициент использования nu, поэтому обычно число лучей ограничивается четырьмя. Контурные заземлители совмещают в себе достоинства сосредоточенных и протяженных заземлителей. Большой участок грунта, охватываемый заземлителем, что характерно для протяженных заземлителей, сочетается с малыми расстояниями от места ввода тока до наиболее удаленных частей заземлителя, что является преимуществом сосредоточенных заземлителей. Контурные заземлители обладают поэтому малыми $\alpha_{\rm F}$ при больших протяженностях, необходимых для снижения $R_{\rm u}$ в грунтах с высоким удельным сопротивлением.

20-9. ГЛУБИННЫЕ ЗАЗЕМЛИТЕЛИ

На тех участках, где сопротивление верхних слоев почвы велико (например, сухой песок) и грунтовые воды залегают на большой глубине, целесообразно применение глубинных вертикальных заземлителей (см. табл. 20-1). Забивка заземлителей на глубину до нескольких десятков метров, до слоя грунтовых вод, осуществляется с помощью специальных станков вибрационным способом или ввинчиванием. Вследствие большой длины глубинные заземлители относятся к группе протяженных. На импульсном токе вследствие высоких напряженностей поля и интенсивного искрообразования в начале заземлителя импульсная проводимость создается и теми частями заземлителя, которые расположены в верхних плохо проводящих слоях грунта. Тем не менее вследствие удаленности участка заземлителя с наименьшим сопротивлением растеканию коэффициент импульса глубинного заземлителя может оказаться существенно выше единицы.

20-10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ Естественных заземлителей

Современные железобетонные фундаменты для металлических опор линий электропередачи выполняются из сборных конструкций или свай (рис. 20-12). Арматурные каркасы железобетонных фундаментов выполняются в виде сетки из стальных стержней. Толщина наружного слоя бетона обычно не превышает 30—35 мм. Измерения показали, что в грунтах высокой и средней влажности (1-й и 2-й групп по табл. 20-3) наружный бетонный слой обладает высокой проводимостью, что позволяет использовать железобетонные фундаменты опор в качестве естественных заземлителей. Сопротивления заземления и коэффициенты использования железобетонных фундаментов опор приведены в табл. 20-4.

В отношении стекания импульсных токов железобетонные фундаменты ведут себя, как обычные сосредоточенные заземлители. Их импульсные сопротивления заземления в зависимости от тока приведены на рис. 20-13. Снижение $R_{\rm II}$ с ростом тока обусловлено теми же причинами, что и у других типов сосредоточенных заземлителей. Опыты показали, что критическая плотность импульсного тока, достаточная для местного разрушения бетонной прослойки между каркасом и внешней поверхностью, составляет 17,5 a/cm^2 . Между тем при токах в опоре, доходящих до 250 ка, плотность тока, стекающего с арматурного каркаса, не будет превышать 5 a/cm^2 (при равномерном стекании тока со всей поверхности). Следовательно, опасность разрушения бетонной прослойки токами молнии отсутствует.

В грунтах 1-й группы (табл. 20-3) естественные заземлители железобетонных фундаментов обеспечивают требуемую нормами величину



Рис. 20-12. Железобетонные фундаменты металлических опор ВЛ. *а* — арматурный каркас сван: б — арматурный каркае грибовидного подножника.

Таблица 20-4

Расчетные формулы определения R₂ и R₄ железобетонных фундаментов опор

Навменование заземлителя	Эскиз заземлителя	Расчетные формулы для определения <i>R</i> , ом	Примечания
Свайный фундамент		$R_{\sim} = \frac{1,25\cdot 1,4\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	1,25 — коэффициент, учитывающий неодно- родность грунта и бе- тона
Грибовид- ный поднож- ник		$R_{nn} = \frac{1,25 \cdot 1,4\rho}{2D_{\bullet}}$ $R_{cr} = \frac{1,25 \cdot 1,4\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$ $R_{\bullet} = \frac{R_{nn}R_{cr}}{R_{nn} + R_{cr}} \frac{1}{0,9}$	1,4 — коэффициент, учитывающий различие сопротивлений сплош- ной металлической по- верхности и арматур- ного каркаса

Продолжение табл. 20-4

Коэффициенты использования для железобетонных фундаментов опор

	_				Коэффициенты использования				
Типы опор	Схема расположения фундаментов						י~ן	⁷ i∎	
Одностоечная			₿	₿			0,6	0.4	
одностосчная	Į		₿	₿					
	₿	₽			₿	₿			
Портальная	₿	₿			₽	⊕	0,9	0,8	

сопротивления заземления опор линий электропередачи. В грунтах 2-й группы обычно необходима закладка дополнительных искусственных заземлителей. Для этой цели следует применять углубленные заземлители, которые представляют собой замкнутые контуры, укладываемые на дно котлована до установки подножников.





Вопросы и задачи для самопроверки

1. Объясните, почему защитная зона двойного стержневого молниеотвода при $s \ll 7h_a$ больше защитной зоны двух одиночных молниеотводов той же высоты.

2. Требуется защитить подстанцию площадью 60×80 м четырымя стержневыми молниеотводами, устанавливаемыми на конструкциях подстанции ($h_x = 12$ м). Расставьте молниеотводы.

3. Определить вероятность прорыва молнии через тросовую защиту линии с высотой опор 45 м и α = 35°.

4. Какое влияние на коэффициент импульса заземлителя α_π оказывают амплитуда тока, удельное сопротивление грунта, длина протяженного заземлителя? Объясните это влияние.

5. Определите импульсное сопротивление квадратного заземляющего контура со стороной A=B=5 м с трубами длиной l=3 м, забитыми по углам контура. Глубина укладки контура t=1 м. Импульсный ток l=100 ка, удельное сопротивление грунта $\rho=500$ ом \cdot см.

РАЗРЯДНИКИ

21-1. НАЗНАЧЕНИЕ РАЗРЯДНИКОВ

Разрядник является аппаратом, включаемым между фазой электропередачи и землей для ограничения атмосферных или коммутационных перенапряжений, воздействующих на изоляцию подстанций и линий. В настоящей главе рассматриваются разрядники, предназначенные для ограничения только атмосферных перенапряжений. Разрядники, специально предназначенные для ограничения коммутационных перенапряжений, рассматриваются в гл. 26.

Непременным элементом разрядника является искровой промежуток, отделяющий рабочий провод от заземления. Приходящая волна высокой амплитуды вызывает срабатывание искрового промежутка, который срезает волну перенапряжения. В функцию разрядника входит не только ограничение амплитуды перенапряжения, но и гашение дуги сопровождающего тока промышленной частоты, проходящего через искровой промежуток вслед за импульсным пробоем. Разрядники с гашением сопровождающего тока подразделяются на вентильные и трубчатые. Кроме того, иногда взамен разрядников применяются защитные искровые промежутки без дугогашения сопровождающего тока.

А. Вентильные разрядники

21-2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Вентильные разрядники (PB) предназначаются для защиты подстанционной изоляции. Как было показано в гл. 15, уровни изоляции трансформаторов и аппаратов устанавливаются в соответствии с за-



Рис. 21-1. Принцип действия вентильного разрядника и вольт-амперная характеристика его рабочего сопротивления (диаметр дисков разрядника d=130 мм). I_{π} в килоамперах (ка).

щитными характеристиками вентильных разрядников. В силу этого защитные свойства разрядников оказывают непосредственное влияние на стоимость высоковольтного оборудования. Советская электропро-

Основными элементами вентильного разрядника являются искровой промежуток ИП и рабочее сопротивление РС (рис. 21-1). Искровой промежуток срезает волну опасного перенапряжения. Протекающий вслед за пробоем искрового промежутка (при напряжении $U_{\rm mp}$) импульсный ток, достигающий 5—10 ка, создает на рабочем сопротивлении подъем напряжения $U_{\rm oct}$. Это напряжение, воздействующее на изоляцию, должно быть на 20-25% ниже импульсной прочности изоляции с учетом возможного перепада напряжения между РВ и изоляцией на ошиновке подстанции. С другой стороны, рабочее сопротивление должно в достаточной степени ограничивать текущий после прохода волны перенапряжения сопровождающий ток промышленной частоты, с тем чтобы искровой промежуток РВ надежно гасил этот ток. Обоим условиям удовлетворяет сопротивление с резко нелинейной характеристикой, в логарифмическом масштабе показанной на рис. 21-1. При такой характеристике проходящий через РС импульсный ток Ін приводит к относительно невысокому импульсному напряжению Uoct (квмакс). В то же время при напряжении рабочей частоты на разряднике, которое обозначается через Uram (коденст), сопровождающий ток ограничивается до малой величины I_{гаш} порядка 100—300 а.

21-3. ОСНОВНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Напряжение рабочей частоты на разряднике в момент гашения сопровождающего тока U_{гаш} является исходной характеристикой, задаваемой электрической сетью. Это напряжение принимается равным

$$U_{\rm ram} = k_3 U_{\Phi}, \tag{21-1}$$

где U_{Φ} — наибольшее рабочее фазное напряжение, $\kappa_{B_{\rm действ}}$, а k_3 — коэффициент сети, величина которого зависит от эффективности заземления нейтрали сети и для систем с глухозаземленной нейтралью принимается равным ~1,4, а для систем с изолированной нейтралью равным 1,1 $\sqrt{3} \approx 1,9$. Подробнее вопрос о выборе этого коэффициента будет освещен в § 21-7.

Защитные коэффициенты разрядника указываются по отношению к напряжению U_{гаш}. Дугогасящее действие искрового промежутка PB характеризуется коэффициентом гашения k_{гаш}, равным

$$k_{\rm ram} = \frac{U_{\rm np}}{\sqrt[4]{2} U_{\rm ram}},\tag{21-2}$$

где $U_{\rm пр}$ — пробивное напряжение промежутка на рабочей частоте. Коэффициент импульса промежутка с равномерным полем примерно равен единице и, следовательно, $k_{\rm ram}$ является также защитным коэффициентом промежутка.

Защитное действие рабочего сопротивления РВ характеризуется защитным коэффициентом k_{защ}, равным

$$k_{\text{sam}} = \frac{U_{\text{oct}}}{\sqrt{2} U_{\text{ram}}}, \qquad (21-3)$$

где $U_{\text{ост}}$ — остаточное напряжение на рабочем сопротивлении при прохождении импульсного тока 10 ка.

Как следует из U—I характеристики рабочего сопротивления, приведенной на рис. 21-1, увеличение нелинейности рабочего сопротивления уменьшает остающееся напряжение U_{oct} , снижая коэффициент k_{3am} . Є другой стороны, чем больший ток I_{ram} допустим для разрядника, тем меньше U_{oct} при неизменной вольт-амперной характеристике сопротивления. Таким образом, величина коэффициента k_{3am} определяется не только свойствами рабочего сопротивления, но и конструкцией искрового промежутка, от которой зависит допустимый сопровождающий ток I_{ram} .

В практически выполненных конструкциях разрядника коэффициенты k_{3am} и k_{ram} близки друг к другу, но обычно $k_{3am} > k_{ram}$ и, следовательно k_{3am} определяет защитное действие разрядника.

21-4. НЕЛИНЕЙНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЯДНИКОВ

В грозозащитных разрядниках применяются нелинейные сопротивления из материала «вилит».

Тело вилитовых сопротивлений состоит из зерен электротехнического карборунда SiC, скрепленных керамической массой, которая носит название связки. В качестве связки для визита используется жидкое стекло. Отдельные зерна карборунда соприкасаются между собой; площадь соприкосновения не превышает десятой части поверхности зерна.

Многочисленные исследования показали, что зерна карборунда обладают резко выраженной нелинейной характеристикой. Это явление объясняется тем, что на поверхности зерна имеется запорный слой, который образуется в результате проникновения молекул окиси кремния в зерно карборунда. Этот слой имеет толщину порядка 10^{-5} см. При небольшом напряжении, приложенном к кристаллу, удельное сопротивление пленки достигает 10^{6} — 10^{8} ом · см. В то же время удельное сопротивление самого зерна карборунда невелико — около 1 ом · см. Поэтому все напряжение ложится на запорный слой.

На рис. 21-2 представлена схема замещення карборундового контакта. В этой схеме C_{κ} учитывает емкостный эффект запорных слоев, g_{κ} — активную нелинейную проводимость переходного контакта, g_1 и g_2 — активные проводимости кристаллов и $g_{\rm II}$ — утечку, вызванную газовым разрядом в контакте. Роль C_{κ} и g_1 , g_2 невелика, основное значение имеют проводимости g_{κ} и $g_{\rm H}$. Запорный слой на поверхности кристалла образует потенциальный барьер для электронов. С ростом напряженности поля нелинейно возрастает вероятность перехода электронов через этот барьер, что в схеме замещения н выражено в форме нелинейной проводимости g_{κ} . Проводимость $g_{\rm II}$ может проявиться только при высоких напряженностях поля, достаточных для воз-



Рис. 21-2. Физическая схема (а) и схема замещения (б) карборундового контакта. 1 — зерно карборунда: 2 — запорный слой; 3 контакт зерен.

никновения газового разряда в микроскопических порах между зернами. С появлением g_{n} должны возникать следующие эффекты: 1) в ходе вольт-амперной U-I характеристики возникает резкий перелом; 2) при больших токах возникает гистерезисная петля, аналогичная петлевой форме газового разряда; 3) U-I характеристика нелинейного сопротивления оказывается зависимой от формы волны, в частности должно наблюдаться явление запаздывания, т. е. повышение остаточного напряжения с уменьшением длины фронта волны.

Рабочие сопротивления вилитовых разрядников выполняются обычно в форме дисков из карборундовых порошков со связкой из органического стекла. В вилитовых дисках наблюдаются все вышеуказанные явления, связанные с появлением нелинейной проводимости. Вольт-амперные характеристики вилитовых дисков в логарифмическом масштабе в диапазоне токов 1—10 000 а выражаются двумя отрезками прямых (см. рис. 21-1). Для каждого отрезка действительна аналитическая зависимость вида

$$\lg U = A + \alpha \lg I, \tag{21-4}$$

где A — константа, а α — так называемый коэффициент вентильности диска. Чем меньше α , тем в меньшей степени растет U с повышением тока I.

В области высоких токов грозового происхождения действует второй участок характеристики, для которого коэффициент нелинейности α составляет 0,13—0,15. Заметим, что меньшим α соответствуют и меньшие значения пропускной способности дисков, что препятствует применению дисков с минимальными значениями α.

Расчеты и измерения показывают, что импульсные токи в разрядниках могут в редких случаях достигать 5—10 ка (см. гл. 23). Соответственно в вилитовых разрядниках типа РВС и РВМГ нормируется в качестве верхнего предела импульсный ток $I_n = 10$ ка.

Пропускная способность карборундовых сопротивлений, в том числе вилитовых, ограничивается разрушением дисков при больших токах. Это разрушение имеет тепловой характер, а потому предельный ток зависит от его амплитуды, длительности и числа импульсов. Пропускная способность вилитовых дисков диаметром 100—130 мм превышает 10 ка, однако число импульсов ограничено.

Как следует из опыта эксплуатации, подстанционные разрядники срабатывают относительно редко. На подстанциях 35—110 кв примерно 50% фаз PB срабатывает 1 раз в 2 года, 20% фаз — 1 раз в год и менее 5% фаз — 2 раза в год. Срабатывание разрядников в распределительных сетях происходит примерно в 3 раза чаще. В расчете на относительно редкие срабатывания при максимальных зарегистрированных импульсных токах рабочие сопротивления PB испытываются 20 предельными импульсами тока (10 ка), что уже дает запас в эксплуатации.

С возрастанием длительности амплитуда разрушающего импульса $I_{\text{разр}}$ резко убывает. При временах порядка миллисекунд $I_{\text{разр}}$ снижается до сотен ампер. В связи с этим рабочие сопротивления разрядников РВС и РВМГ испытываются также волной длительностью 2 000 *мксек* с током 150 *а* — для РВС, и 400 *а* — для РВМГ. Малые и длительные токи в РВ могут возникать в стадии «послесвечения» главного разряда молнии. Это, однако, относится только к разрядникам распределительных сетей, не имеющих тросовой защиты на подходах к подстанциям.

Малые и длительные токи могут также протекать при срабатывании PB от внутренних перенапряжений, в частности при отключении ненагруженных трансформаторов и коротких линий. Таким образом, хотя грозозащитные вентильные разрядники не рассчитаны специально на ограничение коммутационных перенапряжений, они успешно ограничивают перенапряжения при некоторых видах коммутаций, характеризующихся малой запасенной энергией. Эта способность практически используется для ограничения перенапряжений, вызываемых отключением холостых трансформаторов CBH, так как запасенная в них энергия магнитного поля невелика, а на выводах по требованиям грозозащиты обычно подключены вентильные разрядники.

После прохождения волны перенапряжения разрядник оказывается приключенным к рабочему напряжению провода. Снижение напряжения приводит к резкому возрастанию сопротивления и ограничению тока промышленной частоты I_{ram} , проходящего через разрядник. Для разрядников типа РВС номинальный ток гашения составляет 100 $a_{\text{макс}}$, а для разрядников типа РВМГ — 300 $a_{\text{макс}}$. Эти значения установлены из условия успешного гашения дуги сопровождающего тока искровыми промежутками вентильных разрядников. Ток 100—300 a вилитовые диски диаметром 100—130 *мм* выдерживают в течение одного-двух полупериодов промышленной частоты.

21-5. ИСКРОВЫЕ ПРОМЕЖУТКИ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

К искровым промежуткам вентильных разрядников предъявляются требования: a) обладать пологой вольт-секундной характеристикой; б) гасить дугу сопровождающего тока при первом прохождении тока через нулевое значение. Первое требование определяется условиями защиты внутренней изоляции трансформаторов, а также всей подстанционной изоляции, разбросанной на значительной территории. Требова-

ниям пп. «а» и «б» удовлетворяют многократные искровые промежутки, применяемые в вентильных разрядниках.

Искровые промежутки разрядников РВС. На рис. 21-3 изображен единичный искровой промежуток разрядников типа РВС. Разрядный промежуток образуется двумя латунными штампованными шайбами, разделенными миканитовой прокладкой толщиной 0,5-1,0 мм. Электрическое поле между электродами близко к равномерному. При приложении импульсного напряжения на грани контактов латунных электродов с миканитовой прокладкой вознисвечение, активизирующее межэлектродное кает пространство. Равномерное поле и подсвечивание являются необходимыми и достаточными условиями для пологой формы вольт-секундной характеристики промежутка. Коэффициент импульса единичного промежутка примерно равен 1.

Гашение искровым промежутком сопровождающего тока промышленной частоты происходит при первом прохождении током нулевого значения. Гашение дуги наступает, если кривая восстанавливающейся прочности промежутка располагается выше кривой восстанавливающегося напряжения. Ток, проходящий через промежуток, ограничен до 100 а активным сопротивлением разрядника. При малой величине индуктивности сети ток в разряднике находится в фазе с рабочим напряжением и восста-



Рис. 21-3. Единичный искровой промежуток вентильного разрядника РВС.



Рис. 21-4. Структура короткой дуги в искровом промежутке разрядника РВС, стрелками показан тепловой поток. 1 – электроды; 2 – канал дуги.

навливающееся напряжение на промежутке следует синусоидальному напряжению промышленной частоты.

Дуговой канал в единичном промежутке имеет структуру, характерную для так называемой «короткой» дуги с холодными электродами. В период горения дуга между электродами представляет плазменС начального момента нулевой паузы электроны плазменного канала уходят на анод и рост $u_{np}(t)$ в основном определяется снижением температуры T и повышением плотности газа δ . Теплоотдача в основ-



Рис. 21-5. Рост диэлектрической прочности единичного искрового промежутка разрядника PBC.

1-- зона пробивных напряжений искрового промежутка; 2- зона восстанавливающейся прочности искрового промежутка; 3- кривая восстанавливающегося напряжения на искровом промежутке. ном происходит по направлению к «холодным» электродам (т. е. электродам без термоэмиссии с катода). Пробивное напряжение нарастает с повышением плотности газа согласно формуле самостоятельного разряда (4-12).

Кривая восстанавливающейся прочности $u_{np}(t)$ единичного искрового промежутка изображена на рис. 21-5. На том же рисунке построена синусоидальная кривая восстанавливающегося напряжения при коэффициенте гашения k_r≈2,0. Как видно, кривая прочности располагается выше кривой напряжения, что и необходимо для гашения дуги. В кривой $u_{\rm mp}(t)$ можно наметить три участка. В начальные моменты времени возникает скачок ипр вследствие быстрого охлаждения узкого слоя газа вблизи электродов (в большей степени у катода). В даль-

нейшем происходит более медленный подъем u_{np} , связанный с охлаждением основной части газового канала. И, наконец, весьма медленный подъем u_{np} связан с медленным охлаждением всего промежутка с электродами.

Если бы катод нагрелся дугой до температуры, при которой оказалась бы возможной термическая эмиссия электронов с катода, то скорость восстановления электрической прочности промежутка резко снизилась бы и промежуток не погасил бы дугу. За время горения дуги в течение одного полупериода ток 100 a не может вызвать повышения температуры латунных электродов, достаточной для поддержания термической эмиссии; это обстоятельство и ведет к быстрому росту восстанавливающейся прочности. Достаточно, однако, прохождения тока, существенно большего 100 a, в течение полупериода или тока до 100 aв течение нескольких полупериодов, как возникает термическая эмиссия с электродов и промежутки не справляются с гашением дуги сопровождающего тока.

Искровые промежутки разрядников РВМГ. Гашение сопровождающего тока искровыми промежутками разрядников РВС (рис. 21-3) основано на естественном восстановлении электрической прочности промежутка между холодными электродами. Уже давно возникла мысль интенсифицировать процесс гашения дуги в искровых промежутках, что позволило бы повысить защитное действие разрядников. За последние годы в ряде стран велась разработка и начато производство разрядников с искровыми промежутками с магнитным дутьем.

Принципиальная схема магнитного искрового промежутка с вращающейся дугой представлена на рис. 21-6. Искровой разряд и дуга сопровождающего тока образуются в щели между двумя кольцеобразными электродами. Магнитное поле, создаваемое сопровождающим током в катушках или постоянными магнитами, перемещает дуговой канал по касательной к дуговой щели. В результате дуговой канал начинает с большой скоростью вращаться в щели. Это ведет к интенсивному охлаждению дугового канала. Перемещение дугового канала препятствует возникновению катодного пятна, электроды остаются холодными даже при больших токах Ігаш и при каждом переходе сопровождающего тока через нулевое значение вновь возникает скачок восстанавливающейся прочности.

Испытания показали, что промежутки с вращающейся дугой обладают высокой скоростью восстанавливающейся электрической прочности и термической устойчивостью к прохождению больших токов. Такие промежутки приняты в разрядниках типа РВМГ (магнитного гашения), выпу-



скаемых с 1960 г.



Рис. 21-7. Единичный искровой промежуток вентильного разрядника РВМГ.



Рис. 21-6. Схема искровых промежутков с вращающейся дугой.

Промышленная конструкция РВМГ промежутка разрядника показана на рис. 21-7. Промежуток имеет пробивное напряжение 3-4 кв. Подсвечивание межэлектродного пространства осуществляется, как и обычно, в месте контакта диэлектрической прокладки с электродами. Промежуток надежно гасит сопровождающие токи до нескольких тысяч ампер. Однако подобные токи, проходящие в течение полупериода, превышают пропускную способность вилитовых дисков, и по этой причине сопровождающий ток в разрядниках РВМГ ограничивается до 300 а.

Кривая восстанавливающейпрочности промежутка конся струкции, приведенной на рис. 21-7, дается на рис. 21-8. Нагрузка создавалась импульсами и сопровождающим током 300 а. Восстанавливающаяся прочность промежутка $u_{\rm mo}(t)$ быстро нарастает и при 5 мсек достигает 90% пробивного напряжения. На рисунке нанесена кривая синусоидального восстанавливающегося напряжения $u_{\rm B}(t)$, соответствующая $k_{\rm ram}=2,0$. Как видно из сравнения кривых $u_{\rm B}$ и $u_{\rm mp}$, имеется возможность дальнейшего снижения коэффициента $k_{\rm ram}$. Там же для сравнения показана кривая $u_{\rm mp}$ для промежутка, приведенного на рис. 21-3, при тех же условиях испытания. Такой промежуток, очевидно, не смог бы погасить дугу.



Рис. 21-8. Восстанавливающаяся электрическая прочность единичного искрового промежутка при сопровождающем токе $I_{\text{гаm}} = 300 \ a.$

1 — промежуток разрядника РВМГ с вращающейся дугой; 2 — промежуток разрядника РВС с неподвижной дугой; 3 — восстанавливающееся напряжение при k_{гаш}=2.

Повышение токов гашения в разрядниках РВМГ позволило понизить защитный коэффициент k_{3am} этих разрядников до 2,0—2,1, что обеспечило их более эффективное защитное действие по сравнению с действием разрядников РВС.

Единичные искровые промежутки в вентильных разрядниках всех типов образуют длинную емкостную цепочку, распределение напряже-





ния по которой из-за частичных емкостей на землю и на провод неравномерно. Равномерное участие всех единичных искровых промежутков в процессах пробоя и гашения обеспечивается шунтированием их активными нелинейными карборундовыми сопротивлениями. В разряднике напряжением 110 кв и выше для выравнивания распределения напряжения дополнительно применяются экранирующие кольца. Тем не менее в разрядниках на высшие напряжения при малых предразряд-

ных временах возникает существенная неравномерность распределения напряжения по единичным промежуткам, снижающая коэффициент импульса k_r . В результате при $t_p < 8 \div 12$ мксек вольт-секундная характеристика РВ снижается на 15—25%, как это показано на рис. 21-9. Указанное снижение обычно благоприятно влияет на эффективность грозозащиты подстанций.

21-6. КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Разрядники на напряжения 3—35 кв выполняются в виде одного элемента. Разрядники на напряжения 110 кв и выше составляются из нескольких элементов. Каждый элемент содержит искровые промежутки и блоки вилитовых дисков — рабочее сопротивление. Группа из единичных промежутков, помещенная в фарфоровый чехол, образует стандартный комплект промежутков. Каждый такой комплект снабжен шунтирующим сопротивлением.

Рабочие сопротивления разрядников состоят из блоков вилитовых дисков. Диски связываются в блоки с помощью керамической обмазки. Контакт между блоками осуществляется через металлизированные торцовые поверхности дисков.

Вилит невлагостоек, и во влажной атмосфере происходит ухудшение его характеристик; поэтому конструкции с вилитовыми сопротивлениями должны быть герметизированы. Герметичность необходима также для стабильности характеристик искровых промежутков и шунтирующих сопротивлений. Герметичность фарфорового чехла, в котором размещаются рабочие сопротивления и искровые элементы, обеспечивается тщательным уплотнением крышек чехла.

Разрядники типа PBC. Серия разрядников PBC состоит из шести единиц, отвечающих номинальным напряжениям 15, 20, 33, 35 и 60 кв. Из различных комбинаций этих элементов собираются разрядники для всех классов напряжений. Электрические характеристики разрядников серии PBC приведены в табл. 21-1. Разрядники имеют коэффициент гашения $k_{\text{гаш}} \approx 1,9 \div 2,6$ и защитный коэффициент $k_{\text{защ}} = 2,5 \div 2,6$.

Таблица 21-1

напряжение ка	Комплектова- вие разряд-	рабочее напря- кадейств	допустимо с на разряднике,	Проба напря разря прв (в су состоя под до	нвное женве днака 50 ец ухом янви и ждем),	Импул проби напря: разряд (при т разря време: 15	пьсное ивное женне цника пред- дном ни от	Ост разр токе 10	гающе ядник с для <i>жксе</i>	еся нап а при им ной фро к, ка (не	ряжен ипулыс нта во сболе	ине :ном оляы е)
инальное ядника, 1	ника	большее Ис сети, I	большее ижение т ейста	квде	йств	20 MK K	сек), в	3 000	a	5 000	a	10 000 a
Hom Pag		Наи жен	Нан напр кед	менее	не более	РВС	РВП	PBC	рвп	PBC	рвп	PBC
3 6 10 15 20 35	Из одного элемента	3,5 6,9 11,5 17,5 23 40,5	3,8 7,6 12,7 19 25 40,5	9 16 26 38 49 78	11 19 30,5 48 60,5 98	 70 85 125	21 35 50 	13,5 25 42 57 75 122	15 28 47 	14,5 27 45 61 80 130	16 30 50 	16 30 50 67 88 143
110 150	$3 \times PBC-33$ $3 \times PBC-33+$	126 172	100 138	200 275	250 345	285 375		315 435	=	335 465	=	367 510
2 20	6×PBC-33	252	200	400	500	530	-	630		670	-	734

Электрические характеристики разрядников РВС и РВП

Разрядники серии РВМ и РВМГ. Магнитно-вентильные грозозащитные разрядники маркируются до напряжения 35 кв как РВМ, на напряжение 110 кв и выше — как РВМГ. Разрядники РВМ используются в основном для грозозащиты вращающихся машин (см. гл. 24). Разрядники на напряжения 3—20 кв изготовляются в виде единичных элементов, на напряжения 35 кв и выше комплектуются из нескольких элементов (рис. 21-10, a). В разрядниках РВМГ на номинальные напряжения 330—750 кв для сокращения высоты разрядника элементы подвешены по винтовой линии на трех колонках опорно-стержневых изо-21—641

Таблица 21-2

35 KB

. . . .

Электрические	характе	ристики	разрядников	BRW	И	PRWL
---------------	---------	---------	-------------	------------	---	------

Номиналь- ное напря- жение раз- рядника.	Нанболь- шее допу- стимое на- пряжение на разряд-	Пробивно жение ра при часто ^{кв} деі	е напря- зрядника те 50 гц. йств	Импульсное про- бивное напряже- ние разрядника (при предразряд- ном времени от 2	Остающееся при импу фронта вол	я напряжение ильсном токе с ны 10 <i>мксек</i> , к	разрядника длиной в (не более)
K 8	нике, <i>Кв</i> дейст,в	не менее	не более	до 10 <i>мксек), кв</i> (не более)	3 000 a	5 000 a	10(0) a
3	3.8	7,5	9,5	8	9	9,5	11
6	7,6	15	18	15,5	17	18	20
10	12,7	25	30	25,5	28	30	33
15	19	35	43	57	47	51	57
20	25	47	56	74	62	67	74
35	40.5	75	90	116	97	105	116
110	100	170	195	265	245	265	295
150	138	230	265	370	340	370	410
220	200	340	390	515	475	515	570
330	290	485	560	740	680	740	820
500	420	660	760	1 1 3 0	985	1 070	1 1 80

ляторов (рис. 21-10,б). Разрядники такой конструкции занимают большую площадь и имеют значительную собственную индуктивность (по пути протекания разрядного тока), что неблагоприятно сказывается на защите подстанций. Более совершенны колонковые типы PB, в которых





Рис. 21-10. Внешний вид вентильных *а* – на напряжения 3-220 кв;

элементы — искровые промежутки и рабочие сопротивления — расположены зигзагом в одной фарфоровой рубашке большого диаметра. Такие РВ компактны, имеют существенно меньший вес и малую индуктивность. На рис. 22-10,6 приведена колонковая конструкция разрядника 750 кв.

Отечественная промышленность переходит на изготовление разрядников СВН такого типа.

Электрические характеристики разрядников серии РВМ и РВМГ приведены в табл. 21-2. Разрядники имеют коэффициент гашения $k_{ram} = 1,85 \div 1,9$ и защитный коэффициент $k_{sam} = 2,0 \div 2,1.$

Облегченные вентильные разрядники серии РВП. Для подстанций 3—10 кв выпускаются облегченные разрядники серии РВП подвесного типа. Эти разрядники имеют рабочие сопротивления, составленные из вилитовых дисков диаметром 55 мм. Искровые промежутки имеют ту же конструкцию, что и в разрядниках РВС. Разрядники РВП не имеют шунтирующих сопротивлений. Распределение напряжения по единичным промежуткам управляется их собственными





разрядников с магнитным гашением. 6 — на напряження 500—750 кв.

емкостями. Электрические характеристики разрядников серии РВП приведены в табл. 21-1.

Некоторые фирмы снабжают элементы разрядников предохранительными мембранами, которые разрываются при повышении давления внутри разрядника в результате нарушения его нормальной работы и резкого повышения температуры внутри фарфорового чехла. Тем самым предотвращается взрыв разрядника. Взрывы разрядников, при которых разлетающиеся осколки повреждали соседнее оборудование и представляли опасность для обслуживающего персонала, неоднократно наблюдались в эксплуатации. Поэтому описанное приспособление следует считать весьма рациональным.

21-7. СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДНИКОВ С РАБОЧИМ Напряжением сети

Приведенные в § 21-3 соотношения (21-2) и (21-3) показывают, что при заданных $k_{\rm гаш}$ и $k_{\rm защ}$ разрядник может иметь тем лучшие защитные характеристики, чем ниже напряжение $U_{\rm гаш}$. Это напряжение берут выше номинального фазного напряжения, учитывая возможные повышения напряжения, главным образом при несимметричных коротких замыканиях с землей. Несимметричное короткое замыкание и работа разрядника на здоровой фазе могут быть следствием одного грозового поражения, поэтому вероятность такого совпадения достаточно велика.

В сетях с изолированной и резонансно заземленной нейтралью однофазное замыкание на землю ведет к повышению напряжения на здоровых фазах до линейного. Учитывая возможность резонансного повышения напряжения в некоторых точках сети над напряжением симметричного режима, наибольшее допустимое напряжение у разрядников принимается $(1,0 \div 1,1)\sqrt{3}$ U_{Φ} . Изолированная (или резонансно заземленная) нейтраль применяется в основном в сетях напряжением до



Рис. 21-11. Кривые коэффициентов заземления нейтрали сети для разных x₀/x₁ и r₀/x₁.

35 кв. Как исключение указаны разрядники для сетей 110 кв с изолированной нейтралью.

В сетях с эффективно заземленной нейтралью напряжение на здоровой фазе в момент однополюсного короткого замыкания определяется величиной сопротивления заземления в месте короткого замыкания и отношением реактивных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей для точки сети, в которой установлен разрядник. Как известно, реактивное сопротивление нулевой последовательности резко снижается при заземлении нейтралей трансформаторов. Поэтому на подстанциях, где такое заземление выполнено, напряжение на здоровых фазах в момент короткого замыкания не будет существенно превышать U_ф Однако по условиям релейной защиты, а иногда и в целях ограничения токов однополюсного

короткого замыкания на некоторых подстанциях применяется частичное или полное разземление нейтралей установленных трансформаторов.

Отношение максимального напряжения на здоровой фазе при однополюсном коротком замыкании к наибольшему рабочему фазному напряжению U/U_{ϕ} , характеризующее степень заземления нейтрали систе-
мы, называется коэффициентом заземления нейтрали сети k_3 . На рис. 21-11 приведены значения k_3 в координатах r_0/x_1 , x_0/x_1 , где r_0 , x_0 — активное и реактивное сопротивления сети по пути тока нулевой, а x_1 — реактивное сопротивление сети по пути тока прямой последовательности, вычисленные из точки установки PB.

Разрядники серий РВС и РВМГ, предназначенные для систем с эффективно заземленной нейтралью, допускают напряжения $U_{\rm ram}$, равные примерно 1,4 U_{ϕ} , т. е. 0,8 наибольшего рабочего (линейного) напряжения сети. Поэтому такие разрядники иногда называют 80%-ными. В большинстве случаев возможные повышения напряжения рабочей частоты на подстанциях оказываются меньше 1,4 U_{ϕ} . Исключения могут составлять переключательные пункты, не имеющие трансформаторов с заземленной нейтралью, и удаленные подстанции с маломощными трансформаторами. На таких подстанциях необходима проверка отношения r_0/x_1 , x_0/x_1 и значения $U_{\rm ram}$ при однофазном коротком замыкании.

Пример 21-1. Концевая подстанция 110 кв питается от системы практически бесконечной мощности по одноцепной линии. На подстанции установлен трансформатор с незаземленной нейтралью. Определить напряжение U_{гаш} при однофазном коротком замыкании и допустимость установки разрядника PBC-110 или PBMГ-110.

При указанных выше условиях отношения реактивных и активных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей на шинах концевой подстанции определяются только самой линией. Для одноцепной линии без тросов отношение $x_0/x_1 \approx 3,5$ и $r_0/x_1 \approx 0,1$. По графику на рис. 21-11 находим, что точке с координатами $x_0/x_1=3,5$, $r_0/x_1==0,1$ соответствует $k_3 \approx 1,35 < 1,4 (U_{ram} < 1,4 U_{\phi})$. Следовательно, установка разрядника PBC-110 или PBMГ-110 допустима.

Если бы подстанция питалась по двухцепной линии, то отношение x_0/x_1 составило бы 4,7—5,5. Из рис. 21-11 видно, что в этом случае $k_3 > 1,4$. Для того чтобы было возможно использовать разрядники РВС-110 или РВМГ-110, потребовалось бы заземлить нейтраль трансформатора на подстанции, что повело бы к резкому снижению отношения x_0/x_1 и значения U_{ram} .

21-8. ГРОЗОЗАЩИТНЫЕ РАЗРЯДНИКИ С РАСТЯГИВАЮЩЕЙСЯ ДУГОЙ (ЩЕЛЕВЫЕ РАЗРЯДНИКИ)

Ряд зарубежных фирм (BBC, GEC, ASEA) выпускает вентильные разрядники с искровыми промежутками, действие которых основано на принципе растягивания дуги в узкой щели под действием магнитного поля. Конструкция такого промежутка схематически показана на рис. 21-12. После пробоя искрового промежутка ИП по кратчайшему пути s₁ дуга сопровождающего тока под действием магнитного поля, созданного прохождением этого тока в катушке L_в, растягивается в узкой щели, образованной стенками промежутка, за несколько миллисекунд достигая нанбольшей длины s₂. Независимо от направления тока выдувание дуги происходит в одном и том же направлении, что упрощает конструкцию ИП. Под охлаждающим действием стенок узкой щели резко возрастает сопротивление дуги. Это сопротивление в сумме с рабочим сопротивлением РВ ограничивает сопровождающий ток до малых значений, и дуга гасится при первом прохождении тока через нуль.

Катушки $L_{\rm B}$ шунтированы простейшими искровыми промежутками ШИП, которые пробиваются при импульсном воздействии. После прохождения импульса напряжение на катушках оказывается столь малым, что дуга в искровых промежутках ШИП не может поддерживаться и гаснет, после чего сопровождающий ток будет протекать в катушках $L_{\rm B}$. Промежутки типа приведенных на рис. 21-12 выполняются на номинальное напряжение до 10 кв. Как следует из изложенного, в разрядниках с растягивающейся дугой ограничение сопровождающего тока происходит как рабочим сопротивлением, так и искровыми промежутками. Это позволяет выполнить рабочее сопротивление с низкими Uoct для грозовых импульсов. Защитный коэффициент у разрядников фирм BBC, GEC, ASEA доведен

до 1,75—1,8 и практически равен коэффициенту гашения.

В то же время разрядники с растягивающейся дугой не обеспечивают защитного действия по отношению к перенапряжениям, длительность которых близка к времени растягивания дуги в искровых промежутках. Действительно, растягивание дуги приводит к росту ее сопротивления и соответственно к увеличению остающегося напряжения до тех пор, пока воздействующий импульс не вызовет повторного пробоя искрового про-Длительность в несколько миллисекунд могут иметь коммутационные импульсы и повторные гро-

ного пробоя искрового промежутка s₁. Длительность в несколько миллисекунд мосительная камера; 3 – подсвечивающий электрод. В СССР намечен выпуск грозозащитных разрядников с растягивающейся дугой. Улучшаются и удещевляются также конструкции разрядников с вращающейся дугой. Отметим, что снижение защитного ко-

вающейся дугой. Улучшаются и удешевляются также конструкции разрядников с вращающейся дугой. Отметим, что снижение защитного коэффициента k_{3am} наиболее рационально путем снижения коэффициента вентильности рабочего сопротивления. Этот способ требует дальнейшего совершенствования нелинейных материалов и улучшения технологии изготовления рабочих сопротивлений.

21-9. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВЕНТИЛЬНЫМИ РАЗРЯДНИКАМИ

Основной контроль за состоянием разрядника осуществляется путем систематического (1 раз в 2—3 года или после большого числа срабатываний РВ) измерения токов проводимости при постоянном напряжении. Этим измерением устанавливается состояние шунтирующих сопротивлений искровых промежутков. Резкое снижение тока проводимости указывает на обрыв цепи шунтирующих сопротивлений, следствием чего является нарушение нормального распределения напряжения по искровым промежуткам. Резкое возрастание тока проводимости указывает в большинстве случаев на отсыревание керамических шунтирующих сопротивлений в результате проникновения в полость разрядника влаги. Следовательно, контроль за проводимостью — в то же время и проверка герметичности конструкции.

Неисправные разрядники изымаются из эксплуатации, вскрываются и ремонтируются. Вновь собранные разрядники герметизируются и подвергаются испытаниям, при которых, помимо тока утечки, измеря-



ется пробивное напряжение PB. Методика ремонта и испытаний, а также значения испытательных напряжений и токов проводимости нормируются «Инструкцией по монтажу и эксплуатации средств защиты от перенапряжений» и заводскими инструкциями. Поскольку разрядник является весьма ответственным аппаратом, его ремонт должен выполняться квалифицированным персоналом в специально оборудованной лаборатории.

Наблюдение за работой PB ведется по счетчику срабатываний и имитатору, которые включаются в заземляющую проводку PB. Имитатор представляет собой искровой промежуток типа приведенного на рис. 21-3 и вилитовый диск, доступные для осмотра. По следам дуги на электродах искрового промежутка и состоянию диска можно судить об интенсивности числа разрядов. Сильное оплавление электродов указывает на ненсрмальную работу разрядника (обычно прохождение длительного или чрезмерного тока рабочей частоты), а пробой диска свидетельствует о близящемся исчерпании пропускной способности рабочего сопротивления PB. В обоих случаях разрядник подвергается ревизии и ремонту.

Выпускаемые промышленностью разрядники не рассчитаны на работу в районах с загрязненной атмосферой. Загрязнение поверхности фарфорового чехла РВ приводит к резкому искажению распределения напряжения вдоль РВ, следствием чего может явиться отказ в гашении дуги сопровождающего тока либо даже срабатывания РВ при рабочем напряжении. В обоих случаях РВ разрушается. Поэтому при установке РВ на загрязняемой подстанции его фарфоровый чехол должен подвергаться частой обтирке.

Б. Трубчатые разрядники

21-10. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Трубчатые разрядники (РТ) предназначаются для защиты линейной изоляции и служат вспомогательным элементом в схемах защиты подстанций. В распределительных сетях трубчатые разрядники конкурируют

с вентильными разрядниками в непосредственной защите трансформаторных помещений и столбовых подстанций.

Принципиальная схема трубчатого разрядника показана на рис. 21-13. В трубке из газогенерирующего материала заключен внутренний промежуток *s*₁, образованный стержневым и кольцевым электродами. Промежуток *s*₁ называется также дугогасящим. Трубку отделяет от рабочего напряжения внешний искровой промежуток *s*₂. При приходе волны перенапряжения оба промежутка пробиваются и им-



Рис. 21-13. Схема устройства и включения трубчатого разрядника.



пульсный ток отводится в землю. По пути импульсной искры устанавливается сопровождающий ток, который в данном случае является током короткого замыкания. Под действием высокой температуры ствола дуги стенки трубки интенсивно генерируют газы, что ведет к охлаждению и деионизации дугового столба в промежутке s₁. Давление в трубке нарастает до нескольких десятков атмосфер. Газы, устремляясь к открытому концу трубки, создают продольное дутье, которое при первом же прохождении тока через нулевое значение гасит дугу. При срабатывании разрядника слышен звук, напоминающий выстрел, и из трубки выбрасываются раскаленные газы.

В разрядниках, выпускаемых нашей промышленностью, применяются трубки из фибры и винипласта. Эти материалы — органического происхождения, не выдерживающие длительного приложения высокого напряжения. Поэтому нормально внешний искровой промежуток s₂ отделяет трубку от рабочего напряжения сети.

В трубчатых разрядниках отсутствует рабочее сопротивление. Поэтому защитное действие разрядника полностью определяется его вольтсекундной характеристикой. Последняя обычно характеризуется в таблицах указанием минимального импульсного разрядного напряжения и разрядного напряжения при $t_p=2$ мксек.

Импульсное разрядное напряжение трубчатого разрядника определяется величиной внутреннего и внешнего искрового промежутков. Внутренний искровой промежуток устанавливается в соответствии с дугогасящими свойствами разрядника и не подлежит регулировке. Поэтому изменение разрядного напряжения достигается регулировкой внешнего искрового промежутка. Уменьшение внешнего искрового промежутка, желательное для более эффективной защиты изоляции, имеет, однако, определенный предел. Снижение внешнего искрового промежутка ниже этого предела может повести к частичным разрядам по промежутку и длительному воздействию напряжения рабочей частоты на трубку, что недопустимо. Кроме того, при малых внешних искровых промежутках наблюдаются частые срабатывания РТ как при грозовых импульсах неопасной амплитуды, так и при внутренних перенапряжениях. Это нежелательно, так как способствует износу трубок, возможности «ложной» работы релейной защиты и опасности динамических усилий, которым подвергаются обмотки трансформаторов при ударных токах короткого замыкания, протекающих в системе при работе РТ. Принятые в настоящее время минимальные допустимые значения внешних искровых промежутков разрядников указаны в табл. 21-3.

Таблица 21-3

	110	35	35 10 6 3				
Номинальное напряжение сети, ка	Эффективно заземленная нейтраль	Изоля	Изолированная нейтраль				
Длина внешнего промежутка, мм	250	60	15	10			

Минимально допустимые значения внешних искровых промежутков s₂ трубчатых разрядников

• К изолированным относят также резонансно заземленную нейтраль.

Для успешного гашения в трубке дуги сопровождающего тока необходимо достаточно интенсивное газообразование, которое, в свою очередь, зависит от проходящего тока. Поэтому существует определенный предел, называемый нижним пределом отключаемого тока, при котором еще происходит надежное гашение дуги за время не более чем 0,01—0,02 сек (1—2 полупериода). С другой стороны, слишком интенсивное газообразование может привести к разрушению трубки. Для трубчатых разрядников устанавливается поэтому верхний предел отключаемых токов, при котором происходит надежное гашение дуги без .

329

Таблица 21-4

Электрические характеристики трубчатых разрядников

напряженне зрядника, кв	опустнмое а трубчатом ⁶ действ	Обры то ка _д	васмые Кы, ейстэ	Внешний проме-	Имп напряз в I,	тульсные жения пр юлне нат 5/40 <i>мкс</i>	пробив он станд ряжени ек, ка _{ма}	ные артной я кс	Пробныные напряжения при промыш- ленной часто- те 50 га. к ^а дейсто		опускная и стандартной 20 <i>мксек</i> , iee)
нальное атого рв	ульшее д жение н днике, к	អង់ រា	г,	Жуток, мм	np 11 2	мсек	МВН ВМ (не б	альные олее)	в сухом состоя-	под дождем	ьсная пр ность пр тока 10/ с (не мен
Номи грубч	Нанб капря взря	інжн Іреде	зерхн реде		Поля;	ность	Поляј	ность			[МПУЛ ПОСОЙ 0ЛНе 4 мак
3	3,8	0,3 0,5 2,0 5,0	2,5 5,0 10,0 20,0	510	50	45	45	35	не м	7	20
6	7,6	0,2 0,5 2,0 5,0	1,0 5,0 10,0 20,0	10	75	75	65	65	33	30	20
10	12,7	0,2 0,5 2,0 5,0	1,0 2,5 10,0 20,0	15	80	80	70	70	40	38	20
20	20,5	0,2 0,3 0,5 2,0	1,0 2,5 5,0 10,0	40	130	130	120	120	65	55	20
		0,2 0,5	1,0 2,5								20
35	40,4	1,0 2,0 5,0 8,0	5,0 10,0 20,0 30,0	100	230	230	200	200	95	80	50
110	126,0	0,5 1,0 2,0 5,0 8,0	2,5 5,0 10,0 20,0 30,0	400	600	650	500	450	235	220	50
150	138,0	2,0 5,0	10,0 20,0	500	700	650	650	600	450	350	50
220	200,0	2,0 5,0	10,0 20,0	700	1 200	1 200	1 150	1 150	750	500	50

Примечание. Электрические характерастики в таблице указаны для нормальных атмосфер" ных условий.

какого-либо нарушения целостности разрядника. Диапазон отключаемых токов указывается в обозначении разрядника. Например, обозначение РТ $\frac{35}{1,8-10}$ соответствует трубчатому разряднику для сети 35 кв с пределами отключаемого тока 1,8 — 10 ка_{лейств}.

Оба предела отключаемых токов смещаются в сторону бо́льших значений при уменьшении длины внутреннего искрового (дугогасящего) промежутка и увеличении диаметра канала; наоборот, при увеличении длины внутреннего промежутка и снижении диаметра канала оба предела отключаемых токов смещаются в сторону меньших значений. Эта зависимость позволяет выпускать трубчатые разрядники с различными пределами отключаемых токов. При прочих равных условиях бо́льшим диапазоном отключаемых токов обладают трубки из материала более высокой механической прочности.



Рис. 21-14. Трубчатый разрядник типа РТФ. 1 — фибровая трубка; 2 — бакелитовая трубка; 3—камера дутья; 4 — электрод; 5 — указатель срабатывания; 6 — хомутик крепления разрядника; s — внутренний искровой промежуток.

Многократная работа разрядника, особенно при отключаемых токах, близких к верхнему пределу, ведет к возрастанию внутреннего диаметра трубки. При возрастании внутреннего диаметра на 20-25% первоначального РТ по отключаемым им токам становится непригодным для дальнейшей эксплуатации и должен быть демонтирован.

На рис. 21-14 показана конструкция трубчатого разрядника типа РТФ, в котором газ генерируется фибровой трубкой. Поскольку сама фибра не обладает необходимой механической прочностью, чтобы выдерживать высокое внутреннее давление при срабатывании разрядника, поверх нее намотана бакелизированная бумага. Характерной особенностью разрядника РТФ является наличие резервуара у закрытого конца трубки. Предполагалось, что газы, накапливающиеся в этом резервуаре, способствуют более надежному дугогашению при проходе сопровождающего тока через нуль. Более поздние исследования показали, однако, что накопленные в резервуаре газы вырываются через канал трубки уже после гашения дуги, что и было учтено в конструкции разрядников типа РТВ.

Так как бакелит гигроскопичен, то бакелитовая трубка разрядника должна быть покрыта периодически возобновляемым влагостойким лаком. В настоящее время для покрытия трубок применяется эмаль марки ПХВ-26 (перхлорвиниловая), хорошо выдерживающая суровые атмосферные воздействия летнего и зимнего времени.

Промышленностью выпускаются также более совершенные трубчатые разрядники серии РТВ (рис. 21-15), в которых генерирование газа и восприятие давления осуществляются винипластовой трубкой. Винипласт сохраняет свои изолирующие свойства при работе на открытом воздухе. Поэтому разрядники РТВ лаком не покрываются. Винипласт обладает также высокой механической прочностью к ударным нагрузкам, что позволяет изготавливать разрядники с большим диапазоном отключаемых токов. У разрядников РТВ на 3—10 кв удалось значительно уменьшить внутренние искровые промежутки, что существенно улучшило их импульсные характеристики.

Для точек сети с очень большими значениями отключаемого тока разработаны усиленные разрядники серии РТВУ, отличающиеся от разрядника РТВ тем, что винипластовая трубка усилена наружной подмоткой стеклоленты, пропитанной эпоксидной смолой.



Рис. 21-15. Трубчатый разрядник типа РТВ.

Характеристики трубчатых разрядников по ГОСТ 11475-65 при наиболее употребительных значениях отключаемого тока приведены в табл. 21-4. При необходимости полная вольт-секундная характеристика разрядника может быть определена на основе данных табл. 21-4 по формуле (5-5).

Трубчатые разрядники, устанавливаемые на линиях, пропускают через себя полный ток молнни. Искра с током в десятки килоампер создает в канале трубки высокое давление. Как видно из табл. 21-4, трубчатые разрядники должны выдерживать относительно длительные сопровождающие токи 20—50 ка, и, следовательно, опасность разрушения трубки возникает только при предельных токах молнии.

21-11. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ И ВЫБОР ТИПА ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Трубчатые разрядники устанавливаются на опорах линий электропередачи, а также на портальных конструкциях или на стене у ввода в подстанции. Разрядники подключаются через внешние искровые промежутки к каждой фазе и присоединяются к заземлению опоры, на которой они установлены. При таком включении на изоляцию опоры ложится напряжение, не превышающее импульсного разрядного напряжения трубчатых разрядников вне зависимости от сопротивления заземления R_3 .

Внешний искровой промежуток разрядника выбирается наибольшим возможным по условиям защиты изоляции. С увеличением внешнего искрового промежутка существенно снижается вероятность перекрытия разрядника по поверхности и уменьшается опасность соприкосновения электродов вследствие их разрегулировки.

Тип разрядника выбирается по номинальному напряжению установки и пределам тока короткого замыкания в данной точке сети. Обычно расчетом устанавливается минимальная и максимальная величина действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени. Этот ток обозначается как $I_{\text{пер}}$. Максимальный ток соответствует условию включения всех установленных элементов сети и виду к. з., сопровождающегося наибольшим током; минимальный ток соответствует схеме сети с частично выключенными элементами (генераторы, трансформаторы и линия) и виду к. з. с наименьшим током. При выборе минимального режима следует, однако, исходить из действительно вероятных схем сети в летний период при проведении капитальных ремонтов. Разряд молнии и срабатывание разрядника возможны при любом мгновенном значении рабочего напряжения на линии. Если разрядник срабатывает при значении напряжения пораженной фазы, близком к нулю, то ток короткого замыкания $I_{\rm R}$ в первые полупериоды будет слагаться из периодической составляющей $I_{\rm nep}$ и составляющей постоянного знака $I_{\rm amep}$. Постоянная составляющая тока затухает по экспоненциальному закону с постоянной времени $T = x/\omega R$, где R и x — активное и индуктивное сопротивление цепи, по которой проходит ток короткого замыкания. Постоянная времени снижается по мере удаления от генерирующих точек сети.

Составляющая постоянного знака должна учитываться при определении максимального тока короткого замыкания. Обычно действующее значение полного тока короткого замыкания находится по упрощенному соотношению

 $I_{\text{полн}} = I_{\text{пер}} k_{\text{апер}}$, (21-5) где коэффициент $k_{\text{апер}}$ принимается равным 1,5—1,8 для точек сети, близких к генерирующим станциям, и 1,3—1,5— для точек сети, удаленных от станции.

При определении минимального тока короткого замыкания постоянная составляющая тока не учитывается, т. е. полагается, что срабатывание разрядника произошло в момент, близкий к максимуму рабочего напряжения на пораженной фазе. В отношении выбора разрядника по нижнему пределу отключаемого тока такой режим является, естественно, наихудшим.

После того как выполнен расчет токов короткого замыкания, производится выбор типа трубчатого разрядника по пределам отключаемых токов. Выбор производится исходя из следующих условий:

а) верхний предел отключаемых токов РТ должен быть выше максимального полного тока короткого замыкания;

б) нижний предел отключаемых токов РТ должен быть ниже минимального тока короткого замыкания.

21-12. МОНТАЖ ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Конструкции установки трубчатых разрядников столь же разнообразны, как и типы опор, на которых они устанавливаются. Существуют, однако, определенные правила, которым должна удовлетворять каждая конструкция установки разрядников. Соблюдение этих правил необходимо для надежной защиты изоляции и безаварийной работы самих разрядников.

Срабатывание разрядника сопровождается выбросом сильно ионизированных, а следовательно, и проводящих газов. Расчетные зоны вы-

Таблица 21-5

	Номинальное	Размеры, и (не болес)		
Эскиз зоны выхлопа	напряжение РТ, кв	a	8	
	$ \begin{array}{c} 220 \\ 110 \\ 35 \\ 10 \\ 6 \\ 3 \end{array} $	3,5 3,0 2,5 1,5	2,5 2,0 1,0 } 1,0	

Зоны выхлопа трубчатых разрядников

332

хлопа разрядников, которые должны полагаться проводящими, приведены в табл. 21-5.

Расположение разрядников должно быть таким, чтобы проводящие зоны выхлопа, имеющие потенциал открытого конца трубки разрядника, не вызывали замыканий на землю или между фазами. Если разрядник крепится за закрытый конец, то потенциал выхлопа равен рабочему напряжению фазы, на которой установлен разрядник (полагая внешний искровой промежуток закороченным горящей дугой). Поэтому в зону выхлопа не должны попадать провода других фаз, заземленные кон-



Рис. 21-16. Установка трубчатых разрядников на анкерной металлической опоре 110 кв.

струкции, а также зоны выхлопов разрядников, защищающих другие фазы. Если разрядник крепится за открытый конец, который при этом заземляется, то в зону выхлопа не должны попадать провода линии; допускается, однако, пересечение зон выхлопа между собой и с заземленными элементами конструкций.

На рис. 21-16 приведен пример установки трубчатых разрядников 110 кв на металлической анкерной опоре. Зоны выхлопа разрядников в данной конструкции охватывают только провода защищаемых фаз.

21-13. ТРУБЧАТЫЕ РАЗРЯДНИКИ С ОГРАНИЧЕНИЕМ Сопровождающего тока

С ростом токов коротких замыканий в электрических сетях усложняются конструкции трубчатых разрядников, рассчитанных на верхние пределы отключаемых токов. Кроме того, зависимость типа разрядника от пределов отключаемых токов увеличивает номенклатуру типов РТ и усложняет их выбор. Уже давно в СССР и за границей были предложены конструкции РТ с ограничением сопровождающего тока, в значительной степени устраняющие указанные трудности. Одна из таких конструкций схематически показана на рис. 21-17. В трубку из газогенерирующего материала вставляется вкладыш из того же материала с винтовой канавкой. Искровой промежуток s создается в зазоре между трубкой и вкладышем. Дуга сопровождающего тока устанавливается в винтовой канавке, где деионизация слабее, чем в тесном зазоре, но достаточна сильна для ограничения сопровождающего тока до почти



Рис. 21-17. Конструктивная схема трубчатого разрядника с ограничением сопровождающего тока. *I* — газогенерирующая трубка; *2* — вкладыш из газогенерирующего матернала; *3* — зазор между трубкой и вкладышем; *4* — винговая канавка во вкладыше.

постоянной величины. Таким образом, такой разрядник пригоден для установки в сетях без ограничения по верхнему пределу тока гашения. Заметим, что искровой промежуток указанной конструкции сближается по принципу действия с искровым промежутком РВ с растягивающейся дугой. Механическая прочность трубки типа показанной на рис. 2-17 должна быть очень высокой, чтобы противостоять повышенным нагрузкам, возникающим в узком зазоре при искровом пробое и отводе через искру тока молнии.

21-14. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Трубчатые разрядники, установленные на линии, осматриваются при каждом ее обходе. Особо тщательно осматривают разрядники вблизи пораженных опор, которые можно узнать по их щеплению, следам оплавления и т. д. При осмотре разрядника проверяется положение его указателя срабатывания. Промышленностью поставляется лишь однократный указатель срабатывания в виде металлической полоски, отгибаемой выхлопом (рис. 21-14), однако энергосистемы применяют ряд изготовляемых в ремонтных мастерских указателей многократного действия, также использующих энергию выхлопных газов.

При обнаружении поврежденных разрядников (отслоившаяся фибра, нарушенный лаковый покров, разрушенная трубка, разрегулированный внешний промежуток, оплавленные электроды и т. д.) последние демонтируют с линии и подвергают ревизии в мастерских. Внутренний канал трубки очищается от насекомых и хлопьев фибры шомполом, после чего измеряется диаметр канала. При увеличении его на 20— 25% по сравнению с первоначальным, а также при расслоении или разрушении стенок трубки разрядник бракуется. Если трубка РТ в порядке, проверяются заделка и состояние электродов и длина внутреннего искрового промежутка. Поврежденные электроды заменяются; восстанавливается лаковый покров и окраска металлических частей разрядника.

Если при осмотре с земли не обнаруживают неисправностей, сработавший РТ снимается для ревизии после грозового сезона. Неработавшие РТ оставляют на линии без ревизии в течение нескольких лет; исключение составляют разрядники, находящиеся в местностях с загрязненной атмосферой. Последние снимают с линии для обтирки и ревизии после каждого грозового сезона.

В. Защитные промежутки

21-15. ЗАЩИТНЫЕ ИСКРОВЫЕ ПРОМЕЖУТКИ

При отсутствии необходимых разрядников и в упрощенных схемах грозозащиты (где это сочтено допустимым) применяются защитные искровые промежутки (ПЗ). ПЗ выполняются в виде стержневых промежутков с соответствующим расстоянием между электродами, укрепляемых на колонках опорных изоляторов или на гирляндах подвесных изоляторов. Характеристики стержневых промежутков были рассмотрены в гл. 5.

Защитные искровые промежутки не имеют дугогасительного устройства, поэтому каждое их срабатывание в сети с заземленной нейтралью ведет к возникновению к. з. и автоматическому отключению. Существенными недостатками ПЗ являются также большой разброс разрядных напряжений, зависимость разрядного напряжения от атмосферных условий, крутое возрастание вольт-секундной характеристики в области малых предразрядных времен и трудность получения стабильного расстояния между электродами ПЗ в сетях сверхвысокого напряжения.

21-16. СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ (СПЗ)

Так называются промежутки без дугогашения с малым разбросом разрядных напряжений и возможно пологой вольт-секундной характеристикой. Одна из возможных схем СПЗ приведена на рис. 21-18. Искровой промежуток разбит на три ступени. Распределение напряже-

ния по промежуткам Π_1 , Π_2 , Π_3 регулируется емкостями. Параллельно Π_3 подключен вспомогательный стабилизированный искровой промежуток Pчерез небольшое активное сопротивление R. Этот промежуток может быть, например, того типа, который применяется в вентильных разрядниках. Разряд начинается пробоем промежутка P с малым запаздыванием. Точка a схемы приобретает почти нулевой потенциал, после чего последовательно срабатывают промежутки Π_2 и Π_1 . После их срабатывания напряжение волны падает на сопротивление R и потенциал точки a возрастает до значения, достаточного для пробоя промежутка Π_3 . Таким образом, работа всего СПЗ управляется срабатыванием стабилизированного промежутка P, который, однако, не обтекается сопровождающим током



Рис. 21-18. Схема стабилизированного защитного промежутка (СПЗ).

рабочей частоты, оплавляющим электроды. Промежутки Π_1 , Π_2 , Π_3 могут выполняться по типу ИП с вращающейся дугой (рис. 21-7). Вращение дуги в магнитном поле используется в данном случае для уменьшения оплавления электродов до автоматического отключения участка сети с СПЗ.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Объясните, какое влияние оказывает коэффициент нелинейности рабочего сопротивления и дугогасящая способность искрового промежутка на защитный коэффициент k_{3am} вентильного разрядника.

2. Объясните принципы дугогашения в искровых промежутках разрядников РВС и разрядников РВМГ.

3. Объясните физическую природу эффекта нелинейности рабочего сопротивления РВ.

4. Какие ограничения накладываются на импульсные и сопровождающие токи, проходящие через рабочее сопротивление РВ?

5. Определите U_{гаш} для разрядника 110 кв, устанавливаемого в точке сети с $x_0/x_1=4$ и $r_0/x_1=0.5$ (высокое активное сопротивление земли по пути тока нулевой последовательности). Допустима ли установка PBC-110 или PBMГ-110 в этой точке сети?

6. Какими достоинствами обладают вентильные разрядники с растягивающейся дугой?

7. Чем определяется выбор внутреннего и внешнего искрового промежутка трубчатого разрядника?

8. Необходима установка трубчатого разрядника в точке сети, удаленной от станций, с максимальным током к. з. $l^{3}_{nep} = 2\,000\,a$ и минимальным током к. з. $l^{1}_{nep} = = 800\,a$. Укажите пределы токов гашения, по которым следует подобрать тип PT.

9. Какие требования предъявляются к конструкции установки трубчатого разрядника?

10. Объясните принцип действия стабилизированного защитного промежутка.

Глава двадцать вторая

АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ГРОЗОЗАЩИТА ЛИНИЙ

22-1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРОЗОПОРАЖАЕМОСТИ ЛИНИЯ

Грозовое поражение линии электропередачи может повлечь за собой перекрытие изоляции и переход импульсной искры в устойчивую силовую дугу тока короткого замыкания, следствием чего является автоматическое отключение линии. В редких случаях силовая дуга приводит к повреждению изоляции на опорах. Обычно же действием автоматического повторного включения (АПВ) линия удерживается в работе и грозовое поражение не приводит к перерыву в электроснабжении.

В задачу грозовой защиты линий входит снижение до минимума числа грозовых отключений. Линии высшего номинального напряжения выполняются наиболее грозоупорными.

При поражении линии грозовым разрядом формируется волна перенапряжения, воздействующая на изоляцию. Грозовые перенапряжения, возникающие на линиях, подразделяются на индуктированные (возникающие при грозовых разрядах вблизи линии) и перенапряжения прямого удара молнии (п. у. м.) в линию. Теория грозовых перенапряжений на линиях, основанная на уравнениях запаздывающих потенциалов электромагнитного поля, была разработана в 1950—1960 гг. рядом советских и иностранных исследователей. Разработка современной методики расчета грозовых перенапряжений на линиях была завершена Д. В. Разевигом. В настоящей главе дается упрощенное изложение этой методики.

Расчеты грозоупорности линий носят ориентировочный характер ввиду ряда допущений при составлении расчетной схемы, в том числе таких, которые основаны только на гипотезах о развитии грозового разряда в линию. Тем не менее такие расчеты полезны для сравнительной оценки и определения путей повышения грозоупорности линий.

22-2. ИНДУКТИРОВАННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ГРОЗОВОМ РАЗРЯДЕ ВБЛИЗИ ЛИНИЙ

Как установлено в гл. 18, лидер грозового разряда представляет собой спускающийся от облака к земле канал, несущий отрицательные



Рис. 22-1. Развитие индуктированных перенапряжений на линиях. а — накопление зарядов q₊ в лидерной стадын разряда молнии; б — образование волны и_{инд.а} при растекании зарядов q₊ н образование и_{шид.а} при подтекании зарядов q₋ на опоре в стадии главного разряда.

заряды. Электрическое поле лидера, опускающегося от облака к земле, показано на рис. 22-1, а. На проводе в каждой точке x действует продольная составляющая напряженности электрического поля E_{3x} , примерно пропорциональная высоте подвеса провода $h_{\rm np}$. Под действием этой составляющей в проводе проходит ток, подтягивающий к точ-



Рис. 22-2. Кривая вероятности амплитуд индуктированных перенапряжений U_{инд} при ударах молнин в землю для h_{пр}=10 м (по Д. В. Разевигу).

ке с координатой x=0 положительные заряды q_+ с дальних участков линии. Ввиду относительно небольшой скорости лидера (по сравнению со скоростью распространения электромагнитных волн) ток в линии мал, и потенциал провода близок к нулевому значению, соответствую-22—641 щему потенциалу дальних участков линии. Электрическое поле положительных зарядов q+ компенсируется на высоте провода электрическим полем отрицательных зарядов лидера. В стадии главного разряда (рис. 22-1,б) вдоль канала лидера со скоростью UM движется разрядная волна. Электрическое поле вблизи лидера распадается. Распад поля распространяется в окружающем пространстве со скоростью света и достигает отдельных участков линии с запаздыванием тем большим, чем дальше расположен участок линии от точки x=0. Снижение напряжения E_{ax} высвобождает заряды на проводе, которые растекаются в обе стороны по линии со скоростью света. С растеканием свободных зарядов связана волна нескомпенсированного напряжения, воздействующего на изоляцию линии. Эту волну, вызванную распадом электрического поля лидера, называют электрической составляющей индуктированного напряжения иинд.э. Наибольшее напряжение возникает в точке x=0, ближайшей к каналу молнии. При отрицательной полярности тока молнии напряжение иипл., на проводах имеет положительную полярность.

Разрядная волна главного канала связана с током молнии, возбуждающим в окружающем пространстве переменное магнитное поле (рис. 22-1, б). Это поле индуктирует электрическое поле напряженности $\overline{E}_{\mathbf{x}} = -\frac{\partial A}{\partial t}$, где A — вектор-потенциал магнитного поля, совпадающий

по направлению с током молнии. Как видно из рис. 22-1,6, в обозначен-



Рис. 22-3. Прямой удар молнии в опору линии без троса.

ных осях напряженность имеет только одну составляющую E_{MZ} . E_{MZ} вызывает Напряженность подтекание зарядов q- к верхушке опоры, т. е. создает напряжение $u_{\text{инд.м}} = E_{\text{мz}} h_{\text{пр}}$, воздействующее на изоляцию опоры. Напряжение инд.м называют магнитной составляющей индуктированного напряжения. Это напряжение можно представлять как результат взаимоиндукции между током в канале молнии и опорой. При отрицательной полярности тока молнии напряжение иинд.м на верхушке опоры также отрицательной полярности. Следовательно, суммарное индуктированное напряжение между опорой и проводом, воздействующее на изоляцию опоры, равно:

 $u_{\rm MHg} = u_{\rm MHg,9} + u_{\rm MHg,M}.$ (22-1)

Амплитуда $U_{инд}$ примерно пропорциональна высоте подвеса провода и снижается при снижении тока молнии, крутизны фронта тока молнии и при увеличении расстояния *b* от места разряда до линии. На рис. 22-2 показана кривая вероятности индуктированных перенапряжений на ли-

нии высотой $h_{\rm HP} = 10$ м. При построении кривой считалось равновероятным поражение любой точки местности вблизи линии (но не

ближе чем на расстоянии $4h_{np}$, при котором грозовой разряд уже поражает самую линию); вероятность токов молнии определялась по формуле (21-2), средняя длина фронта тока молнии была принята равной 8 *мксек*. Как видно, в большинстве случаев U_{max} достигает 100— 200 кв.

Волны индуктированного напряжения на линии могут иметь большую длительность, доходящую до нескольких сотен микросекунд. Особенностью этих волн является одновременное их возникновение с примерно равной амплитудой (пропорциональной высоте подвеса провода) на всех фазах линии электропередачи.

22-3. ПРЯМОЙ УДАР МОЛНИИ В ОПОРУ ЛИНИИ БЕЗ ТРОСОВ

На линня без тросов большинство п. у. м. поражает провода линии. Поэтому случай п. у. м. в опору линии без тросов представляет в основном методический интерес. Схема поражения показана на рис. 22-3. Через опору и ее заземление R_3 протекает ток молнии $i_{\rm M}$. Напряжение на заземлении опоры будет равно:

$$u_{\rm a} = i_{\rm M} R_{\rm H}, \qquad (22-2)$$

где R_n — импульсное сопротивление заземлителя при токе молнии i_m . Напряжение u_3 достигает амплитудного значения при амплитудном значении i_n . Примем, что ток молнии имеет косоугольный фронт с крутизной a_m (ка/мксек). Тогда на фронте волны тока молнии

$$u_3 = a_{\rm M} t R_{\rm H}. \tag{22-2a}$$

Зависимость R_n от мгновенного значения тока i_m определяется для выбранного заземлителя по кривым на рис. 20-11. Полярность напряжения u_3 совпадает с полярностью тока молнии.

Электрическое поле тока молнии по-прежнему индуктирует напряжения $u_{инд.9}$ и $u_{инд.M}$. Магнитная составляющая $u_{инд.M}$ обусловлена самоиндукцией тока в опоре и взаимоиндукцией тока в канале молнии с контуром опора — провод. Обозначим коэффициент самоиндукции через $L_{\text{оп}}$, а коэффициент взаимоиндукции через M. Значение $L_{\text{оп}}$ растет пропорционально высоте опоры; $L_{\text{оп}}$ тем меньше, чем больше параллельных путей для прохождения тока, создается конструкцией опоры.

ж висим ости $L_{out} = f(h_{on}^{np})$ для типовых конструкций опор задаются соотношениями:

 $L_{on} = 0,55 h_{on}^{np} - для$ портальных металлических и железобетонных опор, *мкгн*;

 $L_{on} = 0,6 h_{on}^{np}$ — для деревянных П-образных опор с двумя заземляющими спусками, *мкгн*;

 $L_{\text{оп}} = 0,65 h_{\text{он}}^{\text{пр}}$ — для башенных металлических и железобетонных опор *жен*;

 $h_{\alpha\pi}^{np}$ — высота опоры до уровня подвески проводов, *м*.

Коэффициент взаимоиндукции M между каналом молнии и опорой зависит от длины главного канала молнии и нарастает по мере увеличения длины этого канала $H_{\rm M} = v_{\rm M} t$, где $v_{\rm M}$ — скорость главного разряда. Величина $v_{\rm M}$ подвержена значительному статистическому разбросу — от 1/2 до 1/20 скорости света (см. § 19-1), вследствие чего в широких пределах изменяется и величина M. При малых $v_{\rm M}$ коэффициент $M \ll 22^*$

≪ L_{оп}. Поэтому в приближенных расчетах можно учитывать только коэффициент самоиндукции опоры L_{оп} и, следовательно, принять

$$u_{\rm BH,I,N} \approx L_{\rm out} \frac{di_{\rm N}}{dt} = a_{\rm N} L_{\rm out}.$$
(22-3)

Суммарное напряжение на верхушке опоры

$$u_{on} = a_{M} (R_{u}t + L_{ou}). \qquad (22-4)$$

При отрицательной полярности тока молнии напряжение *u*оп также отрицательной полярности.

На проводе индуктируется электрическая составляющая напряжения $u_{\text{инд.}3}$, которая в рассматриваемом случае обусловлена нейтрализацией зарядов в канале молнии, начиная от высоты $h_{\text{пр}}$. Расчеты показывают, что амплитуда электрической составляющей индуктированного напряжения может быть определена по формуле:

$$u_{\mathrm{mb}} = u_{\mathrm{ung},\mathfrak{d}} = a_{\mathrm{M}}L_{\mathfrak{d}}, \qquad (22-5)$$

где a_м — крутизна тока молнин, ка/мксек;

L₉ — коэффициент, численно равный высоте подвеса провода, *мкгн*; h_{пр} — высота подвеса провода, *м*.

При отрицательном токе молнии напряжение на проводе и_{инд.} имеет положительную полярность. Высота подвеса провода h_{ир} в рас-



Рис. 22-4. Кривая напряжения на изоляцию опоры $u_{\text{RG}}(t)$ при п. у. м. в опору линии без троса (к примеру 22-1). Кривая $u_{\text{RG}}(t)$ нарастает до перессчения с вольт-секундной характеристикой изоляции (гирлянды). Высота подвеса провода *п*_{ир} в расчетах принимается равной средней высоте подвеса провода над землей в пролете.

На изоляцию пораженной опоры воздействует суммарное напряжение

$$u_{\text{H},3} = u_{\text{OB}} - u_{\text{B}} = u_3 + u_{\text{H},\text{B},\text{M}} + u_{\text{H},\text{H},3} = a_{\text{M}} (tR_{\text{H}} + L_{\text{OB}} + L_{2}). \quad (22-6)$$

Характерная кривая $u_{n3}(t)$, построенная по данным приводимого ниже примера 22-1, воспроизведена на рис. 22-4. Напряжение практически мгновенно нарастает до $u_{\text{инд}} = a_{\text{м}}(L_{\text{оп}} + L_3)$ и далее нарастает в соответствии с ростом u_3 . Если напряжение нарастает до пересечения с U - t характеристикой изоляции на опоре, происходит перекрытие изоляции. Точке пересечения соответствует время $t_{\text{р}}$ и амплитуда тока молнии $I_{\text{м}} = a_{\text{м}} t_{\text{р}}$. Если $u_{\text{нз}}$ не достигает вольт-секундной харак-

теристики, перекрытия изоляции не произойдет. Таким образом, при каждых заданных значениях $a_{\rm M}$ и $I_{\rm M}$ можно определить, произойдет ли перекрытие изоляции на опоре. Такое перекрытие, происходящее с заземленной опоры на провод, называется обратным.

Пример 22-1. Молния поразила двухцепную металлическую башенную опору 220 кв без тросов. Крутизна тока молнии $a = 20 \ \kappa a / \kappa \kappa c e \kappa$. Высота опоры до уровня подвеса верхних проводов $h_{on}^{op} = 31 \ \kappa$, средняя высота верхних проводов в пролете $h_{np} = 25 \ \kappa$.

Заземлитель — горизонтальный, двухлучевой, с длиной луча 20 м и глубиной заложения t=0,8 м, проложенный в грунте $\rho=500$ ом м (см. пример 20-3). Определить, при каком токе молнии произойдет обратное перекрытие. Для башенной опоры $L_{on} = 0.65 \cdot 31 = 20$ мкгн. L_{2} численно равно высоте подвеса провода, т. е. $L_{3} = 25$ мкгн. Тогда индуктированное напряжение будет равно:

$$u_{\text{HH}} = a_{\text{H}} (L_{\text{on}} + L_{\text{o}}) = 20 (20 + 25) = 900 \ \kappa \epsilon.$$

Сопротивление заземлителя на переменном токе $R_{\sim} = \frac{40}{2} = 20 \text{ ом}$ (см. пример 20-3)

Для определения напряжения на сопротивлении заземления u_3 для нескольких последовательных моментов времени *t* вычисляем ток $i_{\rm M} = a_{\rm M} t$ и по кривым на рис. 20-11,*a* находим соответствующий этому току импульсный коэффициент $a_{\rm M}$. Теперь можно для каждого из этих моментов времени найти значение импульсного сопротивление заземления $R_{\rm M} = a_{\rm M} R_{\rm M}$ и напряжения на нем $u_3 = i_{\rm M} R_{\rm M}$.

Соответствующая зависимость $u_{m,s}(t)$ приведена на рис. 22-4, там же построена результирующая кривая $u_{m,s}(t)$, вычисленная по формуле (22-6). Пересечение $u_{m,s}(t)$ с u-t характеристикой гирлянды из семи изоляторов ПМ-4,5 происходит при $t_p = = 2,15$ мксек. Следовательно, перекрытие изоляции произойдет при токе, равном $I_M = = a_M t_p = 20 \cdot 2,15 = 43$ ка.

22-4. ПРЯМОЙ УДАР МОЛНИИ В ОПОРУ ЛИНИИ С ТРОСАМИ

Для предотвращения п. у. м. в провода на линиях с металлическими опорами подвешиваются тросы, заземленные на каждой опоре. Рассмотрим схему поражения молнией опоры с тросами (рис. 22-5). Ток молнии растекается по тросам в заземления нескольких, ближайших к месту поражения опор; обычно достаточно учитывать растекание то-



Рис. 22-5. Прямой удар молнии в опору линии с тросом.

ка по пораженной и соседним опорам. Расчетные схемы для определения тока в пораженной опоре показаны на рис. 22-6. Ток молнии с косоугольным фронтом представлен источником тока $i_{\rm M} = a_{\rm M} t$. Пораженная опора представлена сопротивлением заземления R_3 и коэффициентом самоиндукции $L_{\rm off}$. До прихода волн, отраженных от соседних опор, тросы замещаются своими еолновыми сопротивлениями (с учетом импульсной короны) $\frac{1}{2} z_{\rm TF.K}$ (рис. 22-6, a). В процессе многократных отражений от заземлений соседних опор тросы в пролете могут замещаться индуктивностью $L_{\rm Tp} = \frac{z_{\rm Tp}}{2} \frac{l}{c}$, где $z_{\rm Tp}$ — волновое сопротивление тросов без учета короны (корона не влияет на индуктивность), ом; *l* — длина пролета, м; *c* = = 300 м/мксек.

Расчетная схема для этого случая показана на рис. 22-6,6. Учитывая большое падение напряжения на L_{тр}, можно пренебречь сопро-



тивлениями заземления соседних опор, что и принято в схеме на рис. 22-6,6.

Использование в расчетах двух схем неудобно. Учитывая, что в обоих схемах ток в тросах в начальные моменты времени мал, можно принять схему на рис. 22-6,6 в качестве расчетной при всех временах. Операторное уравнение для схемы на рис. 22-6,6 запишется в виде

$$a_{\mathrm{M}} \frac{1}{p^2} = \overline{i}_{\mathrm{OH}} + \overline{i}_{\mathrm{TP}} = \overline{i}_{\mathrm{OH}} + \frac{\overline{u}_{\mathrm{OH}}}{pL_{\mathrm{TP}}},$$

где $\vec{u}_{on} = \vec{i}_{on} (R_s + pL_{on}).$ Решение этого уравнения дает:

$$i_{\text{out}} = a_{\text{M}} tm \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha t}; \qquad (22-7)$$

$$\frac{di_{\mathbf{o}\pi}}{dt} = a_{\mathrm{M}} m \, e^{-\alpha t}, \qquad (22-8)$$

Рис. 22-6. Расчетные схемы для определения тока в пораженной опоре при п. у. м. в линию с тросами.

д — до прихода волн, отраженных от соседних опор: б — после многократных отражений волн в пролете.

 $a = \frac{R_3}{L_{TD} + L_{OR}}; m = 1 - \frac{L_{OR}}{L_{OR} + L_{TD}}$ Так как обычно $L_{
m on} \ll L_{
m TH}$, то а $\approx R_{
m s}/L_{
m TP}$ и $m \approx 1$. Сопротивление заземления R₃ при вычислении коэффициента а обычно принимается для упро-

щения расчета равным R. Более точно значение R₃ может быть вычислено в зависимости от тока іоп по кривым на рис. 20-11. По известным значениям $i_{out}(t)$ и di_{out}/dt легко найти и напряжение на верхушке опоры:

$$u_{\rm on} = i_{\rm on} R_{\rm s} + L_{\rm on} \frac{di_{\rm on}}{dt}.$$
 (22-9)

Как следует из приведенного вывода, членом $L_{on} \frac{di_{on}}{dt}$ учтена основная часть магнитной составляющей индуктированного напряжения.

Для определения напряжения, воздействующего на изоляцию линии, к напряжению и_{оп} следует прибавить электрическую составляющую индуктированного напряжения на проводе $u_{\rm np} = u_{\rm sug,a} = a_{\rm M} L_a$ и учесть электромагнитное влияние тросов. Это влияние легко установить по схемам на рис. 22-5. Мысленно разорвем трос вблизи опоры. Тогда на изоляцию провода и в месте разрыва опора-трос (пренебрегая различием высота $h_{\rm TP}$ и $h_{\rm on}$) действует напряжение $u^*_{\mu3} = u_{\rm on} + u_{\rm mp}$. По правилу Тевенена роль присоединенного троса выражается волной $u^*_{\mu a}$ на тросе, которая индуктирует на проводе напряжение $k_{\rm K} u^*_{\rm H3}$, где $k_{\rm K}$ — коэффициент связи между тросом и проводом с учетом импульсной ко-

роны. Следовательно, полное напряжение, воздействующее на изоляцию пораженной опоры, с учетом электромагнитного влияния тросов, выражается формулой

$$u_{\rm H3}(t) = (u_{\rm off} + u_{\rm ff})(1 - k_{\rm K}) = (u_{\rm 3} + u_{\rm HH,I,M} + u_{\rm HH,I,\partial})(1 - k_{\rm K}) = = \left(i_{\rm off}R_{\rm H} + L_{\rm off}\frac{di_{\rm off}}{dt} + a_{\rm M}L_{\rm 2}\right)(1 - k_{\rm K}).$$
(22-10)

Коэффициент связи $k_{\kappa} = k_0 \gamma_{\kappa}$, где k_0 — геометрический коэффициент связи, γ_{κ} — зависящий от величины напряжения поправочный коэффициент на импульсную корону. Средние значения γ_{κ} , вычисленные по формуле (18-30), приведены в табл. 22-1.

Таблица 22-1

Значения поправочного коэффициента ук на импульсную корону при вычислении коэффициента связи kк (прямой удар молнии в опору)

	_	Номина.	тьное напряжение .	18HUB, #8	
число тросов	35	110-22)	330	500	750
1 2	1,1 1,15	1,2 1,25	1,25 1,3	1,35	 1,4

Напряжение $u_{n3}(t)$ нарастает до пересечения с u-t характеристикой изоляции на опоре, и по времени пересечения t_p определяется ток молнии $I_m = a_m t_p$, при котором наступает перекрытие изоляции. Пример 22-2. Определить ток, при котором произойдет обратное перекрытие

Пример 22-2. Определить ток, при котором произойдет обратное перекрытие изоляции на пораженной молнией двухцепной металлической башенной опоре 220 кв (см. пример 22-1), если линия защищена одним тросом с высотой подвеса его на опоре 40 м и углом защиты $\alpha = 25^{\circ}$. Волновое сопротивление троса z = 400 ом; геометрический коэффициент связи троса с верхними проводами $k_0 = 0,2$; длина пролета l = = 300 м. Крутизна фронта тока молнии $a_M = 20$ ка/мксек.

Вычисляем индуктивность тросов в пролете $L_{\rm TP} = \frac{z_{\rm TP}}{2} \frac{l}{c} = \frac{400}{2} \frac{300}{300} = 200$ мкгн. Ко-

эффициент $\alpha \approx \frac{R_3}{L_{\pi p}} = \frac{20}{200} = 0,1 \frac{1}{MKCEK}; m \approx 1.$

По формулам (22-7) и (22-8) находим формы кривых $i_{on}(t)$ и di_{on}/dt для разных значений t. Затем по кривым рис. 20-11, a определяем α_{x} и $R_{x} = \alpha_{x}R_{\sim}$, соответствующие найденным мгновенным значениям i_{on} .

В соответствии с табл. 21-1 принимаем $\gamma_{\rm M} = 1.25$; тогда коэффициент связи с учетом короны $k_{\rm M} = 1.25 \cdot 0.2 = 0.25$. Теперь по формуле (22-10) вычисляем мгновенные значения $u_{\rm H3}(t)$. Построив кривую $u_{\rm H3}(t)$ до пересечения с u - t характеристикой изоляции (рис. 22-7), находим, что пересечение происходит при t = 4.4 мксек. Следовательно, обратное перекрытие произойдет при токе молнии, равном $I_{\rm M} = a_{\rm M} t_{\rm p} = 20 \cdot 0.44 = 88$ ка. Из сравнения с данными примера 22-1 видно, что подвеска троса значительно повысила уровень грозоупорности при п. у. м. в опору за счет оттекания тока молнии в ближайшие опоры и электромагнитной связи трос — провод.

Расчетные формулы (22-6) и (22-10) для напряжения на изоляции $u_{u_3}(t)$ выведены без учета фазного рабочего напряжения проводов. Для линий до 220—330 кв включительно возможно пренебречь U_{ϕ} . Но для линий 500 кв и особенно 750—1 000 кв учет U_{ϕ} существенно влияет на напряжение $u_{u_3}(t)$. При определении минимального тока молнии, вызывающего обратное перекрытие, следует, очевидно, в правую часть формул (22-6) и (22-10) добавлять слагаемое + U_{ϕ} . В расчетах вероятного числа перекрытий можно не учитывать рабочего напряжения, так как грозовое напряжение равновероятно в любую фазу как положительного, так и отрицательного значения U_{ϕ} .

Обычно интересуются вероятностью обратного перекрытия при п. у. м. в опору. Эта вероятность определяется следующим образом. Задаваясь рядом значений $a_{\rm M}$, находят значения $I_{\rm M}$, вызывающие перекрытие изоляции. По полученным критическим значениям $I_{\rm M}$ и $a_{\rm M}$ строится кривая опасных параметров молнии, показанная на рис. 22-8, а. Для числовых значений примера 22-2 необходимо определить вер'ят-



Рис. 22-7. Кривая напряжения на изоляции опоры $u_{x3}(t)$ при п. у. м. в опору линии с тросом (к примеру 22-2). Кривая $u_{x3}(t)$ нарастает до пересечения с вольт-секундной характеристикой изоляции (гирлянды).

ность попадания в заштрихован-, ную область. Исходя из гипотезы статистической независимости $I_{\rm M}$ и $a_{\rm M}$, для каждой точки кривой на



Рис. 22-8. Кривые опасных параметров молнии (а) и вероятности опасных параметров (б) для примера 22-2.

рис. 22-8 по формулам (19-2) и (19-3) или кривым на рис. 19-5 и 19-6 вычисляем вероятности превышения крутизн $a_{\rm M}$ и токов $I_{\rm M}$ и строим кривую $P_{\rm a} = f(P_{\rm I})$, показанную на рис. 22-8,6. Вероятность перекрытия на опоре равна заштрихованной площади, ограниченной этой кривой. При построении кривой пренебрегают площадьми с относительно малыми $P_{\rm I}$ и $P_{\rm a}$. Для линии примера 22-2 вероятность перекрытия на опоре равна $P_{\rm on} = 0,03$.

22-5. ПРЯМОЙ УДАР МОЛНИИ В ТРОСЫ В ПРОЛЕТЕ

Грозовые разряды поражают тросы на линии. Если бы высота подвеса тросов в пролете была неизменна, то поражение любой точки троса в пролете было бы равновероятно. В действительности за счет провеса тросов в пролете более вероятно поражение троса вблизи опор. Приближенно можно принять, что в 60% случаев п. у. м поражают опоры и в 40% случаев — тросы в середине пролета. В последнем случае через ближайшие опоры проходит ток $i_{\text{оп}} \approx i_{\text{м}}/2$ и вероятность перекрытия на опорах, вычисленная по методике § 22-4, оказывается пренебрежимо малой по сравнению с вероятностью перекрытия лри п. у. м. непосредственно в опору.

Теоретически возможно также перекрытие между тросом и проводом в пролете. При поражении троса ток в канале молнии (до прихода волн, отраженных от заземлений опор) равен *i*_м/2, где *i*_м — полный ток молнии в заземленном объекте (см. § 18-3). Этот ток растекается в обе стороны по тросу (рис. 22-9,*a*) и, следовательно, по тросу в обе стороны от места поражения движутся волны с током $i_{\rm M}/4$. Эти токи создают напряжение в месте поражения $u = \frac{i_{\rm M}}{4} z_{\rm TP.R}$, где $z_{\rm TP.R}$ — волновое сопротивление троса при развитии импульсной короны. Ток молнин $i_{\rm M} \approx a_{\rm M} t$. При учете коэффициента связи трос—провод $k_{\rm R}$ напряжение, приходящееся на изоляцию, определяется равенством

$$u_{\rm H3}(t) = \frac{a_{\rm M}}{4} t z_{\rm TF,R} (1-k_{\rm R}). \tag{22-11}$$

Нарастание напряжения $u_{\rm H3}$ продолжается до прихода отраженных волнот соседних опор, т. е. до момента времени $t_{\rm dp} = 2 \frac{l}{v_{\rm H}}$, где l – длина про-



лета и $v_{\rm R}$ — скорость движения волны по тросу при развитии импульсной короны (рис. 22-9,6). Затем напряжение $u_{\rm H3}$ сохраняет постоянное значение в течение длительности фронта волны тока молнин $t_{\rm dp,M} = I_{\rm M}/a_{\rm M}$. При времени $t > t_{\rm dp,M}$ напряжение $u_{\rm H3}$ спадает.

Расчеты показывают, что при обеспечении необходимого защитного угла а и подвеске сталеалюминиевых проводов и стальных тросов с допустимыми для их материала и сечения тяжениями расстояния трос провод в пролете достаточны, чтобы вероятность перекрытия в пролете была исчезающе мала.

22-6. РАСЧЕТ УДЕЛЬНОГО ЧИСЛА ПЕРЕКРЫТИЙ И ОТКЛЮЧЕНИЙ ЛИНИЙ С ТРОСАМИ

Удельные показатели линий (числа перекрытий и отключений) относятся к 100 км длины линии и одному грозовому дню. Применяются также показатели, отнесенные к 20 или 100 грозовым дням, 100 грозовым часам. Эти показатели устанавливаются как средние для большого числа линий каждого типа. Показатели отдельных линий обычно имеют некоторое отклонение от этих средних значений.

Для линий 110 кв и выше индуктированные напряжения при грозовых разрядах вблизи линий только в очень редких случаях могут приводить к перекрытию изоляции. Поэтому расчет удельных показателей для этих линий должен быть ориентирован на п. у. м. в линию.

Лабораторными опытами и наблюдениями установлено, что линия длиной l принимает на себя разряды в среднем с площади s=8hl, где h — средняя высота подвеса тросов (или проводов на линии без троса). В § 21-5 указывалось, что в равнинных районах СССР число поражений 1 κm^2 земной поверхности в один грозовой день в среднем равно 0,1. Следовательно, удельное число п. у. м. в линию (на 100 κm в один грозовой день) в среднем равно

$$n = 0.08 h,$$
 (22-12)

где h в метрах.

Для ВЛ, проходящих по одной трассе на расстоянии, меньшем 8*h*, вычисляется фактическая площадь, с которой параллельные линии собирают п. у. м., и по этой площади определяют число *n*.

Понятно, что указанная формула ориентировочно справедлива только для большого числа линий. Для отдельных линий наблюдаются большие отклонения (дисперсия) от среднего значения. Из *n* разрядов в ВЛ основная масса поражает тросы, но имеется некоторая вероятность прорыва молнии через тросовую защиту и непосредственного поражения проводов. Вероятность этого события \mathcal{P}_{α} определяется по формуле (20-3). Можно считать, что каждое поражение провода приводит к перекрытию изоляции на опорах. Следовательно, для *n* п. у. м. в линию удельное число перекрытий вследствие поражения молнией проводов равно:

 $n_{\rm up} = P_{\rm a} n.$

Разность $n-n_{\rm пp}$ представляет число п. у. м. в тросы. Как было указано в § 22-5, принимается, что 0,6 п. у. м. в тросы поражает непосредственно опоры, а 0,4 — тросы в середине пролета. Вероятность перекрытия изоляции при п. у. м. в трос в середине пролета много меньше, чем при п. у. м. в опору, и ею можно пренебречь. При каждом п. у. м. в опору вероятность перекрытия изоляции равна $P_{\rm on}$ (методика вычисления $P_{\rm on}$ была приведена в § 22-4). Таким образом, удельное число перекрытий изоляции при п. у. м. в тросы равно:

$$n_{\rm op} = P_{\rm op} 0.6 (n - n_{\rm pr}) \approx 0.6 P_{\rm op} n.$$

Суммарное удельное число перекрытий изоляции равно:

$$n_{\rm nep} = n_{\rm np} + n_{\rm op} = n \left(P_{\rm a} + 0.6 P_{\rm op} \right). \tag{22-13}$$

Все эти перекрытия происходят на опорах. С вероятностью η импульсное перекрытие переходит в устойчивую силовую дугу тока короткого замыкания (в системах с заземленной нейтралью) и происходит отключение линии. Физические процессы, связанные с этим переходом, были рассмотрены в гл. 11. На металлических опорах ВЛ 110 кв и выше $\eta \approx 0.8$.

Удельное число отключений линий равно:

$$n_{\rm otk} = \eta n_{\rm nep} = \eta n \left(P_{\rm a} + 0.6 P_{\rm ou} \right).$$
 (22-14)

Определяя для заданного района число грозовых дней в году $n_{\rm rp}$ (например, по карте на рис. 19-8), находим ожидаемое число отключений на 100 км линии в год:

$$n_{\text{отк}} = n_{r_1} \eta n \left(P_a + 0.6 P_{\text{оп}} \right). \tag{22-1 5}$$

Пример 22-3. Определить удельное число отключений линии 220 кв с параметрами, указанными в примере 22-2. Среднюю высоту подвеса троса принять равной 32 м.

Удельное число п. у. м. в линию с тросом равно $n=0.08\cdot 32=2.6$. Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту согласно формуле (20-3)

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \, \gamma \, \overline{h_{0\pi}}}{90} - 4 = \frac{25 \cdot 32}{90} - 4 = -2.43,$$

откуда $P_{\alpha} = 3.7 \cdot 10^{-3}$. Удельное число перекрытий изоляции вследствие прорыва молнии через тросовую защиту $n_{\pi p} = 2.6 \cdot 0.0037 = 0.0095$.

Вероятность перекрытия изоляции вследствие п. у. м. в опору, определенная на рис. 22-8, равна $P_{ox} = 0.03$; соответственно удельное число перекрытий вследствие п. у. м. в трос равно $n_{ox} = 0.6nP_{ox} = 0.047$. Удельное число перекрытий изоляции равно:

$$n_{\pi e p} = 0.047 + 0.0095 = 0.0565$$

а удельное число отключений линии

$$n_{0_{\rm TK}} = \eta n_{\rm nep} = 0.8 \cdot 0.0565 = 0.045.$$

В центральных районах СССР с числом грозовых дней в году $n_{\rm rp}=30$ число отключений расматриваемой линии на 100 км в год составит $n_{\rm otx}=1,3\div1,4.$

22-7. ПРЯМОЙ УДАР МОЛНИИ В ЛИНИЮ БЕЗ ТРОСОВ

На линиях без тросов подавляющее число грозовых разрядов поражает провода линии. При ударе в провод токи молнии, ограниченные волновым сопротивлением линии, снижаются примерно вдвое по сравнению с разрядом в хорошо заземленный объект (§ 19-3). Прямой удар молнии в провода приводит к растеканию тока молнии в обе стороны по пораженному проводу. Амплитуда волны перенапряжения на линии

$$U = \frac{I_{\mathbf{u}}}{4} z_{\mathbf{k}} + U_{\mathbf{H}\mathbf{k}\mathbf{g}}, \qquad (22-16)$$

где $I_{\rm M}$ — ток молнии в хорошо заземленном объекте;

*z*_к — волновое сопротивление провода с учетом импульсной короны. При тех высоких напряжениях волн, которые возникают при пря-200 си

мом ударе молнии в провод, значение z_{κ} можно принять равным 300 ом. На линии с металлическими опорами волна перенапряжения с амплитудой U воздействует на изоляцию провода на опоре. Уже токи молнии порядка 5—10 ка, т. е. подавляющее большинство грозовых разрядов в линию, создают перенапряжения, достаточные для перекрытия гирлянды изоляторов, вплоть до высших классов номинального напряжения.

На линиях с деревянными опорами (рис. 22-10) волна перенапряжения U воздействует на изоляцию провода относительно земли по пути гирлянда—траверса—стойка на опоре или по пути провод—земля в середине пролета, где габарит наименьший. Вследствие высокой изоляции относительно земли разряду на землю обычно предшествует импульсное перекрытие между проводами. Волна на пораженном проводе индуктирует напряжение на соседнем проводе в соответствии с коэффициентом связи проводов. Между проводами возникает напряжение

$$U = \frac{I_{\rm M}}{4} z_{\rm K} (1 - k_{\rm K}). \qquad (22-17)$$

Волна напряжения воздействует на изоляцию по пути гирлянда траверса — гирлянда. Индуктированные перенапряжения, возникающие на всех трех фазах линии одновременно, не оказывают воздействия на междуфазную изоляцию. Приравнивая воздействующее напряжение



Рис. 22-10. Междуфазное перекрытие при поражении молнией линии на деревянных опорах.

50%-ной импульсной прочности междуфазной изоляции U_{u_3} , находим из формулы (22-17) ток молнии, вызывающий перекрытие изоляции,

$$I_{\rm M} = \frac{4 U_{\rm H3}}{z_{\rm F} (1 - k_{\rm F})} \cdot$$
(22-18)

Удельное число перекрытий изоляции равно $n_{\text{пер.}} = nP_i$, где *n* находится по формуле (22-12), а P_i — по кривой на рис. 19-5. Удельное число отключений линии равно $n_{\text{отк}} = \eta n_{\text{пер}} = \eta nP_i$, а число отключений на 100 км в год $N_{\text{отк}} = n_{\text{гр}} \eta nP_i$. Значения η для линии на деревянных опорах определяется по формуле (11-1).

Пример 22-4. Определить удельное число перекрытий линий 1-10 кв на деревянных П-образных опорах с расстоянием между проводами 4 м и средней высотой подвеса проводов $h_{\pi p} = 10$ м.

Разрядное напряжение по междуфазной изоляции деревянной опоры 110 кв, определенное по методике § 9-8, составляет $U_{\rm Ha}$ = 1560 кв. Определяем коэффициент связи между проводами $k_0 \approx 0.2$ и с учетом импульсной короны при $U = \frac{U_{\rm Ha}}{1 - k_{\rm K}} \approx 2000$ кв $k_{\rm K} \approx 1.5k_0 = 0.3$. По формуле (22-18) находим расчетный ток молнии, вызывающий перекрытие изоляции,

$$I_{\mu} = \frac{4U_{\mu 3}}{z_{\kappa} (1 - k_{\kappa})} = \frac{4 \cdot 1560}{300 \cdot 0.7} = 30 \ \kappa a.$$

Вероятность превышения такого тока согласно формуле (19-2) равна 0,32. Удельное число перекрытий $n_{uep} = 0,06 \cdot 10 \cdot 0,32 = 0,2$. Коэффициент перехода импульсной искры

в силовую дугу $\eta = 0,25$ (см. пример 11-1); соответственно удельное число отключений линии составит:

$$n_{07K} = 0, 2 \cdot 0, 25 = 0, 05.$$

При $n_{\rm rp} = 30$ число отключений на 100 км в год равно:

$$N_{01} = 30.0,05 = 1,5.$$

22-8. НОВАЯ ТЕОРИЯ ГРОЗОПОРАЖАЕМОСТИ ЛИНИЙ (обратных перекрытий) на высоких опорах с тросами

В последние годы в США были проведены полевые измерения тока молнии на верхушках высоких опор с помощью киноклидонографов, т. е. ряда клидонографов, образующих емкости цепочечной линии, подключенной в свою очередь к шунту, через который проходит ток молнии. С помощью такого устройства оказалось возможным измерять токи при временах в сотые и десятые доли микросекунд. Измерения показали, что волна тока молнии имеет на фронте ступеньку, амплитуда кото-

рой $I_0 \approx 5 \div 15$ ка, а фронт практически прямоугольный (рис. 22-11). Через время $\Delta t = 2h/c$, где h — высота опоры плюс средняя глубина залегания заземления, фронговая ступенька переходит в основную волну тока молнии. В течение времени Δt на изоляцию линин воздействует напряжение

 $u_{\rm H3} = I_0 z_0 (1 - k_{\rm K}) + U_{\rm HER},$ (22-19)

где z_3 — эквивалентное сопротивление параллельно включенных волновых сопротивлений опоры и тросов.

Это напряжение по излагаемой теории и служит основной причиной обратных перекрытий на линиях с высокими опорами при малых сопротивлениях заземлений опор. Косвенным подтверждением этой теории является тот факт, что на линиях с высокими опорами перекрытие изоляции возникает обычно при очень малых предразрядных временах: на это указывает след



Рис. 22-11. Фронт волны тока молнии на верхушке опоры (по измерениям Грискома) и расчетная схема для определения фронтовой ступеньки *i*₂ в токе молнии.

перекрытия по изоляторам (см. § 9-5).

Причиной образования фронтовой ступеньки может служить механизм п. у. м. в линию (см. § 18-3). Головка лидера имеет высокий потенциал, и искровой разряд между лидером и верхушкой опоры представляется источником напряжения U_0 , включаемым между каналом лидера и опорой (рис. 22-11,6). Очевидно, что фронт волны тока будет прямоугольным, а ток ограничен волновыми сопротивлениями опоры и канала молнни. Переход к «нормальной» кривой тока наступает после втягивания в канал молнии зарядов, сосредоточенных в земле.

Согласно сказанному снижение u_{μ_3} возможно путем снижения волнового сопротивления z_9 . Осуществить это возможно устройством растяжек. Особенно должны быть эффективны растяжки, расположенные вдоль линии, так как они одновременно повышают коэффициент связи $k_{\rm F}$. Для снижения h у подножия опоры рекомендуется прокладывать несколько лучей заземлителя, что должно вызывать отраженную волну непосредственно у поверхности земли. Считается эффективным также установка на опорах стержней высотой порядка 5 *м*.

Новая теория грозопоражаемости линий представляет большой теоретический и практический интерес, но для ее подтверждения требуются многочисленные измерения и опытные проверки.

22-9. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Выбор противогрозовой защиты определяется интенсивностью грозовой деятельности в районе, где проходит трасса линии. В районах, где грозы практически отсутствуют или очень слабы (число грозовых дней в году меньше пяти), нет надобности в специальной защите от грозовых перенапряжений. На грозопоражаемость линий могут влиять также рельеф и геологическая структура местности. Поэтому наилучшим показателем необходимости противогрозовой защиты служит опыт эксплуатации электрических сетей в данном районе. В то же время на основе обобщения опыта эксплуатации большого числа линий в разных районах устанавливаются некоторые стандартные меры грозозащиты, выполнение которых в большинстве случаев наиболее целесообразно с технико-экономической точки зрения. На линиях с металлическими (и железобетонными) опорами, как правило, применяется тросовая защита. В отсутствие тросов защитный уровень этих линий весьма низок и отключения линии вследствие грозовых поражений весьма часты. Многолетний опыт эксплуатации линии на металлических опорах показал, что хорошо заземленные тросы обеспечивают малое удельное число отключений линий. Подвеска тросов незначительно повышает стоимость линии (примерно на 5-7%).

Обратную картину мы имеем на линиях 110 кв и ниже с деревянными опорами. Подвеска тросов, требующая применения столбов большой длины (длинометров) и утяжеляющая конструкцию опор, удорожает стоимость линии на 20—30%. Между тем, линии на деревянных опорах без троса обладают удовлетворительными грозозащитными характеристиками, а стоимость их на 25—40% ниже стоимости линий на металлических и железобетонных опорах. Поэтому на линиях с деревянными опорами тросовая защита используется лишь на участках, примыкающих к подстанциям («подходах»), где по условиям защиты подстанционной изоляции необходимо предотвратить прямой удар молнии в провода.

В сетях напряжением 35 кв и ниже нейтраль изолирована или заземлена через дугогасящую катушку, поэтому однофазные импульсные перекрытия не приводят к возникновению устойчивой силовой дуги. Эта особенность может быть использована для отказа от тросовой защиты линии на металлических опорах. При этом полагают, что грозовое перекрытие приводит к однофазному перекрытию изоляции на опоре. Тогда путем снижения сопротивления заземления опор можно предотвратить обратное перекрытие с опоры на соседние фазы и тем самым предотвратить двухфазное (или трехфазное) короткое замыкание на землю. Однофазное же перекрытие гасится дугогасящей катушкой.

Особенностью грозовых перекрытий является обычно полное восстановление электрической прочности изоляции после снятия напряжения. По данным анализа грозовых поражений в 80—90% случаев возможно немедленное включение линии 35—220 кв в работу. Автоматическое повторное включение (АПВ) служит поэтому эффективным средством противогрозовой защиты, широко используемым в энергетических системах Советского Союза. В настоящее время все воздушные линии электропередачи напряжением 35 кв и выше оборудуются АПВ.

На выключателях с индивидуальным приводом на каждой фазе часто применяют однофазные АПВ (ОАПВ). В отношении грозовой защиты ОАПВ особенно эффективно на линиях с металлическими опорами, на которых грозовые поражения локализуются однофазными перекрытиями.

ОАПВ применяется для сетей с заземленной нейтралью. Для сетей с дугогасящей катушкой, где дуга тока замыкания на землю гасится автоматически, надобность в ОАПВ отпадает.

Говоря об эффективности АПВ как средства противогрозовой защиты, следует отметить, что при чрезмерно частом действии АПВ возрастает опасность разрегулировки механизма выключателей и возникает необходимость их частого капитального ремонта. Кроме того, как показывает опыт эксплуатации, динамические усилия в обмотках при частых коротких замыканиях приводят к нарушению прочности креплений обмоток трансформаторов на подстанциях. Поэтому АПВ на линиях должно сочетаться с такими мерами противогрозовой защиты, которые удерживают число автоматических выключений на минимальном уровне.

22-10. ЗАЩИТА ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 кв И ВЫШЕ На металлических и железобетонных опорах

Линии напряжением 110 кв и выше на металлических и железобетонных опорах в грозовых районах страны защищаются тросами по всей длине. По конструкции опоры разделяются на портальные с двумя тросами и башенные и одностоечные с одним тросом.

Одноцепные и двухцепные линии на башенных и одностоечных опорах более экономичны, однако обладают меньшим защитным уровнем, чем линии на П-образных опорах. Последнее объясняется следующими причинами:

а) Башенные и отчасти одностоечные опоры имеют большую высоту опор и меньший защитный угол троса. Вследствие этого можно ожидать возрастания вероятности прорывов молнии сквозь тросовую защиту и непосредственного поражения молнией проводов линии. Особенно это касается двухцепных линий, высота которых доходит до 40—45 м.

б) Вследствие повышенной индуктивности башенных и одностоечных опор, увеличения индуктивности тросов в пролете и меньшего коэффициента связи между тросами и проводами (по сравнению с линией с двумя тросами) можно ожидать возрастания вероятности обратного перекрытия с опоры на провода при поражении тросов вблизи опоры п. у. м.

Ориентировочные значения удельного числа отключений на 100 км линии в один грозовой день для линий 110—500 кв, защищенных тросами, составляют: для башенных опор 220—330 кв с одним тросом 0,04—0,06, для портальных опор 220—500 кв с двумя тросами 0,003— 0,004. Удельное число отключений линий на двухцепных опорах более чем на порядок превышает число отключений линий на портальных опорах.

Сопротивление заземления опор линий под тросами стремятся доводить до значений $R_{\rm u} \le 10$ ом. Однако с ростом удельного сопротивления почвы возрастают и затраты на заземлители. В плохо проводящих грунтах ($\rho > 5 \cdot 10^2$) добиться импульсного сопротивления опор $R_{\rm n} \le 10$ ом весьма затруднительно. Поэтому в ПУЭ нормированы сопротивлением заземления опор R_{\sim} в зависимости от удельного сопротивления грунта (табл. 22-2).

Наблюдения показывают, что одинаковое удельное число грозовых отключений на горных и равнинных ВЛ имеет место при отношении сопротивлений заземлений опор $R_{\rm rop}/R_{\rm paвh}=2,5$. Это объясняется меньшими токами молнии в горных районах (см. § 19-2).

В грунтах с $\rho > 10^4$ ом м при невозможности выполнения эффективных глубинных заземлителей (скальный грунт, глубокое залегание

Таблица 22-2

Максимально допустимые сопротивления заземления овор линий с тросами

Удельное сопротивление грунта, ом.м	R_, 0M
До 10 ²	До 10
Более 10 ³ до 5.10 ²	До 15
Более 5.10 ² до 10 ²	До 20
Более 10 ³	До 30

грунтовых вод) иногда прокладывают непрерывные протяженные заземлители, идущие от опоры к опоре, так называемые противовесы. Опыт эксплуатации ряда линий показал, что такие заземлители существенно (в несколько раз) снижают число отключений линий. Основная причина эффективности заземлителей-противовесов была указана в § 20-6. Другая причина заключается в повышении коэффициента связи системы тросы — противовесы с проводами линии.

Когда трасса линии проходит в районах с усиленным гололедообразованием, возникают аварии, вызванные обрывами или провисанием тросов от гололедных нагрузок, а также схлестыванием проводов с тросами при сбросе гололеда с проводов. Ущерб для народного хозяйства от тяжелых аварий, вызванных указанными причинами, может значительно превысить ущерб от грозовых перекрытий, которые, как правило, ликвидируются АПВ. Поэтому на участках линии, пролегающих в особо гололедных районах, возможен отказ от защиты тросами. При пролетах до 200—250 *м* снизить число грозовых перекрытий можно путем установки на опорах стержневых молниеотводов высотой $h = 20 \div 25$ *м*.

Подвеска тросов нецелесообразна также в районах со слабой грозовой деятельностью при среднегодовой продолжительности гроз менее 20 ч. К таким районам, в частности, относятся области Средней Азии, Прикаспия, Крайнего Севера и др. (рис. 19-9).

22-11. ЗАЩИТА ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35—220 кв НА ДЕРЕВЯННЫХ ОПОРАХ

Хотя линии на металлических и особенно на железобетонных опорах находят все большее применение в практике строительства электрических сетей, в частности в безлесных районах Советского Союза, линии на деревянных опорах имеют большое распространение на напряжениях до 110 кв включительно. Обычно линии 35—110 кв имеют П-образную конструкцию опор. Тросы подвешиваются только на подходах к подстанциям. Расстояния между фазами по дереву составляют 4 м на опорах 110 кв и 3 м на опорах 35 кв. Сооружены линии 220 кв на деревянных П-образных опорах с междуфазным расстоянием 5,25 м. Рассчитанные удельные числа отключений линий на деревянных опорах без троса составляют 0,02 для ВЛ 35 кв, 0,05 для ВЛ 110 кв,

0,1 для ВЛ 220 кв.

Относительно малые удельные числа отключений линий 110 кв и особенно 35 кв на деревянных опорах обусловлены в первую очередь малыми коэффициентами перехода п. Число отключений линий 35 кв может быть еще более снижено путем применения опор с междуфазным расстоянием 4 м.

В отдельных случаях для питания особо ответственных потребителей в сильно грозовых районах возможно применение тросовой защиты и по всей длине линий 110 кв и особенно 220 кв с деревянными опорами; для таких линий удельное число отключений на 100 км и один грозовой день падает до $n_{\text{отк}} \approx 10^{-3}$.

Волна перенапряжения, возникающая при прямом ударе молнии в провод линии с деревянными опорами (без троса), распространяется на большие расстояния в обе стороны от места грозового разряда. Вследствие высокого уровня изоляции амплитуда волны остается значительной даже на больших расстояниях от места поражения. Если на линии имеются места с пониженной против общего уровня изоляцией (например, отдельные металлические опоры, концевые опоры участков с тросом, пересечения линий), то в этих местах будут происходить перекрытия под воздействием как ближних, так и дальних грозовых разрядов. Поэтому на линиях с деревянными опорами без троса специальная защита мест с ослабленной изоляцией является обязательной. Защита осуществляется с помощью трубчатых разрядников. Для защиты опор трубчатые разрядники устанавливаются непосредственно на этих опорах. Защита пересечений осуществляется с помощью трубразрядников, устанавливаемых на опорах, ограничивающих чатых пролет пересечения.

Грозовые перекрытия на линиях с деревянными опорами, как правило, сопровождаются расщеплением древесины опор. При мощных разрядах наблюдаются случаи расщепления деталей пяти-шести рядом расположенных опор.

Расщепление древесины приводит к ускоренному ее загниванию. Поэтому расщепленные детали опор должны быстро заменяться. Наибольшую опасность обычно представляет расщепление траверс. Глубокое расщепление траверс или стоек, при котором нарушается механическая прочность опоры, наблюдается примерно в 6—8% общего числа случаев. Актуальна разработка мер защиты древесины, в первую очередь траверс от расщепления.

22-12. ЗАЩИТА ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 кв НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОРАХ БЕЗ ТРОСА

На линиях 35 кв с металлическими или железобетонными опорами допускается отказ от защиты тросовыми молниеотводами. Уровень изоляции линий должен быть достаточен для того, чтобы противостоять основной массе индуктированных перенапряжений. Это условие обеспечивается при принятой для таких линий подвесной гирлянде из трех изоляторов. Разрядное напряжение гирлянды из трех элементов при положительной полярности и полной волне составляет 300—350 кв. Толъко в редких случаях индуктированные перенапряжения могут превысить это значение.

На линии без троса прямой удар молнии обычно поражает один из проводов. При двухцепных опорах молния поражает исключительно 23—641 верхние провода, которые экраннруют нижние; поражение молнией вызывает перекрытие фазы на землю. В сетях 35 кв с изолированной или компенсированной нейтралью дуга замыкания на землю обычно гаснет в течение нескольких периодов. Следовательно, поражение провода с последующим перекрытием фазной изоляции на опоре не влечет за собой отключения линии, кроме относительно редких случаев длительной работы сети с заземлением одной из фаз. Линия отключается при возникновении междуфазного короткого замыкания в результате обратного перекрытия на непораженных фазах. Определенный для этого случая развития грозового поражения защитный уровень линии не превышает 40 ка при R_и=10 ом. Более высокий защитный уровень может быть достигнут только при снижении импульсных сопротивлений заземления опор до 4-5 ом. В грунтах, где р≈10² ом м, выполнение требуемых заземлителей не связано с большими затратами металла.

22-13. ЗАЩИТА ЛИНИЙ 3-10 кв

Линии 8-10 кв, как правило, выполняются на деревянных одностоечных опорах (рис. 22-12). Для наиболее полного использования изоляции дерева на одностоечных опорах междуфазные расстояния принимаются равными 1 м для линий 10 кв, 0,75 м для 6 кв и 0,5 м для 3 кв. На таких линиях градиент рабочего напряжения равен



Рис. 22-12. Деревянные одностоечные опоры 3-10 кв я выполнение на них заземляющих спусков (координацин).

3-10 кв/м и коэффициент перехода импульсной искры в силовую дугу не превышает 0,1. Повышение уровня грозоупорности может быть достигнуто за счет применения деревянных траверс. При расстояниях между фазами около 1,2-2 м коэффициент η снижается до очень малых значений. Деревянные траверсы, однако, существенно усложняют конструкцию опоры, вследствие чего могут быть рекомендованы только в сильно грозовых районах.

На линиях 3-10 кв необходима защита мест с ослабленной изоляцией: отдельных металлических опор, пересечения воздушных линий, кабельных переходов через железные дороги, шоссе и линии высокого напряжения линейных разъединителей. На металлических опорах и опорах с кабельными муфтами устанавливаются трубчатые разрядники. На опорах, ограничивающих пролет пересечения, уровень изоляции линии относительно земли снижается путем прокладки заземляющих спусков по стойке, как показано пунктиром на рис. 22-12. Такое устройство на-

зывается координацией.

Вследствие малых междуфазных расстояний импульсное разрядное напряжение между проводами остается ниже разрядного напряжения на заземляющий спуск, поэтому устройство координации на опорах 3-10 кв не снижает общего уровня грозоупорности линии.

22-14. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСОВ ЧЕРЕЗ ИСКРОВЫЕ промежутки

Грозозащитные тросы, помимо их основного назначения, могут также использоваться для электроснабжения монтерских пунктов (емкостный отбор), для питания электроэнергией ремонтных бригад, плавки

гололеда, релейной защиты и связи, что существенно повышает культуру эксплуатации электропередачи. Указанные мероприятия требуют изоляции троса от опор. На линиях с двумя тросами в замкнутом контуре, образованном двумя тросами в пролете, под действием рабочих токов в линии наводится э. д. с., которая вызывает прохождение паразитных токов в тросах. Ежегодные потери, связанные с этими токами, особенно в линиях СВН, составляют заметную величину. Разземление даже одного троса устраняет эти потери.

Рассмотрим возможность разземления троса по условиям грозозащиты. Защитное действие троса на линии связано с ориентировкой лидера молнии на трос. Такая ориентировка определяется картиной



Рис. 22-13. Система заземления тросов на линиях электропередачи 500 кв.

поля в пространстве головка лидера — земля, как это было показано на рис. 20-1. При заземлении троса через искровые промежутки с малым (порядка нескольких десятков киловольт) разрядным напряжением U_p потенциал троса не может превысить это значение, которое столь мало по сравнению с потенциалом лидера, что трос с точки зрения картины поля остается практически заземленным. В действительности при некотором расстоянии лидера от троса возникает пробой искровых промежутков и трос переводится в глухозаземленный режим. Эффективность тросов, включаемых через искровые промежутки, проверена экспериментом и опытом эксплуатации.

Заметим, что аналогичное обоснование можно дать тому факту, что провода линий ($l \rightarrow \infty$) эквивалентны по своему защитному действию заземленным тросам, на что было обращено внимание в § 22-3.

На изолированных тросах через частичные емкости линии поддерживается напряжение промышленной частоты U_{тр в}.

Тросы подвешиваются на линейных изоляторах, шунтируемых искровыми промежутками. При пробое искровых промежутков грозовым импульсом вслед за импульсным током протекает емкостный ток линии. Вопрос о величине искровых промежутков на тросах должен, следовательно, рассматриваться также с точки зрения надежности гашения дуги емкостного тока. Условия самопогасания дуги можно орнентировочно найти по данным § 4-13. Эти данные должны быть дополнены путем проведения специальных исследований и опытом эксплуатации линий с разземленными тросами.

На тросах, кроме электрической составляющей $U_{\rm тр.8}$, токами в проводах индуктируется магнитная составляющая $U_{\rm тр.M}$. В рабочем симметричном режиме эта составляющая незначительна. Значение $U_{\rm тр.M}$ резко возрастает при прохождении токов короткого замыкания, особенно однофазных и двухфазных с землей. Пробой искровых промежутков на тросах ограничивает напряжение на тросах.

На электропередачах, где тросы разземляются только для снижения потерь, изолированные участки тросов заземляются с одного конца (рис. 22-13). Этим заземлением составляющая $U_{\rm TP,0}$ снижается до нуля, а составляющая $U_{\rm TP,M}$ на изолированном конце троса хотя и повышается вдвое, но в рабочем симметричном режиме не превышает нескольких киловольт. При столь низком напряжении дуга на искровых промежутках тросов легко гасится.

В тех случаях, когда предусматривается возможность работы линии в неполнофазных режимах, выбор искровых промежутков на тросах осложняется. В неполнофазных режимах напряжение на тросе существенно повышается за счет несимметрии рабочих напряжений и токов в фазах и может даже оказаться достаточным для пробоя искровых промежутков. В этом случае в качестве универсального мероприятия можно рекомендовать глухое заземление тросов через специальные разъединители или заземление тросов через индуктивные сопротивления, поддерживающие напряжение на тросах на заданном уровне на период работы линии в неполнофазном режиме.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Объясните возникновение индуктированных перенапряжений на линиях при близком грозовом разряде.

2. Дайте оценку (качественно и по расчетным формулам) влияния на грозоупорность линии сопротивления заземления опор, высоты и конструкции опор, числа тросов и высоты подвески проводов и тросов, длины пролета.

3. Линия 35 кв длиной 30 км на металлических опорах без троса имеет по три изслятора в гирлянде типа П-4,5. Средняя высота подвески провода hap = 8 м. Определить ожидаемое число грозовых перекрытий и отключений линии при nrm = 30 дней.

делить ожидаемое число грозовых перекрытий и отключений линии при л_{гр}=30 дней. 4. Проектируется линия 110 кв длиной 80 км одноцепная с опорами башенного тыпа с одним тросом. Гирлянды линии состоят из семи изоляторов П-4,5. Заземления опор — кольцо D=8 м, проложенное в грунте р=200 ом м. М. Число грозовых дней в году равно 20. Определить ожидаемое число грозовых отключений линии.

в году равно 20. Определить ожидаемое число грозовых отключений линии. 5. Линия 110 кв без троса сооружена на деревянных П-образных опорах. Средняя высота подвеса провода 10 ж; расстояние между фазами по дереву 4 ж; гирлянда состоит из шести изоляторов П-4.5. Определить удельное число грозовых отключений линии на 100 км и один грозовой день.

6. По двухцепной опоре произошло обратное перекрытие: a) на верхнем проводе, 6) на нижнем проводе. Объясните, при каких параметрах молнии можно ожидать то или другое перекрытие.

или другое перекрытие. 7. Какая защита должна устанавливаться на линиях с деревянными опорами без тросов?

8. Каким образом разземленный трос выполняет свои защитные функции? Какие факторы влияют на выбор защитного промежутка s?

Глава двадцать третья

ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

23-1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИЙ

По экономическим соображенням уровень изоляции подстанционного оборудования ниже уровня изоляции линий передачи. Отсюда следует, что с линий передачи на подстанцию могут набегать волны, опасные для подстанционного оборудования.

Защита подстанционной изоляции от волн, набегающих с линий, осуществляется вентильными разрядниками (PB). Выбор вентильных разрядников в качестве основного аппарата защиты подстанционной

¹ В том числе повышающих подстанций ГЭС и ТЭС.

изоляции определяется следующими их свойствами: PB обладают пологими и стабильными характеристиками, независимыми от полярности импульса; при срабатывании PB не дают крутого среза волны, приводящего к высоким градиентным напряжениям в обмотках трансформаторов. В настоящее время выбор уровней изоляции электрических аппаратов и трансформаторов производится в соответствии с характеристиками вентильных разрядников. Поэтому установка PB считается обязательной на каждой подстанции, где возможно появление волн атмосферных перенапряжений, опасных для изоляции подстанции. Исключение составляют только подстанции распределительных сетей 3—10 кв; для непосредственной защиты их изоляции применяются трубчатые разрядники.

Трубчатые разрядники (РТ) применяются для защиты линейных подходов к подстанциям. Имеется тенденция к устранению РТ из схем защиты или к сокращению их числа. Такая тенденция связана с возможностью возникновения опасных колебаний на подстанции при работе РТ, что было обнаружено в ряде опытов. Необходим также учет динамических механических воздействий на обмотки трансформаторов, возникающих при срабатывании трубчатых разрядников и протекании в цепи ударного тока короткого замыкания. Такие воздействия могут стать опасными при малых реактивных сопротивлениях сети за трансформатором или при механически слабых обмотках.

Кроме защиты подстанций от набегающих волн, необходима защита открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций и взрывоопасных помещений, находящихся на территории станций и подстанций, от прямых ударов молнии.

23-2. ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИИ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

Защита от прямых ударов молнии открытых токоведущих частей подстанции осуществляется с помощью стержневых молниеотводов. Методика выбора и расположения молниеотводов изложена в гл. 20. Для удешевления защиты молниеотводы устанавливаются на конструкциях подстанции, а также на осветительных мачтах и крышах зданий. Дорогие отдельно стоящие молниеотводы применяются только при невозможности установки молниеотводов на конструкциях подстанции. В зону защиты должны также включаться пролеты линий между подстанцией и концевыми опорами. Защита этих пролетов осуществляется тросами линейных подходов, которые присоединяются к портальным конструкциям подстанций. Возможна также установка стержневых молниеотводов на концевых опорах при условии присоединения их заземления к общему заземляющему контуру подстанции.

Заземлители на станциях и подстанциях выполняются общими для обеспечения безопасности персонала, для заземления нейтралей трансформаторов и генераторов и для заземления молниеотводов, т. е. для целей грозозащиты. При поражении молниеотвода ток молнии, стекающий в заземление подстанции, вызывает на этом заземлении подъем потенциала $I_{\rm M}R_{\rm H}$, который может вызвать обратное перекрытие подстанционной изоляции. По правилам ПУЭ в электроустановках с большими токами замыкания на землю (подстанции 110 кв и выше) сопротивление заземляющего устройства R_{\sim} должно быть не более 0,5 ом. В настоящее время осуществляется пересмотр норм на сопротивления заземления подстанций, которые ставятся в зависимость от тока однофазного короткого замыкания или от напряжений прикосновения и шага при коротких замыканиях на подстанции. Заземление подстанции относится к классу протяженных заземлителей. Обычно заземляющее устройство подстанции выполняется в виде контурного заземлителя с равномерно распределенными по периметру контура вертикальными (трубчатыми или стержневыми) заземлителями и сеткой, выравнивающей потенциалы в пределах контура. Чем больше длина фронта волны тока молнии и удельное сопротивление грунта, тем больше площадь заземлителя, которая эффективно участвует в отводе тока молнии. Как и для всех протяженных заземлителей, эта эффективность может выражаться отношением U_l/U_0 , где U_0 и U_l — импульсные напряжения на заземлителе в точке присоединения молниеотвода и на расстоянии l от него. Для ориентировки можно указать, что на заземлителе размером $40 \times 40 \ M^2$ отношение $U_l/U_0 > 0,7$ при $t_{\Phi p} > 5 \div 6 \ Mcceck$ и $\rho > 200 \div 300 \ Om \cdot M$. Во всяком случае для улучшения отвода тока молнии всегда целесообразно сосредоточивать вертикальные заземлители вблизи молниеотводов.

При установке стержневых молниеотводов на портальных конструкциях трансформаторов, имеющих обмотки 6—35 кв, слабым звеном являются изоляции этих обмоток и соответствующая внешняя изоляция. В этих случаях на выводах обмоток 6—35 кв следует устанавливать вентильные разрядники. На напряжении 6—15 кв РВ устанавливаются непосредственно у ввода, на напряжении 20—35 кв — на расстоянии до 5—10 м от ввода.

Однако если трансформаторные обмотки присоединены к обмоткам генераторов, синхронных компенсаторов или двигателей высокого напряжения, то установка разрядников на этих обмотках недопустима из-за возможности заноса высоких потенциалов на обмотки машин при работе PB. В такой установке, однако, нет необходимости при выполнении шинопроводов трансформатор — генератор в заземленной оболочке (играющей роль клетки Фарадея). Если шинопровод выполнен открытым, установка молниеотводов на трансформаторных порталах недопустима.

Согласно ПУЭ сопротивление заземления подстанции с малыми токами замыкания на землю, т. е. подстанций 35 кв и ниже, должно определяться по формуле:

$$R_{\sim} \leq \frac{125}{I} \, om,$$

если заземляющие устройства одновременно используются для электроустановок с напряжением до 1 000 в и

$$R_{\sim} \leq \frac{250}{I} o.m,$$

если заземляющее устройство используется только для электроустановок напряжением выше 1000 в, где *I* — полный ток замыкания на землю. Во всех случаях сопротивление заземляющего устройства не должно быть выше 10 ом.

Установка молниеотводов на конструкциях ОРУ 35 кв и присоединение тросов, защищающих подходы линий 35 кв к конструкциям подстанции, допускается при условии, что расчетное сопротивление растекания R_{\sim} части заземления, расположенного в зоне 20—30 м от места присоединения молниеотвода к заземлителю, не превышает 4 ом. Если это условие не выдерживается, необходима установка отдельно стоящих молниеотводов, в защитную зону которых должны входить пролеты линий от портальных конструкций до концевых опор. Установка молниеотводов на конструкциях подстанций 35 кв и ниже возможна также в тех случаях, когда площадь подстанции столь мала, что входит в зону защиты РВ в отношении обратных перекрытий с заземления подстанции. Ориентировочно радиус этой зоны можно оценить в 5—10 м.

На электрических станциях и подстанциях, кроме защиты ОРУ (подстанции), необходима защита от прямых ударов молнии отдельно стоящими молниеотводами открытых шинопроводов (гибкой связн) между трансформаторами и генераторами, машинного зала открытого типа, а также взрывоопасных сооружений — зданий для хранения баллонов с водородом, ресиверов с водородом, электролизерной, ацетилено-генераторных установок. Эти объекты защищаются не только от прямых ударов молнии, но и от вторичных воздействий молнии в виде искрения от наведенных напряжений.

На станциях и подстанциях защищаются также здания, для которых прямой удар молнии представляет опасность в отношении пожаров и механических разрушений, — здания угледробилки, нефтехозяйства, маслохозяйства, дымовая труба, градирия. Эти объекты защищаются молниеотводами, установленными на самом сооружении, и токоотводами, проложенными по их стенам.

23-3. ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИОННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОТ ВОЛН, Набегающих с линий

При грозовом поражении проводов линии (в результате п. у. м. или обратного перекрытия) на подстанцию набегает волна напряжения, ограниченная импульсным разрядным напряжением линейной изоляции. Под действием импульсной короны фронт волны сглаживается. Обычно в расчетах принимают волну с косоугольным фронтом и

амплитудой, равной 50%-ному разрядному напряжению линейной изоляции.

Защита подстанционной изоляции от набегающих волн осуществляется вентильными разрядниками. Если разрядник установлен рядом с изоляцией (на расстоянии нескольких метров по ошиновке), то напряжение на разряднике равно напряжению на изоляции, а так как характеристнки PB скоординированы с импульсными ха-



Рис. 23-1. Простейшая расчетная схема для определения перепада напряжения Δu между РВ и изоляцией.

рактеристиками изоляции, то изоляция защищена от грозовых перенапряжений. Но на подстанциях разрядник должен защищать всю изоляцию ОРУ, в общем случае находящуюся на расстоянии *l* (считая по ошиновке) от разрядника. В этом общем случае между РВ и изоляцией возникает перепад напряжения Δu .

Зависимость Δu от параметров схемы и набегающей волны рассмотрим на простейшей схеме рис. 23-1. Изоляция в схеме замещена емкостью С. Допустим, что набегающая волна имеет косоугольную форму с фронтом длиной $t_{\rm dp}$ и крутизной фронта $a = U_0/t_{\rm dp}$. Волновой процесс в схеме можно разделить на две стадии — до и после срабатывания разрядника. До срабатывания PB волна проходит мимо PB без преломления. Напряжение на емкости в соответствии с табл. 18-1 ($z_2 = \infty$; $a_0 = 2a$) равно:

$$\mu_c = 2a [t - T (1 - e^{-t/T})],$$

где T = zC. Емкость C сглаживает фронт волны.

Напряжение на PB до прихода отраженной от емкости волны, т. е. до момента $t=2\tau$, где $\tau=l/c$, изменяется по закону $u_p=2at$. При



Рис. 23-2. Кривые напряжения на разряднике ир и изоляции ис в схеме на рис. 23-1. $t>2\tau$ напряжение u_p находится наложением волны 2at и отраженной от емкости волны.

Если пробивное напряжение искрового промежутка разрядника равно U_{пр}, то максимальное напряжение на емкости (изоляции), определенное по пробивному напряжению искрового промежутка, равно:

$$U_{CM}^{(l_1)} = U_{\Pi_{1}^{r_1}} + \Delta U.$$
 (23-1)

Значения ΔU определяются путем построения, приведенного на рис. 23-2.

В случае $U_{np} < u^*$ напряжение на изоляции не достигнет значения U_{np} . В этом сказывается благоприятный эффект емкости С. При временах $t > t^*$ напряжение на изоляции уже выше U_{np} . По мере заряда емкости С перепад напряжения между разрядником и изоляцией стремится к значению

$$\Delta U = 2a\tau. \tag{23-1a}$$

Из изложенного следует, что перепад напряжения ΔU тем меньше, чем меньше крутизна набегающей волны a и расстояние l, а также чем больше емкость защищаемой изоляции.

После пробоя искрового промежутка PB через рабочее сопротивление PB проходит импульсный ток i_p . С некоторым приближением можно принять, что фронт волны $u_{oct}(t)$ имеет косоугольную форму, причем его крутизна равна крутизне набегающей волны a, а длина $t_{\phi p} = U_{oct}/a$. Схема на рис. 23-1 может быть заменена расчетной схемой на рис. 23-3, a с источником косоугольного напряжения U_{oct} . Участок ошиновки t в этой схеме замещен П-образной схемой. Емкость C учитывает как емкость изоляции, так и половину ошиновки. Емкость второй половины ошиновки в П-образной схеме замещения оказывается отнесенной к стороне источника напряжения, в переходном процессе в схеме не

участвует и не показана. Индуктивность ошиновки $L = \frac{z}{c} l$, где z – вол-

новое сопротивление ошиновки. Так как в переходном процессе до пробоя искрового промежутка PB емкость C была заряжена до напряжения $U_{C0} = U_{CM}^{(1)}$, то это напряжение следует принять в качестве начального на емкости в схеме на рис. 23-3,*a*.
Источник напряжения Uocr, воздействуя на колебательный контур LC с периодом собственных колебаний $T = 2\pi \sqrt{LC}$, создает на емкости C импульсное напряжение u_c , показанное на рис. 23-3,6. Используя формулы § 20-4, находим при условии $t_{\rm dp} < T$ приближенное значение амплитуды напряжения по емкости:

$$U_{CM}^{(2)} = (U_{ocr} - U_{C0}) \left[1 + \frac{\sin \frac{\pi I_{\phi p}}{T}}{\frac{\pi I_{\phi p}}{T}} \right] + U_{C0}.$$
(23-2)

Напряжение $U_{CM}^{(2)}$ есть максимальное напряжение на емкости (изоляции) определенное по остающемуся напряжению на рабочем сопротивлении РВ.

При $U_{c0} \ll U_{ocr}$ кривая $U_{cw}^{(2)}/U_{ocr}$ в зависимости от отношения t_{dp}/T показана на рис. 18-4. В предельном случае $t_{\Phi p} = 0$ (прямоугольная волна) отношение $U_{CM}^{(2)} = 2$. С ростом $t_{\Phi P}$ и уменьшением T, т. е. со снижением расстояния l, отношение $U_{CM}^{(2)}/U_{ocr}$ спадает.

Максимальные значения $U_{CM}^{(1)}$ и $U_{CM}^{(2)}$ пределы кривой выдерживаемого напряжения изоляции. Формы этих кривых для внутренней изоляции трансформаторов и внешней изоляции были приведены на рис. 13-1 и 13-2. Обычно допустимое отношение U_{CM} к напряжению на разряднике U_{PB} не должно превышать 1,2-1,3. Это означает, что при заданном расстоянии l между PB и изоляцией необходимо ограничение (снизу) длины фронта волны t_{фр} или ограничение (сверху) крутизны фронта а. И, наоборот, при заданной крутизне необходимо ограничение расстояния l. Таким образом, разрядник на подстанции имеет определенную зону защиты, зависящую от характеристик изоляции и РВ и параметров набегающей волны.

23-4. РАСЧЕТНАЯ КРУТИЗНА ФРОНТА НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН. ПОКАЗАТЕЛЬ ГРОЗОЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИЙ

При прямом ударе молнии в провода или при обратном перекрытии в месте удара возникает волна, фронт которой может быть принят

практически прямоугольным. После пробега расстояния L фронт волны под действием импульсной короны удлиняется (§ 18-15) с нулевого значения до длины $t_{\Phi p} = B U_0 \frac{L}{c}$, где $U_0 -$ амплитуда набегающей волны, а крутизна фронта снижается с ∞ до $a = U_0/t_{\rm dp}$ или при подстановке $t_{\phi p}$ — до значения

$$a = \frac{1}{B\frac{L}{c}}.$$
 (23-3)

Предположим, что при выбранном месте установки разрядников на подстанции, т. е. при заданных расстояниях l от PB до изоляции,

не должны выходить за





расчетом установлено, что расчетная крутизна фронта набегающей волны не должна превышать адоп. Тогда из формулы (23-3) легко найти расчетную длину так называемой «опасной зоны» на линейном подходе т. е. зоны, в которой недопустимо появление прямоугольной волны:

$$L_{\mathbf{n}} = \frac{c}{a_{\text{gon}B}} \cdot 10^{-s}, \qquad (23-4)$$

где $c=300 \ m/mксек; B$ выражено в $1/\kappa e; a_{доп}$ — в киловольтах в микросекунду ($\kappa e/m \kappa ce \kappa$); L_{π} — в километрах (κm).

Очевидно, что линейные подходы на расстоянии $L_{\rm m}$ должны быть защищены от п. у. м. Защита осуществляется тросовыми молниеотводами. Линии с металлическими опорами обычно защищены тросами по всей длине, и может оказаться необходимым только улучшение защиты в опасной зоне. На линиях с деревянными опорами тросы подвешиваются лишь на линейных подходах, обычно на расстоянии 1—2 км от подстанции.

Защита тросами не исключает, однако, полностью возможности поражений проводов молнией. Как известно из гл. 26, возможно образование волн на проводах вследствие прорыва молнии через тросовую защиту или вследствие обратных перекрытий с опор на провода. Вероятность таких случаев характеризуется удельным числом грозовых перекрытий на линии.

Перекрытие изоляции в опасной зоне может повлечь за собой повреждение изоляции на подстанции. Обозначим через M ожидаемое число лет безаварийной работы изоляции подстанции (вследствие грозовых перенапряжений). Число M является сравнительным показателем грозозащиты подстанции. Если к подстанции приключено *s* линий с удельными числами перекрытий (на 100 км и один грозовой день), равными $n_{nep}^{i}(i=1, 2...)$, и если число грозовых дней в году в районе разложения подстанции равно n_{rl} , то

$$M = \frac{100}{L_{\rm n}} \frac{1}{\sum_{i=1}^{r_{\rm sp}} n_{\rm nep}^i}.$$
 (23-5)

Обычно стремятся к $M \approx 100 \div 1000$ лет (т. е. допускается одно грозовое перекрытие на 100—1000 подстанций в год). Верхние значения принимаются для подстанций СВН с наиболее дорогим оборудованием. Для обеспечения необходимого числа M должны быть соответственно снижены значения удельного числа грозовых перекрытий линий $n_{\rm пер}$ в опасной зоне $L_{\rm n}$.

Возможен и обратный расчет. При заданных M и $n_{\text{пер}}$ вычисляется длина опасной зоны L_{π} и по формуле (23-5) — расчетная крутизна $a_{\text{доп}}$, которая определяет предельно допустимое удаление PB от защищаемой изоляции, т. е. места установки PB на подстанции.

23-5. ЗАЩИТА ЛИНЕЙНЫХ ПОДХОДОВ К ПОДСТАНЦИИ

Как следует из формулы (23-5), показатель грозоупорности подстанции M повышается при снижении удельного числа грозовых перекрытий линий с тросами $n_{\text{пер.}}$. Практически при нормальных схемах защиты подстанций (см. § 23-6) длина опасной зоны $L_{\text{п}}$ не превышает 1—3 км. В этой зоне, которую мы будем называть линейным подходом к подстанции, следует стремиться к высокому уровню грозоупорности прежде всего за счет снижения импульсного сопротивления заземления опор до величин, не превышающих 10 ом. Башенные опоры с одним тросом имеют высокие удельные числа перекрытий. Поэтому на линиях с такими опорами иногда рекомендуют подвешивать на подходе к подстанции два троса. Более экономичным решением является усиление защиты подстанции путем увеличения числа PB и снижения тем самым расстояний между PB и защищаемой изоляцией.

На линиях 35—110 кв с деревянными опорами без троса подходы к подстанции на участке L_{π} длиной 1—2 км защищаются тросовыми



Плоскость нулевого потенциала

Рис. 23-4. Защита подходов к подстанции линии электропередачи на деревянных опорах.

молниеотводами (рис. 23-4). В начале защищенного подхода (со стороны линии) устанавливаются трубчатые разрядники PT_1 . Разрядники PT_1 ограничивают амплитуду и крутизну волны, набегающей на подстанцию. Трубчатые разрядники PT_1 должны защищать изоляцию подтросовой концевой опоры, на которой они установлены.

Внешние искровые промежутки PT_1 принимаются равными 100— 120 мм у разрядников 35 кв и 400—500 мм у разрядников 110 кв. Соответствующие значения импульсных разрядных напряжений при полной волне приведены в табл. 21-4. Разрядные напряжения PT_1 оказываются ниже тех значений, которые допустимы по условию ограничения импульсного тока в вентильных разрядниках, что облегчает условия работы последних.

Разрядники PT_1 срезают проходящую волну высокой амплитуды. Первый пик определяется разрядным напряжением PT_1 при малых временах срабатывания; после среза напряжение волны вновь возрастает за счет падения напряжения от импульсного тока на сопротивлении заземления и индуктивности заземляющего спуска PT_1 . Для снижения этого второго пика напряжения импульсное сопротивление заземления PT_1 рекомендуется принимать возможно малым и во всяком случае не выше 10 ом. Заземляющие спуски прокладываются по всем четырем ногам анкерной деревянной опоры, на которой установлен PT_1 , что снижает индуктивность спуска.

Дополнительные меры по защите линейных подходов, в частности на напряжении 35 кв, необходимы в случае высоких удельных сопротивлений почвы, когда не представляется возможным выполнение заземлителя PT_1 с $R_{\mu} = 10$ ом. В этом случае целесообразна установка на подходе дополнительного комплекта трубчатых разрядников PT_2 (рнс. 23-4). При прямом ударе молнии в начале подхода разрядник PT2 срабатывает под действием высокого напряжения на заземлении PT₁. Ток в заземлении PT₂ ограничивается индуктивностью участка линии между PT₁ и PT₂. В результате амплитуда набегающей на подстанции волны резко снижается. В схеме с РТ2 амплитуда набегающей на подстанции волны не растет при увеличении сопротивления заземления PT_1 .

Удар молнии в опору с РТ2 ведет к срабатыванию этого разрядника (обратному перекрытию), что эквивалентно уменьшению длины подхода на величину участка между РТ1 и РТ2. Однако вероятность такого поражения очень мала. Разрядники РТ₂ целесообразно устанавливать на третьей опоре защищенного участка. При установке РТ2 на второй опоре и п. у. м. в начале подхода значительная доля тока молнии через тросы отсасывается в заземление PT₂. Подпор напряжения на заземлении затрудняет срабатывание РТ2.

За последние годы в связи с упрощением схем электрических сетей получают распространение комплектные подстанции 35-110 кв, приключаемые на отпайке от линии электропередачи без выключателей на стороне высокого напряжения. Если такая подстанция приключается к линии на деревянных опорах (без троса), то допускается подвешивать тросы на подходах на длине до 200-300 м.

23-6. РАСЧЕТ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СХЕМАХ ПОДСТАНЦИИ

Простейшая расчетная схема, приведенная на рис. 23-1, используется в ряде практических случаев. Обычно же подстанции имеют разветвленную ошиновку с большим числом приключенной изоляции. Ручной

цепочки замещает 10 м ошиновки). В узлах включаются емкости оборудования и сопротивления отходящих линий z_л. Разрядники моделируются схемами с тиратронными коммутирующими элементами. В модели имитируются искровой промежуток и рабочее сопротивление с кусочно-линейной U-1 характеристикой. Блок-схема анализатора приведена на



Рис. 23-5. Блок-схема анализатора грозозащиты.

рис. 23-5.

расчет волновых процессов в подобных схемах чрезвычайно трудоемок. Поэтому в настоящее время для такого расчета используются модели-аналоги и цифровые вычислительные машины.

Модели - аналоги. Такие модели, предложенные автором этой книги, разработаны и выпускаются кафедрой ТВН ЛПИ под названием «анализатор грозозащиты подстанции». На анализаторе осуществляется физическое моделирование схем, причем линии и ошиновка заменяются цепочечными схемами LC (обычно одна ячейка

Для удобства работы с анализатором масштаб времени $m_t = t_{\text{модели}}/t_{\text{оригин}}$ принимают большим единицы (обычно $m_t = 10^3$). Масштаб напряжения $m_U = U_{\text{модели}}/U_{\text{оригин}}$ обычно выбирается таким, чтобы $U_{\text{модели}} = 200 \div 1000 \ B$. Независимым является также масштаб сопротивления ($m_R = R_{\text{модели}}/R_{\text{ориг}} = 1 \div 10$); остальные масштабы являются про-изводными.

На моделях-аналогах были проведены многочисленные исследования, и до последнего времени с их помощью решались основные задачи грозозащиты подстанций.

Расчеты на ЭЦВМ. В последние годы были разработаны методы и составлены программы по расчету волновых процессов на подстанциях на ЭЦВМ. Методика расчета, основанная на представлении волн рядом чисел и замене реактивных элементов *LC* линиями, была изложена в § 18-11 и 18-12.

Расчеты по составленной (В. С. Шатиным) программе на машине «Урал-2» или «Урал-4» для одного варианта грозозащиты подстанции занимают несколько минут. Преимуществом расчета на ЭЦВМ является возможность широкого варьирования параметров схемы, характеристик разрядников и параметров набегающих волн.

ЭЦВМ получают широкое распространение в проектных институтах и энергосистемах в основном для режимных расчетов, и расчеты грозозащиты подстанций на ЭЦВМ становятся доступными, не требуя какойлибо специальной аппаратуры.

На основе расчета волн на анализаторе или ЭЦВМ дается вывод о защищенности подстанции при заданной форме набегающей волны. Изоляция будет защищена, если волна напряжения на изоляции полностью ограничена кривой выдерживаемого напряжения (см. рис. 13-1 и 13-2).

23-7. ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ ВЕНТИЛЬНЫМИ РАЗРЯДНИКАМИ

Проектирование защиты подстанций начинаєтся с определения возможных мест установки РВ. С этой целью задаются показателем грозозащиты подстанции M (лет). По принятому M и известному удельному числу перекрытий линий n_i , используя зависимость (23-5), вычисляют расчетную длину подхода L_n . Если трос на линиях подвешен только на подходах, то L_n ограничена (сверху) длиной защищенного подхода. Используя зависимость (23-4), вычисляют расчетную крутизну фронта $a_{\rm pacч}$. Форма волны, набегающей на подстанцию, может приниматься весьма разнообразной. Часто в расчетах принимают косоугольную волну с крутизной фронта $a_{\rm pacч}$ и амплитудой, равной 50%-ному импульсному разрядному напряжению изоляции линии на подходе.

Далее расчет ведется на анализаторе или ЭЦВМ. Число приключенных линий принимается минимально возможным в летний период ремонтов. Место установки РВ выбирается из условия, чтобы волны во всех точках подстанции, в первую очередь на трансформаторах и на изоляции шин, не выходили за пределы, ограниченные кривыми выдерживаемых напряжений (см. рис. 13-1 и 13-2). Если желательно расширить зоны защиты РВ (и тем самым, например. сократить число РВ), то необходимо снизить удельное число перекрытий ВЛ на подходах путем улучшения их грозозащиты.

В ориентировочных расчетах возможно использование формул (23-1) и (23-2) для определения максимальных U_{CM} , которые сравниваются со значениями выдерживаемого напряжения при $t_p=2$ мксек. Так как формулы выведены для простейшей и наиболее жесткой схемы на

1

рис. 23-2, то найденное значение l умножают на коэффициент k, который принимается равным: для подстанций с одной приключенной линией (тупиковой) k=1; с двумя линиями k=1,25; с тремя и более линиями k=1,5.

В настоящее время на основе систематических расчетов грозозащиты типовых подстанций на анализаторах и ЭЦВМ подготавливаются рекомендации по зонам защиты РВ на подстанциях.

На подстанциях до 220 кв включительно разрядники обычно устанавливают на шинах или трансформаторных присоединениях. Когда на подстанции установлены автотрансформаторы, установка РВ на АТ присоединениях обязательна (см. § 16-5), и эти РВ используются также для защиты изоляции всей подстанции. Исключение составляют гидроэлектростанции, где распределительные устройства высокого напряжения обычно удалены на большие расстояния от трансформаторов, устанавливаемых на нижнем бьефе. В этих случаях вентильные разрядники устанавливаются около каждого из трансформаторов и на шинах распределительного устройства. Вентильные разрядники подключаются к шинам через разъединители. На подстанциях с двумя выключателями на присоединение вентильные разрядники устанавливаются на каждой системе шин. При делении шин на секции вентильные разрядники устанавливаются па каждой секции.

На подстанциях 330 кв и выше вентильные грозозащитные разрядники типа РВМГ устанавливаются на каждом трансформаторном присоединении вблизи трансформатора. Такая практика связана не только со стремлением повысить надежность грозозащиты трансформаторов, но и с условиями защиты трансформаторов от коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении холостых трансформаторов (см. гл. 26). Другое назначение РВ состоит в следующем. Как было показано в § 16-4, при перекрытии внешней изоляции волна на подстанции срезается и возникают колебания с глубоким переходом напряжения через нулевое значение (см. рис. 16-8). Эти колебания приводят к высоким градиентным перенапряжениям в обмотке. Рабочее сопротивление РВ демпфирует эти колебания и тем самым снижает градиентные перенапряжения. В связи с этим свойством РВ ставится вопрос о смягчении условий испытаний трансформаторов СВН срезанной волной или вообще об отказе от этих испытаний, что позволило бы удешевить трансформаторы.

На подстанциях СВН возможна установка на линейных присоединениях вентильных разрядников типа РВМК для ограничения коммутационных перенапряжений на линиях. Конструкция этих разрядников будет рассмотрена в гл. 28. Разрядники РВМК являются комбинированными, т. е. защищают оборудование от коммутационных и грозовых перенапряжений, поэтому они повышают надежность грозозащиты подстанции. Но вследствие дороговизны разрядников РВМК последние применяются только при необходимости ограничить коммутационные перенапряжения.

На трансформаторных и линейных присоединениях вентильные разрядники всех типов присоединяются к ошиновке без разъединителей. Ревизия РВ совмещается с ревизией всего присоединения.

23-8. ЗАЩИТА АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ПЕРЕХОДА ВОЛН

Как было показано в § 18-5, на свободной, т. е. отключенной выключателем, стороне автотрансформатора могут появиться опасные для его изоляции перенапряжения, связанные с переходом волн между обмотками. Поэтому вентильные разрядники должны устанавливаться на всех автотрансформаторно связанных обмотках, как это показано на рис. 23-6. Разрядники приключаются без разъединителя со стороны автотрансформатора (до выключателя и разъединителя). Для защиты от перехода волн расстояние от РВ до трансформатора не имеет значения (в пределах, возможных на подстанции). Это объясняется большим периодом развития колебаний в обмотках. Эти же разрядники одновременно служат для защиты изоляции всей подстанции.

При большем числе автотрансформаторов на подстанции требуется соответственно и большее число разрядников для их защиты. Поэтому целесообразен индивидуальный подход к защите автотрансформаторов.



Рис. 23-6. Защита обмоток автотрансформаторов от перехода волн.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Предположим, что автотрансформатор не имеет специальной защиты и PB установлены на шинах подстанции. Пусть волна перенапряжения, приходящая с линии BH (или СН), создала на разряднике BH (или CH) остаточное напряжение U_{0BH} (или U_{0CH}). Полагаем обмотку другой ступени напряжения — соответственно CH или BH — отключенной от шин и определим напряжение U_{CH} (или U_{BH}) на отключенной обмотке, возникающее в результате перехода волн между обмотками. Обозначим коэффициент перехода волны с обмотки BH на обмотку CH через a_{CH} , а с обмотки CH на обмотку BH через a_{BH} . Тогда с учетом фазных напряжений U_{ϕ} вн и U_{ϕ} сн справедливы следующие формулы (выведенные A. B. Сапожниковым):

$$U_{\rm CH} = a_{\rm CH} \left[1, 1U_{\rm 0BH} \pm U_{\rm \phi BH} \left(1 - \frac{1}{a_{\rm CH}k_{\rm T}} \right) \right];$$

$$U_{\rm BH} = a_{\rm BH} \left[1, 1U_{\rm 0CH} \pm U_{\rm \phi CH} \left(1 - \frac{k_{\rm T}}{a_{\rm BH}} \right) \right],$$
(23-6)

где $k_{\rm T} = U_{\rm \phi BH}/U_{\rm \phi CH}$ — коэффициент трансформации. Знак плюс или минус выбирается в зависимости от знака выражения в круглых скобках таким, при котором $U_{\rm CH}$ или $U_{\rm BH}$ максимально. Коэффициентом 1,1 при U_0 вводится некоторый запас в расчете.

Величины напряжений $U_{\rm CH}$ и $U_{\rm BH}$ должны быть сопоставлены с импульсными испытательными напряжениями при полной волне как для внутренней изолящии трансформаторов (испытание без гозбуждения), так и для внешней. Если $U_{\rm CH}$ (или $U_{\rm BH}$) оказываются меньшими $U_{\rm исп}$, то в установке PB специально для защиты обмотки CH (или BH) от перехода волн нет необходимости. Этот вывод, однако, не касается обмоток, которые необходимо защищать от коммутационных перенапряжений.

Пример 23-1. Определить необходимость установки PB для защиты обмоток автотрансформатора 220/110 кв с коэффициентами $a_{\rm CH}=0.6$ и $a_{\rm BH}=2.5$. Номинальное напряжение обмоток трансформатора 230 и 121 кв. На шинах подстанции установлены разрядники типа PBMГ. Остаточное напряжение РВМГ-220 и РВМГ-110 составляет 570 и 295 кв. Подставляем в формулы (23-6) численные значения ($k_{\tau}=230/121=1.9$; $U_{\Phi B II}=188 \ \kappa \epsilon_{Maxc}$; $U_{\Phi C II}=99 \ \kappa s$):

$$U_{\rm CH} = 0.6 \left[1.1 \cdot 570 \pm 188 \left(1 - \frac{1}{0.6 \cdot 1.9} \right) \right] = 390 \ \kappa s_{\rm Makc};$$
$$U_{\rm BH} = 2.5 \left[1.1 \cdot 295 \pm 99 \left(1 - \frac{1.9}{2.5} \right) \right] = 875 \ \kappa s_{\rm Makc}.$$

Сравниваем эти значения с импульсными испытательными напряжениями классов 110 и 220 кв, приведенными в табл. 13-1. Наименьшие значения имеют $U_{\rm всп}$ внешней изоляции: для класса 110 кв—460 кв, для класса 220 кв—900 кв. Для обеих ступеней воздействующие напряжения оказываются меньшими $U_{\rm всп}$. Поэтому возможен отказ от установки РВ на выводах автотрансформатора. Этот вывод несправедлив для атмосферных условий, существенно отличных от нормальных, например при большой высоте над уровнем моря.

Для проведения расчетов, подобных примеру 23-1, необходимо знание коэффициентов *a*_{CH} и *a*_{BH}. Сведения об этих коэффициентах можно получить от завода-изготовителя или произведя измерения на месте с помощью анализатора переходных процессов.

23-9. ЗАЩИТА АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ПО СОВМЕЩЕННОЙ СХЕМЕ

Автотрансформаторная схема соединения обмоток принципиально позволяет выполнять схему защиты, показанную на рис. 23-7, a. В этой схеме разрядники PB_2 и PB_1 выбираются на напряжения, соответствующие СН и разности ВН и СН. Так, например, для автотрансформатора 750/330 кв требуются разрядники РВМГ-420 и РВМГ-330.



Рис. 23-7. Защита обмоток автотрансформаторов совмещенными вентильными разрядниками.

a-схема включения PB; б-схема расчета напряжения U_{гаш} на PB.

Использование совмещенной схемы защиты связано, однако, со следущей особенностью. В случае короткого замыкания (вызванного грозовым перенапряжением) на стороне СН на разрядник *PB*₁ действует напряжение рабочей частоты, определяемое схемой на рис. 23-7,*б*. Если внешнее реактивное сопротивление *x*₈ мало, то это напряжение приближается к полному напряжению ВН, на которое разрядник *PB*₁ не рассчитан. В электропередачах 750—1 000 кв реактивное сопротивление линии обычно значиттельно превышает реактивное сопротивление автотрансформатора и напряжение на PB_1 не превышает его номинального значения (BH — CH).

Применение схемы на рис. 23-7 позволяет снизить стоимость защиты и выравнивает кривую первоначального распределения напряжения в обмотках СВН.

23-10. ЗАЩИТА РАЗЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛИ ГРАНСФОРМАТОРОВ

В целях снижения токов короткого замыкания часть трансформаторов в сетях с эффективно заземленной нейтралью (сети 110—220 кв) может иметь разземленную нейтраль. Падение волн по всем трем фазам ведет к появлению перенапряжений в нейтрали, достигающих 170— 190% амплитуды волн U₀ на линейных вводах.

Внутренняя и внешняя изоляция нейтрали такого трансформатора может выполняться на тот же класс напряжения, что и изоляция линейного конца обмотки, или на сниженный класс напряжения. В настоящее время трехфазные трансформаторы выпускаются только со сниженной изоляцией нейтрали. Во всех случаях защита нейтрали осуществляется вентильным разрядником на номинальное напряжение, соответствующее классу изоляции нейтрали. Для защиты пониженной изотрансформаторов нейтрали ляции 110 кв обычно устанавливаются разрядники 2×РВС-20, трансформаторов 220 кв — разрядники РВС-110.

Во время коммутационных операций неодновременность включения и отключения фаз трансформаторного выключателя или разъединителя может повести к срабатыванию разрядника в нейтрали и кратковременному воздействию на него фазного напряже-





1— главный трансформатор; 2— регуляровочный автотрансформатор; 3— возбуждающая обмотка.

ния сети. Разрядник в нейтрали должен гасить дугу сопровождающего тока при этом напряжении. Разрядники 2×PBC-20 и PBC-110 обычно удовлетворяют этому условию.

В сетях с изолированной нейтралью 35 кв выведенная нейтраль трансформаторов защищается разрядником, рассчитанным на максимальное напряжение рабочей частоты на линейном конце, поделенное на $\sqrt{3}$. Установка разрядника обязательна при включении в нейтраль дугогасящей катушки.

В настоящее время в электрических сетях широко применяется регулирование напряжения под нагрузкой. С этой целью в нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов включаются регулировочные трансформаторы, обычно по схеме на рис. 23-8. с реверсивным регулированием напряжения в пределах $\pm 10\%$ (или несколько выше). Для защиты изоляции регулировочного трансформатора между концом и началом обмотки каждой фазы включается разрядник, рассчитанный на максимальное рабочее напряжение, соответственно равное или большее 0,1 $U_{\rm ра6}$ разрядника, установленного на линейном выводе трансфор-24—641

матора. Обычно устанавливаются также разрядники на нейтральных выводах основного трансформатора (на рис. 23-8 показаны пунктиром). Однако эти разрядники оказываются «шунтированными» разрядниками на выводах вольтодобавочного трансформатора и поэтому играют роль резервной защиты.

Опасные перенапряжения могут возникать в регулировочных обмотках вольтодобавочных трансформаторов (бустеров). Схема такого



Рис. 23-9. Схема защиты вольтодобавочного трансформатора.

трансформатора приведена на рис. 23-9. Волна с амплитудой U_0 , набегающая со стороны высокого напряжения, ложится полностью на вольтодобавочную обмотку I-2; вывод 2, присоединенный к линии, сохраняет низкий потенциал. Волна в обмотке I-2 возбуждает в регулировочной обмотке I'-2' напряжение, примерно равное $k_T U_0$, где $k_T -$ коэффициент трансформации. Значение k_T близко к единице. Напряжение $k_T U_0$ в свою очередь возбуждает между концами 3-4 автотрансформатора напряжение $k_T I_0$. Коэффициент

трансформации $k_{\rm Tl} > 1$ и достигает максимума при сближении регулировочных контактов. Таким образом, на изоляцию регулировочной обмотки воздействует напряжение, превышающее амплитуду волны на стороне высокого напряжения, между тем как регулировочная обмотка выполняется с пониженным классом изоляции. Защита такой обмотки должна осуществляться вентильным разрядником.

Типы разрядников для защиты регулировочных и вольтодобавочных трансформаторов и места присоединения PB указываются заводами — поставщиками трансформаторов.

23-11. ЗАЩИТА СВОБОДНЫХ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

В некоторых случаях обмотки НН в высоковольтных трансформаторах остаются постоянно или длительно неприсоединенными к другим элементам сеги, иначе говоря, свободными. Свободные обмотки НН часто встречаются в автотрансформаторах, где эти обмотки играют роль компенсационных (рис. 23-10,*a*). В блоковой схеме на рис. 23-10,*b*



при выводе одного из генераторов в капитальный ремонт его трансформаторная обмотка НН остается длительно свободной. Встречаются и другие аналогичные случаи.

При воздействии грозовых волн со стороны ВН (или СН) возникает переход волн на обмотку НН. Опасен обычно емкостный переход волн. В эксплуатации наблюдались случаи перекрытия внешней изоляции НН вследствие этих переходов. Опасные переходы волн наблюдались не только при грозовых перенапряжениях, но и при коммутациях, например включениях трансформатора на стороне ВН.

Для защиты свободных обмоток НН на их выводах устанавливаются вентильные разрядники (рис. 23-10). Если свободные обмотки соединены в звезду, нейтраль звезды, кроме того, заземляется.

23-12. ЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ НА ОТКЛЮЧЕННЫХ ЛИНИЯХ

В некоторых редких случаях на подстанции осуществляется деление сети и создается схема коммутации, в которой линия остается постоянно отключенной со стороны данной подстанции. В этих случаях оборудование линейного присоединения со стороны линии остается незащищенным. Защиту линейного присоединения желательно осуществлять вентильными разрядниками; при напряжении до 220 кв возможно использование и трубчатых разрядников, поскольку в защищаемое оборудование не входят трансформаторы. Но при включенной линии работа РТ нежелательна, а согласование характеристик РВ и РТ для исключения такого срабатывания часто невозможно. Поэтому предпочтение следует отдавать защите присоединения с помощью РВ.

В обычных схемах, в которых все линии приключены к шинам подстанции, в защитную зону вентильных разрядников входит вся изоляция подстанции. Однако при грозе возможны автоматические отключения линии; при этом изоляция за линейным выключателем остается без защиты. Если вслед за отключением линии последует повторный грозовой разряд, возможны повреждения изоляции. Вероятность повторного разряда молнии в отключенную линию, если последняя оборудована устройством АПВ, невелика; кроме того, практически опасным является лишь относительно близкий к концу линии разряд. Поэтому в нормальных схемах специальная защита линейных присоединений не предусматривается.

23-13. ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ С ТРАНСФОРМАТОРНЫМИ КАБЕЛЯМИ

На гидростанциях иногда применяются схемы, в которых связь ОРУ с трансформаторами осуществляется длинными кабелями ВН. Такая схема, например, применена на Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС на напряжении 500 кв и Братской ГЭС на напряжении 220 кв. Конструкция ввода кабеля в трансформатор показана на рис. 16-24. В этой конструкции исключено присоединение РВ к выводам трансформаторной обмотки и, следовательно, защита обмотки должна осуществляться РВ, установленным в ОРУ. Так как длина трансформаторных кабелей может достигать сотен метров и даже километров, необходима специальная проверка грозозащиты трансформаторов (такие исследования выполнялись Л. Ф. Дмоховской).

Влияние кабеля на защитную зону РВ удобно изучать на схеме рис. 23-11. Набегающая волна испытывает в месте перехода в кабельную линию преломление. Вследствие малого волнового сопротивления кабеля ($z_{\rm K}$ =25÷15 *ом*) амплитуда волны снижается в 5—10 раз. Ка-24* бель в первый момент играет, следовательно, роль разрядника с весьма малым активным сопротивлением. Защитная зона такого «разрядника» охватывает всю подстанцию и предотвращает срабатывание PB. На конце кабеля амплитуда волны удваивается, но все же не достигает опасных значений. В процессе многократных отражений волн на кабельном участке кабель можно заместить емкостью

$$C_{\rm K} = \frac{1}{z_{\rm K} v_{\rm K}} l_h ,$$

где $v_{\kappa} = 150 \ \text{м/мксек}, \ l_{\kappa} - длина кабеля, \ \text{м.}$ (Возможность замещения емкостью определяется соотношением $z_1 \gg z_{\kappa} \ll z_{\tau p}$). При $z_{\kappa} = 20 \ \text{ом}$ и $l_{\kappa} = 600 \ \text{м}, \ C_{\kappa} = 0,2 \ \text{мк}\phi$. Постоянная времени заряда такой емкости T =



Рис. 23-11. Защита трансформаторов с кабельными вводами.

 $=z_1 C_{\kappa} = 300 \cdot 0, 2 = 60$ жксек. С этой постоянной времени нарастает напряжение на фронте волны. При столь пологом фронте напряжение на всей подстанции оказывается существенно выравненным. В момент срабатывания PB (если оно происходит) напряжение на трансформаторе определяется по формуле

$$U_{\tau_{\rm I}} = U_{\pi_{\rm I}} + \frac{z_{\kappa}}{z_{\rm I}} (2U_{\rm 0} - U_{\pi_{\rm I}}), \qquad (23-7)$$

где U_{пр} — импульсное пробивное напряжение PB;

U₀ — падающая волна;

*z*_к, *z*₁ — волновые сопротивления кабеля и линии (рассматривается тупиковая схема подстанции).

Разряд большой емкости кабеля через РВ приводит к прохождению через РВ больших импульсных токов, доходящих до 10—15 ка. При большом числе кабелей на подстанции или их большой длине емкость C_{κ} может ограничить амплитуду волны до безопасных пределов и РВ не сработает.

Для ограничения коммутационных перенапряжений разрядник необходимо установить за выключателем так, как показано на рис. 23-11. Схемы типа показанной на рис. 23-11 применяются на самых мощных и ответственных ГЭС, поэтому желательна проверка схем грозозащиты на анализаторах или ЭЦВМ.

23-14. ЗАЩИТА ВЫСОКОГОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Оборудование по ГОСТ-1560 (см. табл. 13-1) имеет импульсные разрядные напряжения, скоординированные с характеристиками РВ при условии установки оборудования на высотах до 1 000 *м* над уровнем моря. На больших высотах импульсные разрядные напряжения внешней изоляции снижаются и необходим выпуск или специального оборудования или вентильных разрядников с улучшенными защитными характеристиками. Такие РВ должны изготовляться по индивидуальным техническим условиям в зависимости от высоты расположения подстанции. Защита облегчается благодаря тому, что, как видно из рис. 19-5, токи молнии, а следовательно, и токи в вентильных разрядниках существенно снижаются с высотой.

При отсутствии оборудования с повышенным уровнем внешней изоляции или специальных PB возможна защита подстанций защитными промежутками (ПЗ) или трубчатыми разрядниками (PT). Разрядные напряжения ПЗ и PT при снижении атмосферного давления снижаются в той же мере, как и внешней изоляции, так что необходимая координация изоляции сохраняется. Вентильные разрядники в этом случае могут служить для снижения коммутационных перенапряжений и тем самым предотвращать частые срабатывания ПЗ или PT.

23-15. ЗАЩИТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 3—10 кв подстанций напряжением 35 кв и выше

Распределительные устройства 3—10 кв подстанций 35 кв и выше защищаются вентильными разрядниками, которые устанавливаются на шинах РУ (обычно в одной ячейке с трансформаторами напряжения) и на выводах крупных силовых трансформаторов.

Подходы линий 3—10 кв, как правило, не защищаются молниеотводами. Ограничение амплитуд и крутизны волн, набегающих с линии, осуществляется трубчатыми разрядниками, которые устанавливаются на расстоянии 200 м от ввода в подстанцию. Сопротивление заземления PT_1 не должно превосходить 10 ом.

В том случае, когда воздушная линия приключена к подстанции через кабельную перемычку длиной в несколько десятков метров и более, трубчатые разрядники устанавливаются на опоре с кабельной муфтой (для ее защиты) и на расстоянии 200 *м* от этой опоры.

23-16. ЗАЩИТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 3-10 кв

Закрытые и открытые (столбовые) трансформаторные подстанции распределительных сетей 3—10 кв защищаются вентильными разрядниками, установленными на сборке или на приемной конструкции. Полевые измерения показали, что импульсные токи в вентильных разрядниках распределительных сетей только в очень редких случаях превосходят 10 кв. Это объясняется сравнительно малой удельной поражаемостью линий 3—10 кв, часто проходящих по застроенной местности и имеющих малую высоту. Малая вероятность больших импульсных токов и сравнительная дешевизна разрядников позволяют отказаться от защиты линейных подходов к подстанциям. При этом также учитывается, что разрядники на подстанциях распределительных сетей устанавливаются в непосредственной близости от трансформаторов. Отсутствие перепада напряжений между РВ и трансформаторами делает излишними и меры по ограничению крутизн волн, набегающих с линии.

Вентильные разрядники могут быть заменены трубчатыми разрядниками типа РТВ. Такая возможность объясняется пологой импульсной характеристикой разрядников 3—10 кв; практика показала, что трубчатые разрядники с характеристиками, аналогичными характеристикам разрядников типа РТВ, удовлетворительно защищают изоляцию подстанций распределительных сетей, включая изоляцию трансформатора.

Рекомендуется также защищать трансформаторы с вторичной стороны посредством установки разрядников низкого напряжения.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Подстанция 220 кв замещается схемой на рис. 23-1. Параметры схемы: $C==2\,000$ $n\phi;\ l=75$ м; разрядник типа PBC-220. Набегающая волна косоугольная с амплитудой $U_0=900$ кв и длиной фронта $t_{\phi\,p}=2$ мксск. Определить максимальные напряжения на изоляции (емкости) по пробивному напряжению искрового промежутка РВ и по остаточному напряжению на рабочем сопротивлении РВ. Будет ли защищена внутренняя и внешняя изоляция трансформатора (емкость С)?

2. К шинам подстанции 220 кв приключены три линии на башенных опорах с одним тросом (см. пример 22-2). Число грозовых дней в году n_{rp} =30. Число лет безаварийной работы подстанции принято M=100. Определить длину опасной зоны L_{π} и расчетную крутизну фронта набегающей волны.

3. Покажите схемы защиты линейных подходов к подстанциям для ВЛ на деревянных опорах. Объясните назначение РТ на подходах.

4. Какая защита устанавливается на подстанции (станции): а) от п. у. м., б) от набегающих волн? Объясните назначение всех РВ, устанавливаемых на под-станции. В каких случаях необходима установка РВ на подстанции? В каких случаях необходима установка РВ или РТ на вводе линий?

5. Определите необходимость установки РВ для защиты обмоток автотрансфоробмоток трансформатора 363 и 220 кв. На шинах подстанции установлены разрядники типа РВМГ. Подстанция расположена на высоте H=200 м; t^oмакс=40° C. 6. Объясните особенности защиты подстанций ГЭС с длинными трансформатор-

ными кабелями.

7. Как выполняется защита РУ 3-10 ка и подстанций 3-10 ка распределительных сетей?

Глава двадцать четвертая

ЗАЩИТА ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН

24-1. ПРИСОЕДИНЕНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН К ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ

При передаче энергии на генераторном напряжении по экономическим соображениям иногда стремятся отказаться от кабельных линий в пользу воздушных. В этих случаях возникает проблема защиты вращающихся машин от атмосферных перенапряжений.

В недавнем прошлом аппаратура и схема защиты машин не были достаточно надежны. В связи с этим РУ по защите от перенапряжений издания 1954 г. ограничивали мощность генераторов, для которых допускалось приключение к воздушным линиям, значением 12 Мвт. Такое ограничение относится к годам, когда максимальные мощности генераторов не превосходили 50-100 Мвт.

В настоящее время возможности надежной защиты изоляции генераторов резко возросли. На районных станциях становятся типовыми машины мощностью 200-300 Мвт. В этих условиях следует признать вполне возможным при наличии резерва приключение воздушных линий к генераторам мощностью 25 Мвт или даже выше, что в ряде случаев дает большой экономический эффект.

Основное внимание в проблеме грозозащиты вращающихся машин уделяется генераторам. Но аналогичная проблема возникает и при защите двигателей, если к шинам приемной подстанции приключены воздушные линии и двигатели высокого напряжения.

24-2. ЗАЩИТА ИЗОЛЯЦИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН ОТ ВОЛН, НАБЕГАЮЩИХ С ЛИНИЙ

Как и при защите подстанционной изоляции, основная защита изоляции машин осуществляется вентильными разрядниками. Уровни изоляции машин, определяемые их испытательными напряжениями, невысоки, и для защиты этой изоляции потребовалась разработка специальных PB с улучшенными защитными характеристиками. Современные машинные разрядники имеют искровые промежутки (ИП) с магнитным дутьем и с емкостно-омической шунтировкой, снижающей коэффициент импульса ИП до 0,7—0,8; вилитовые диски в PBM специально отбираются по признаку наилучших защитных характеристик. Характеристики машинных разрядников типа PBM приведены в табл. 21-1.

Импульсные токи в РВМ при надлежащей защите подходов (см. § 26-3) ограничиваются до 3—5 ка. Таким токам соответствуют импульсные напряжения (2,7÷3) $U_{\rm H}$, где $U_{\rm H}$ — номинальное напряжение машины. Уровни изоляции машины в эксплуатации задаются профилактическими испытаниями. Для машин, приключенных к воздушным линиям, испытагельные напряжения должны приниматься по крайней мере 1,7 $U_{\rm H}$ на переменном напряжении и 3,0 $U_{\rm H}$ на выпрямленном напряжении.

Кроме воздействия на главную изоляцию, атмосферные перенапряжения воздействуют на междувитковую (и междукатушечную) изоляцию машин. В § 17-6 было указано, что для защиты продольной изоляции необходимо ограничение крутизны набегающих волн до 5— 6 кв/мксек (сравните с ограничением крутизны волн, набегающих на подстанции). Еще более глубокое ограничение крутизны, примерно до 2 кв/мксек, необходимо для устранения подъема напряжения на изолированной нейтрали машины.

Для снижения крутизны набегающих волн вблизи машин устанавливаются конденсаторы общей емкостью 0,25—0,5 *мкф* на фазу. В качестве емкости на шинах станции обычно применяются «косинусные» конденсаторы типа КМ.

Разрядники PBM, стоимость которых относительно мала, устанавливаются около каждого генератора большой мощности. Один комплект PBM и конденсаторы устанавливаются на шинах. Исключение составляют схемы, в которых к шинам генераторного напряжения приключено большое количество длинных кабельных линий (не переходящих в воздушные линии) и только одна-две воздушные линии. В этом случае на шинах устанавливаются только PBM, возможно ближе к линейным присоединениям. Если суммарная емкость кабельных линий на длине 75 *м* от их ввода превышает 1—2 *мкф*, надобности в установке конденсаторов для ограничения крутизны набегающих волн нет.

В случае, если нейтраль машины выведена, ее защита может осуществляться емкостью порядка 2—3 *мкф* или вентильным разрядником, рассчитанным на фазное номинальное напряжение машины. В этом случае ограничение крутизны набегающих волн необходимо только по условиям защиты междувитковой изоляции машин, и емкости на шинах (или выводах машин) могут быть снижены до 0,1—0,25 *мкф* на фазу. Если обмотка машины одновитковая и изоляция между витками не ниже изоляции на корпус, то в такой защите вообще нет необходимости. Основной целью защиты линейных подходов к шинам станции является ограничение импульсного тока в PBM до относительно малых значений в 3—5 ка. С этой целью необходимо ограничение амплитуды набегающих волн и такое выполнение защиты подхода, которое бы предотвращало нарастание тока в PBM в процессе многократных отражений волн на подходе (см. § 18-10).



Рис. 24-1. Защита вращающихся машин при воздушных линейных подходах. а — при защите подходов стержневыми молниеотводами; б — при защите подходов тросовыми молниеотводами.

В случае приключения к шинам станции нереактированной воздушной линии защита линейного подхода выполняется по схемам на рис. 24-1. Участок линии вблизи станции защищается от п. у. м. стержневыми или тросовыми молниеотводами с возможно более высоким защитным уровнем. Защита стержневыми молниеотводами обеспечивает практически полную грозоупорность подхода. При защите подхода тросами опоры должны иметь деревянные траверсы и сопротивления заземления $R_{\rm M}$ порядка 5 ом. В начале защитного подхода (со стороны линии) устанавливается комплект трубчатых разрядников с возможно малым сопротивлением заземления.

На рис. 24-2 приведены кривые, позволяющие дать оценку импульсным токам в вентильных разрядниках в зависимости от длины подхода и сопротивления заземления РТ для схем на рис. 24-1. На оси ординат отложены значения токов в трех фазах вентильных разрядников, отнесенных к току молнии в РТ. Кривые построены на основе методики расчета, изложенной в § 18-9, и опытов на модели. При одних и тех же *l* схема с тросовой защитой подхода в большей степени снижает импульсные токи в РВМ. Это объясняется растеканием тока молнии в начале подхода по ряду заземлений опор. Задаваясь током молнии $I_{\rm M}$ и ограничивая токи в вентильных разрядниках величиной $3I_{\rm p}=3\cdot3\,000=9\,000\,a$ или $3\cdot5\,000=15\,000\,a$, можно выбрать импульсное сопротивление заземления РТ и длину защищенного подхода.

Пример 24-1. Определить длину подхода L_{μ} в случае защиты тросовыми и стержневыми молниеотводами, если принято $I_{M} = 60$ ка; $I_{p} = 3$ ка; $R_{\pi} = 5$ ом.

Определяем $\frac{3I_p}{I_M} = \frac{9}{60} = 0,15$. По кривым на рис. 24-2 находим $L_n = 600$ м при защите стержневыми молниеотводами и $L_n = 450$ м при защите тросовыми молниеотводами.

На расстоянии примерно 200 м от РТ желательно выполнение зашитного промежутка ПЗ по типу, приведенному на рис. 22-12. промежуток Такой снижает импульсные токи 0.4 в разряднике РТ. На вводе линии до линейного выклю-0,35 чателя устанавливаются вентильные разрядники типа 0,3 РВС или РВП.

Применение трубчатых разрядников на подходе к подстанции ограничивается безопасными для генераторов станции ударными токами короткого замыкания. Периодическая составляющая тока короткого замыкания $I''_{\kappa,3}$ (определенная по x''_d) для турбогенераторов не должна превышать

$$I''_{\text{K},3} \leq \frac{0.625}{x''_d} I_{\text{H}}, \quad (24-1)$$

где $I_{\rm H}$ — номинальный ток генераторов станции. [Значение согласно формуле (24-1) допускается по условиям динамической устойчивости обмоток при несинхронном АПВ.]

нереактированных Ha *I*"_{к,3} на вводе и линиях вблизи ввода в РУ станции всегда больше допустимого. Установка РТ на вводе литакже недопустима нии среза крутого вследствие волны вблизи генератора. Если ток короткого замыкания в начале защищенного подхода (в месте установки РТ) превышает допустимые значения, то следует повысить длину подхода или за-менить РТ вентильным раз-



Рис. 24-2. Зависимость импульсного тока в вентильных разрядниках $3I_p$ от сопротивления заземления трубчатых разрядников в начале подхода при разных длинах защищенного подхода.

а — для схемы на ряс. 24-1,а; б → для схемы на рис. 24-1,6.

рядником. Вследствие малого падения напряжения на активном сопротивлении РВ по сравнению с падением напряжения на заземлении (при больших токах молнии) кривые на рис. 24-2 остаются при этом в силе.

Высоким защитным действием обладает схема, приведенная на рис. 24-3, с кабельными вставками длиной около 100 *м* и более на подходе к станции и реакторами на линейных присоединениях. Защитнос действие кабельной оболочки было изучено в § 18-12. При срабатывании трубчатого разрядника РТ в месте перехода воздушной ли-



Рис. 24-3. Схема защиты машин при воздушных линейных подходах, снабженных реактированными кабельными вставками.

нии в кабельную происходит вытеснение импульсного тока на оболочку кабеля. Жилы кабеля приобретают потенциал оболочки. По мере продвижения волны и стекания импульсного тока в землю потенциал оболочки и соответственно жилы снижается. На конце кабельного участка включено малое сопротивление заземления станции; падение напряжения *iR* на нем уже очень мало.

Указанное защитное действие кабельной оболочки проявляется, однако, только при срабатывании трубчатого разрядника *PT*₁, электрически соединяющего жилы с оболочкой. Но как раз срабатывание *PT*₁, установленного в месте перехода воздушной линии в кабельную, затруднено вследствие малого волнового сопротивления кабеля, приводящего к резкому снижению амплитуды волны при ее переходе с воздуш-

ной линии на кабель
$$\left(\mathbf{z} = \frac{2z_{\mathbf{k}}}{z_{\pi} + z_{\mathbf{k}}} = 0, 1 - 0, 05 \right).$$

Поэтому на расстоянии одного-двух пролетов от кабельной муфты (т. е. 50—100 м) устанавливают еще один комплект трубчатых разрядников РТ2, заземление которого объединяется через грозозащитный трос с заземлением РТ1 (рис. 24-3). Трос может быть подвешен как над проводами, так и под ними (в последнем случае он называется противовесом). Роль троса заключается в следующем. При прохождении через заземление PT2 тока молнии напряжение I_мR_и возбуждает токи в рабочем проводе и в противовесе. Соответствующая схема замещения приведена на рис. 24-4. Индуктивности L_{пр} и L_{тр} связаны взаимной индуктивностью М. Ток в противовесе индуктирует в проводе э. д. с. dirp E = -Mпрепятствующую проникновению тока в жилы кабеля. Таким образом, трос способствует проявлению защитного действия кабельной оболочки.

Как указывалось, срабатывание PT_2 может происходить на крутом фронте набегающей волны. При пологом фронте отраженная от кабеля волна снижает напряжение в месте включения PT_1 и PT_2 и оба разрядника могут не сработать. В этом случае проявляется благоприятное действие индуктивности реактора на вводе линии. В результате многократных отражений кабель на схеме рис. 24-3 может быть замещен

сосредоточенной емкостью. Индуктивность реактора препятствует нарастанию импульсного тока в РВМ и одновременно вызывает колебания напряжения на емкости кабеля $C_{\rm R}$. В результате этих колебаний при достаточной амплитуде набегающей волны происходит срабатывание трубчатых разрядников в начале кабельного участка и вступает в действие защитный эффект кабельной оболочки. Реактор, кроме того, снижает токи короткого замыкания до значений, позволяющих безопасно устанавливать *РТ* [см. формулу (24-1)]. Защита самого реактора обеспечивается разрядником *PBC*.

В схемах с кабельными вводами, но без реакторов трубчатые разрядники в на-



Рис. 24-4. Схема замещения, поясняющая роль троса на участке между *PT*₁ н *PT*₂ в схеме на рис. 24-3.

чале кабельного участка при пологом фронте волны могут не сработать. Поэтому защита таких подходов осуществляется по схеме на рис. 24-5, в которой воздушный подход защишается так же, как и в отсутствие кабельного ввода (см. схему на рис. 24-1). На вводе кабеля со стороны линии устанавливается комплект вентильных разрядников PB, желательно типа PBC. Их срабатывание вследствие низкого разрядного напряжения искровых промежутков более вероятно, чем сраба-



Рис. 24-5. Схема защиты машин при воздушных линейных подходах, снабженных нереактированными кабельными вставками.

тывание РТ. Кроме того, кабельный участок незначительно ограничивает токи к. з., и поэтому установка РТ нежелательна. Срабатывание РВ приводит в действие защитный эффект кабельной оболочки, однако не в полной мере вследствие включения между жилой и оболочкой активного сопротивления РВ.

Оценивая приведенные защитные схемы, отметим, что схема с кабельными вводами и реакторами (рис. 24-3) является наиболее совершенной. При ее использовании возможно подключение воздушных линий к шинам станции с генераторами мощностью до 25 Мвт, а в случае, если защита усиливается, то и с более мощными генераторами. Наименьшим защитным действием обладают схемы, показанные на рис. 24-1.

24-4. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ ОТ ИНДУКТИРОВАННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Целью грозозащиты генераторов является не только ограничение атмосферных перенапряжений, воздействующих на изоляцию генераторов, до величин, соответствующих испытательным напряжениям, но и всемерное снижение вероятности появления перенапряжений заданной



амплитуды. Такой подход способствует повышению надежности работы генераторов. В промежуток между испытаниями изоляции имеется некоторая вероятность снижения пробивной прочности изоляции машины. Чем меньше вероятность появления перенапряжений заданной амплитуды, тем меньше и вероятность пробоя изоляции.

С этой точки зрения мы должны в первую очередь обратить внимание на наиболее частые индуктированные перенапряжения.

Рис. 24-6. Емкостная защита от индуктированных перенапряжений.

Вентильные разрядники ограничивают амплитуду перенапряжения до уровня пробивного напряжения искрового промежутка $U_{\rm np}$ вентильного разрядника. Вероятность возникновения индуктированных перенапряжений с амплитудой $U < U_{\rm np}$ может снижаться емкостями.

При составлении методики расчета индуктированных перенапряжений на длинных линиях передачи обычно исходят из условия растекания связанных зарядов по линии при компенсации зарядов в канале молнии (см. § 22-2). В данном случае эта методика может быть существенно упрощена и, что особенно важно, основана на данных полевых измерений. При включении на конце относительно короткой линии большой емкости C (рис. 24-6) можно считать, что перенапряжение на емкости u_C (и генераторе) равно:

$$U_c = \frac{q}{C + C_\pi},\tag{24-2}$$

где q — полный заряд, высвобождающийся на линии при распаде электрического поля облака и лидерного канала.

В значение С входят емкости всех коротких кабельных участков воздушных линий, а также емкости кабельных линий, приключенных к станции на участках ~750 м от шин станции. Для оценки заряда q можно использовать измерения вертикальной напряженности электрического поля E_{\perp} на поверхности земли под облаками во время грозы. Максимальные зарегистрированные значения E_{\perp} были близки к 300 кв/м.

До разряда грозового облака накапливаемые на линии заряды противоположного знака приводят потенциал линии к нулевому значению. При разряде облака разрушается его электрическое поле и заряды на проводах повышают потенциал линии. Расчет для изолированной линии дает следующую формулу для индуктированного перенапряжения:

$$U_{\text{usg}} = \mathcal{E}_{\perp} h_{\text{ff}} f(l) \approx 300 h_{\text{ff}} f(l), \qquad (24-3)$$

где $f(l) = \frac{H}{\sqrt{H + (l/2)^2}}$ учитывает растекание заряда по линии длиной *l* вследствие неоднородности электрического поля облака вдоль линии. Высота облака над землей *H* принимается равной 1000 м.

Снижение $U_{\text{инд}}$ до значения испытательного напряжения статорной обмотки машины $U_{\text{исп}}$ можно осуществить включением на станции емкости *C*, величина которой легко определяется по формуле:

$$U_{\mu c \pi} = 300 h_{\pi p} - \frac{C}{C + C_{\pi}} f(l), \qquad (24-4)$$

где C_л — емкость воздушной линии.

Если от станции отходит несколько линий, обычно располагающихся близко друг от друга, можно предположить с известной осторожностью, что максимальные значения E_{\perp} наблюдаются одновременно на всех линиях. Тогда при длинах линий, равных $l_i(i=1, ..., s)$, формула (24-4) приобретает вид:

$$U_{\rm BC\,II} = 300 h_{\rm Hp} \sum_{i=1}^{s} \frac{C_{\pi i}}{C + C_{\pi i}} f(l_i).$$
(24-5)

Пример 24-2. К шинам станции 6,6 кв приключено две линии длиной 1 и 3 км со средней высотой подвески провода $h_{\pi,p}=6$ м. Определить необходимое значение C, приняв $U_{\pi,c\pi}=20$ кв и емкость линий равной 0,0045 мкф/км.

Вычисляем f(l), равную 0,9 и 0.55 соответственно для линий длиной 1 и 3 км. Подставляя эти цифры в формулу (24-5), находим $C \approx 1,0$ мкф.

Приведенный пример показывает, что для существенного ограничения индуктированных перенапряжений необходимо увеличение емкости C по сравнению со значениями, выбранными исходя из ограничения крутизны набегающих волн (0,25—0,5 *мкф* на фазу). Это увеличение практически легко реализуется, так как при использовалии косинусных конденсаторов для снижения максимальных $U_{\rm пнд}$ до безопасных пределов обычно достаточно установки одной-двух банок на фазу.

24-5. ЗАЩИТА МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Схемы защиты генераторов малой мощности упрощаются в первую очередь путем отказа от защиты воздушных подходов стержневыми или тросовыми молниеотводами при сохранении остальной защиты, в том числе воздушных противовесов. Сказанное в § 24-3 относительно необходимости замены РТ вентильными разрядниками в случае опасения за механическую прочность обмотки при ударных токах короткого замыкания остается в силе. На шинах станции устанавливаются вентильные разрядники РВМ и конденсаторы.

Защита двигателей высокого напряжения малой мощности, например на торфоразработках, осуществляется только разрядником и конденсатором. Только конденсаторная защита в состоянии обеспечить защиту двигателей от индуктированных перенапояжений, которые составляют основную массу атмосферных перенапряжений.

24-6. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СВЯЗИ С воздушными линиями

Как было показано в § 16-5, волны атмосферного происхождения могут переходить через трансформаторные связи. Амплитуда переходных волн для трансформатора с соединением обмоток χ/Δ при воздействии волны напряжения U_0 на одну фазу со стороны высокого напряжения и свободных обмотках низкого напряжения примерно равна U_0 го h косфериционт трансформации

 $\frac{U_{\bullet}}{\sqrt{3}k_{\tau}}$, где k_{τ} — коэффициент трансформации.



Напряжение может возрасти вдвое вследствие развития колебаний на генераторном напряжении. Однако волновое сопротивление обмоток генератора сглаживает эти колебания, в результате чего перенапряжения не достигают опасных значений. Современная теория и практика показывают, что защита трансформаторов со стороны высокого напряжения служит одновременно и надежной защитой генераторов.



Рис. 24-8. К задаче 4.

Перенапряжения, точнее индуктированные перенапряжения, могут появиться на генераторах, связанных с трансформаторами гибкими воздушными шинопроводами. При этом предполагается, что шинопроводы защищены от п. у. м. стержневыми молниеотводами (рис. 24-7, a).

Расчетным случаем является разряд в молниеотвод. Величины емкости, необходимые для ограничения перенапряжений до допустимых значений в зависимости от длины перемычки l и расстояния между перемычкой и молниеотводом b, показаны на рис. 24-7,d. Даже при b=5 м и l=100 м $C_{\rm m}$ не превышает 0,3 мкф на фазу. Обмотки мощных генераторов имеют емкость указанного порядка, и тогда надобность в дополнительных конденсаторах отпадает.

При выполнении перемычки закрытым шинопроводом защиты генераторов от индуктированных перенапряжений не требуется.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Какими средствами осуществляется координация между изоляцией обмоток вращающихся машин и воздействующими волнами атмосферных перенапряжений?

2. Опишите схемы защиты линейных подходов: a) с воздушным вводом; б) с кабельным вводом; в) с кабельным вводом и реактором.

3. Каким образом можно снизить амплитуды индуктированных перенапряжений? Как можно обосновать использование этой дополнительной защиты?

4. Постройте схему защиты станции, приведенной на рнс. 24-8. Расчетный ток молнин I_м = 80 ка.

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С ростом номинальных напряжений и дальности электропередач, а также в связи с успехами в ограничении атмосферных перенапряжений внутренние перенапряжения начинают играть все бо́лышую роль в установлении уровней изоляции электрических установок. Проведенные в последние годы рядом организаций в Советском Союзе и за границей подробные исследования внутренних перенапряжений различного вида позволили выявить основные коммутационные и аварийные режимы, сопровождающиеся появлением перенапряжений. Исследованные перенапряжения можно разбить на следующие две основные группы:

I. Коммутационные перенапряжения, существенно связанные с переходным процессом, возникающим в результате «коммутации», понимая под этим термином любое включение или отключение в электрической системе, вызванное работой выключателей, короткозамыкателей, предохранителей (коммутационной аппаратуры), а также при дуговых замыканиях на землю.

II. Резонансные перенапряжения, существенно связанные с установившимися резонансными колебаниями в системе, в симметричной или несимметричной ее схеме.

В свою очередь, каждая из этих групп содержит различные виды перенапряжений, классификация и наименование которых необходимы для дальнейшего изложения.

К группе «коммутационные перенапряжения» относятся:

1) перенапряжения при отключении емкостной нагрузки — ненагруженных длинных линий и конденсаторных батарей;

2) перенапряжения при включении длинных линий, в частности при автоматических повторных включениях (АПВ);

3) перенапряжения при отключении малых индуктивных токов, в частности при отключении ненагруженных трансформаторов, асинхронных двигателей и реакторов. Перенапряжения при включениях и отключениях могут развиваться как в симметричном режиме работы системы, так и при несимметричных коротких замыканиях; в последнем случае перенапряжения обычно выше;

4) перенапряжения при дуговом замыкании на землю и неустойчивом характере дуги в сетях с изолированной и компенсированной нейтралями.

К группе «резонансные перенапряжения» относятся:

 резонансные перенапряжения на рабочей частоте, возникающие в дальних электропередачах в симметричных и несимметричных режимах;

2) перенапряжения вследствие самовозбуждения вращающихся машин в симметричном режиме;

 перенапряжения на высших гармониках в несимметричных режимах; 4) феррорезонансные перенапряжения на высших или низших гармониках, обусловленные нелинейными параметрами цепей со сталью.

Приведенная классификация имеет условный характер в том смысле, что в ряде случаев, вполне реальных для электрической системы, могут возникать перенапряжения, принадлежащие к различным группам. Так, например, на резонансные перенапряжения могут накладываться перенапряжения, связанные с переходным процессом при коммутации. Обычно такое наложение ведет к появлению наивысших по амплитуде перенапряжений.

Большинство видов перенапряжений имеет определенную кратность по отношению к рабочему напряжению сети. В системах могут происходить кратковременные повышения напряжения, обусловленные сбросами нагрузки, форсировкой возбуждения и разгоном генераторов, емкостным эффектом длинных линий. Трудно провести четкую количественную границу между перенапряжениями и повышениями напряжения, например, при сбросах нагрузки. Качественно к повышениям напряжения относятся такие превышения над нормальным уровнем, которые не опасны для изоляции. Однако при наложении на эти повышения напряжения коммутационных или резонансных процессов кратности перенапряжений существенно повышаются. Повышения напряжеиня существенно влияют на выбор разрядников, предназначенных для ограничения коммутационных перенапряжений.

Большое значение имеет вопрос о вероятности появления тех или нных перенапряжений. Эта вероятность связана во-первых, со статистическим характером некоторых процессов, например гашения дуги в выключателях, а во-вторых, с вероятностью тех или иных переходных процессов в системе. Всегда можно найти такие сочетания переходных процессов, которые дают перенапряжения очень высокой кратности. Однако если такое сочетание маловероятно, то его обычно не принимают в расчет, считая, что в этом случае можно допустить перекрытие изоляции (наружной) или срабатывание разрядника с его возможным разрушением. В то же время и в этих маловероятных случаях должна быть исключена возможность повреждения внутренней изоляции машин и аппаратов. Но не всякое наложение переходных процессов маловероятно. Следует реально считаться с такими процессами, которые вызываются одной причиной или которые являются следствнем один другого. Именно на такие процессы и следует орнентироваться при оценке максимальной кратности внутренних перенапряжений и выборе средств их ограничения. Эксплуатационный опыт подсказывает эти режимы и вероятность их возникновения.

По ходу изложения материала уделяется внимание восстанавливающимся напряжениям на контактах выключателей. Хотя эти напряжения и не являются перенапряжениями в собственном смысле этого слова, они объединены с последними как в реально протекающем процессе, так и методикой экспериментальных и аналитических исследований.

Глава двадцать пятая

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ 25-1. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ В РАСЧЕТАХ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Как правило, в расчетах внутренних перенапряжений за единицу времени прийимается «синхронная секунда», равная 1/314 сек. «Синхронное время» обозначается 25—641 через т, причем $\tau = \omega_s t$. В относительных единицах времени синхронная круговая частота $\omega_s = \omega_{5as} = 1^*$. Всякая иная частота ω в относительных единицах равна $\omega = \omega/\omega_s$.

В качестве базисного напряжения U_{6as} выбирается максимальное фазное напряжение сети U_{Φ} . Поэтому напряжения, в том числе перенапряжения, в относительных единицах равны $\overset{\bullet}{U} = U/U_{\Phi}$, т. е. определяют кратности по отношению к фазному напряжению; именно эта кратность и интересует нас в расчетах перенапряжений.

Обычно второй базисной электрической величиной выбирается или волновое сопротивление линии z, или номинальный ток трансформатора I_{в.тр}, входящего в расчетную схему. Остальные базисные электрические величины являются следствием выбранных двух величин согласно следующей таблице:

Система отн. ед. П
$U_{6a3} = U_{\Phi}$
$I_{6ab} = I_{B.Tp}$
Usaa
$26as = \overline{I6as}$
$P_{\mathbf{6a3}} = U_{\mathbf{6a3}}I_{\mathbf{6a8}} = \frac{P_{\mathbf{7p}}}{3}$

 $(P_{\text{ихт.}n} - \text{натуральная мощность линии, } P_{\text{тр}} - \text{мощность трехфазного трансформатора}). В расчеты переходных процессов входят индуктивности$ *L*и емкости*C* $. Так как в системе относительных единиц синхронная частота <math>\overset{*}{\omega}_s = 1$, то $\overset{*}{x} = \overset{*}{\omega}_s \overset{*}{L} = \overset{*}{L}$ и $\overset{*}{b} = \overset{*}{\omega}_s \overset{*}{C} = \overset{*}{C}$, т. е. численное значение индуктивного сопротивления и индуктивности, как и емкостной проводимости и емкости, совпадают.

За базисную величину потокосцепления принимается значение Ψ при фазном напряжении синхронной частоты на индуктивности ($\Psi_{6a3} = U_{\Phi}/\omega_s$). Тогда в системе относительных единиц напряжение рабочей частоты будет численно равно потокосцеплению; $U = \Psi$. На частоте $\omega \neq \omega_s$ $U = \omega \Psi$.

Длины линий l (км) в расчетах выражаются в раднанах, т. е. в расчеты входит электрическая длина линий $\lambda = l \frac{\omega_e}{v} = \pi \frac{l}{3\,000}$.

В расчетах внутренних перенапряжений обычно исходят из частоты $\omega_s = 314$. Однако в некоторых режимах, например при сбросе нагрузки, скорость вращения генераторов, особенно гидрогенераторов, может существенно возрасти. Это ведет к повышению напряжения и частоты. В этих случаях за базисную частоту следует принимать не $\omega_s = 314$, а действительную частоту ω_s источника. На этой иной частоте численно возрастают x и b элементов сети и возрастает электрическая длина линий.

Во всех дальнейших расчетах, за редким исключением, используются относительные единицы. Для упрощения записи знак звездочки на величинах, выраженных в относительных единицах, будет опущен. Таким образом, принимается $\omega_s = 1$; L = x; C = b; $U = \omega \Psi$.

25-2. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ — ПРОТОТИПЕ ИССЛЕДУЕМЫХ СХЕМ

Коммутационные перенапряжения развиваются в схемах, которые часто удается привести к простейшему колебательному контуру с параметрами r, x, b. Всякая коммутация в таком контуре, например включение контура или отключение от какой-либо внешней цепи, приводат к переходному процессу, зависящему от фазы коммутации и начальных условий — напряжения U_0 на емкости и тока I_0 в индуктивности. Как известно, начальные U_0 и I_0 можно рассматривать как самостоятельные источники. Удобно рассчитывать переходный процесс в контуре раздельно для каждого из источников, затем использовать принцип наложения. Чаще всего интересующей нас функцией в переходном процессе является напряжение на емкости.

Переходный процесс под воздействием источника $e = E \cos(\tau + \psi)$. Напряжение на емкости колебательного контура складывается из составляющей установившегося режима $u_{yc\tau}$ и свободной составляющей напряжения u_{cB} . Напряжение $u_{yc\tau}$ — гармоническая функция с частотой источника. Напряжение u_{cB} — затухающее колебание

с собственной частотой $\Omega_{\bullet} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ и коэффициентом затухания δ , где $\omega_{\bullet} = \frac{1}{\sqrt{\chi b}}$ и $\delta = r/2x$. Функция напряжения на емкости имеет вид: $u_{C} = u_{ycr} + u_{c,u} = U_{ycr} \left\{ \sin\left(\tau + \psi - \varphi\right) - e^{-\delta\tau} \left[\frac{\sin\left(\psi^{*} - \varphi\right)}{\sin\alpha} \sin\left(\Omega_{0}\tau + \alpha\right) + \right] \right\}$ $+\frac{1}{\Omega_{\bullet}}\cos\left(\psi-\psi\right)\sin\Omega_{\bullet}\tau\Big]\Big\}.$ (25 - 1)Uyer =0 w 0,1 3 0,2 2 0.: 1 n 6 2 0 $\overline{\omega}_{i}$ Рис. 25-1. Схема колебательного контура и резонансные кривые $\frac{U_{yc\tau}}{E} = f\left(\frac{1}{\omega_a}\right)$ при разных $\frac{\delta}{\omega_a}$. В этой формуле $U_{ycr} = \frac{E}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\delta}{\omega_0^2}\right)^2}} = E \frac{\frac{1}{b}}{\sqrt{\left(x - \frac{1}{b}\right)^2 + r^2}};$ $1 - \frac{1}{\omega_0^2}$

$$= \operatorname{arctg} \frac{2\delta}{\omega_0^2},$$
$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\omega_0}{\delta},$$

Все величины даны в относительных единицах (ω_s=1). На рис. 25-1 приведены кривые U_{yct}/E в зависимости от отношения вынужденной $(\omega_a=1)$ и собственной (ω_0) частот контура при различных значениях коэффициента δ/ω_0 . Эти кривые называются резонансными. Вблизи резонансной частоты $\omega_0=1$ возникает пик напряжения тем более острый, чем меньше δ/ω₀. 25*

Цени электрических систем, как правило, имеют малые потери, так что $\delta \ll \omega_0$. В этих цепях резонансный пик имеет острую форму, а вдали от резонанса можно пренебречь влиянием члена δ/ω_0 на амплитуды колебаний. Поэтому вдали от резонанса можно принять $\Omega \approx \omega_0$; $\phi \approx \arctang \infty = \pi/2$ и $\alpha \approx \arctang \infty = \pi/2$; тогда выражение (25-1) приобретает вид:

$$u_{C} = -U_{yc\tau} \left\{ \cos\left(\tau + \psi\right) - \left[\cos\psi\cos\omega_{0}\tau - \frac{1}{\omega_{0}}\sin\psi\sin\omega_{0}\tau \right] e^{-\delta\tau} \right\}, \quad (25-2)$$

где

$$U_{ijc\,\tau} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}.$$

Переходный процесс под воздействием начального напряжения U₀ на емкости. Под воздействием этого напряжения происходит колебательный затухающий разряд, выражаемый формулой

$$u_{C} = U_{o} \frac{\omega_{o}}{\omega_{o}} \sin\left(\Omega_{o} \tau + \tau\right) e^{-\delta\tau}, \qquad (25-3)$$

rAe \varkappa = arcsin Ω₀/ω₀.

В контуре с малыми потерями можно положить $\Omega_0 = \omega_0$, $\varkappa \approx \arcsin \pi/2 = 1$ и, следовательно,

$$u_{\mathcal{C}} = U_{\bullet} \cos \omega_{\bullet} \tau e^{-\delta \tau}. \tag{25-4}$$

Переходный процесс под воздействием начального тока і₀ в индуктивности. Под воздействием начального тока переходный процесс в цепи также имеет колебательный затухающий характер. Напряжение на емкости выражается формулой

$$u_{C} = i_{\bullet} \sqrt{\frac{x}{b}} \sin \Omega_{0} \tau e^{-b\tau}$$
(25-5)

и и для цели с малыми потерями

$$u_C = i_0 \sqrt{\frac{x}{b}} \sin \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}.$$
 (25-6)

25-3. МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В РАСЧЕТАХ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

При расчете переходных процессов в несимметричных коммутациях широко используется метод симметричных составляющих, в частности расчет на основе комплекс-



a)



Рис. 25-2. Универсальная комплексная схема. a =нсходная схема: $\delta =$ расчетная схема. S₁, S₂ = сети произвольного вида: HK = несимметричная ком-

ных схем замещения. Построение этих схем дается в курсах по переходным процессам в электрических Особенностью схем для системах. расчета перенапряжений является примерное равенство сопротивлений прямой и обратной последовательностей z₁ и z₂. Единственным элементом систем, у которого $z_1 \neq z_2$, являются вращающиеся машины. Однако в расчетах перенапряжений (как, впрочем, и начальных токов коротких замыканий) учитываются сверхпереходные реактивные сопротивления, которые у машин с демпферными контурами в обеих осях примерно одинаковы для систем токов прямой и обратной последовательностей.

При условни $z_1 = z_2$ расчет напряжений и токов в несимметричных схечах может основываться на универсальной комплексной схеме в фазных координатах, построение которой по казано на рис. 25-2. С обеих сторон от произвольной несимметричной коммутации, условно показанной на рис. 25-2, а ящиком *HK*, включены сети S_1 и S_2 произвольного вида с пронзвольными переходными сопоотивле циями. На схеме показано заземление в месте коммутации. По методу активного двухполюсника для трехфазной сети можно преобразовать S_1 и S_2 к схеме на рис. 25-2,6, в которой E_a , E_b , E_c — эквивалентные источники напряжения, равные фазпым напряжениям на разомкнутых копцах a, b, c в симметричном режиме (напряжения холостого хода); z_1 — эквивалентное сопротивление прямой последовательности, равное фазным сопротивлениям в симметричном режиме из точех a, b, c при закорочен-

ных источниках э. д. с. (сопротивление короткого замыкания); $z_N = \frac{z_0 - z_1}{3}$ — сопро-

тивление в нулевом канале; z₀ — эквивалентное сопротивление нулевой последовательности. По схеме на рис. 25-2,6 сопротивление z₀ равно утроенному сопротивлению из точек a, b, c при параллельно соединенных фазах

 $3\left(\frac{z_1}{3}+\frac{z_0-z_1}{3}\right)=z_0.$

Это тождество подтверждает правильность структуры схемы на рис. 25-2,6. Таким образом, в этой схеме выполняются необходнмые и достаточные условия связи между симметричными составляющими напряжения и тока.

Универсальная комплексная схема на рис. 25-2, впервые использованная В. П. Фотиным, позволяет непосредственно определять фазные напряжения и токи в несимметричных режимах. Отметим, что схема может быть использована не только в установившихся, но и в переходных режимах.

25-4. ПАРАМЕТРЫ СХЕМ ПО КАНАЛАМ ПРЯМОЙ И НУЛЕВОЙ Последовательностей

Вторым этапом после составления расчетной схемы является определение параметров элементов схемы. Параметры — реактивное и активное сопротивление этих элементов — зависимы от частоты. Спектр частот внутренних перенапряжений обычно не выходит за пределы $f=10^4$ гц или круговой частоты $\omega = 2\pi \cdot 10^4$. Приводимые ниже расчетные формулы относятся к этому диапазону частот.

Таблица 25-1

Злемент сети	Схема прямой последовательности	Схема нулевой последовательности
′́⊙–	°	o
пк — -{ —	! }	

Схемы прямой и нулевой последовательностей элементов электрических сетей Входящее в схему оборудование — генераторы, трансформаторы, реакторы — замещаются своими реактивными сопротивлениями. Частотные характеристики этих элементов линейны:

$$x(\omega) = \omega x; b(\omega) = \omega b,$$

где ω выражена в долях от частоты, а x и b — в относительных единицах и соответствуют синхронной частоте.

Источники напряжения (э. д. с.) задаются симметричными тройками векторов прямой последовательности. В табл. 25-1 приведены значения реактивных сопротивлений по каналам прямой и нулевой последовательностей для элементов схем — генераторов Г, трансформаторов T, автотрансформаторов AT, реакторов поперечной компенсации P, емкостей продольной компенсации ПК на рабочей частоте.

В качестве реактивного (индуктивного) сопротивления генератора берется обычно значение сверхпереходного реактивного сопротивления $x''_d \approx x''_q$. При этом полагают, что возбуждаемые в демпферных контурах токи за время коммутационного переходного процесса не успевают затухнуть. Допущение приемлемо только для турбогенераторов. В гидрогенераторах затухание свободных токов в демпферных контурах исчисляется несколькими периодами, т. е. сравнимо по времени с переходным процессом на длинных линиях. Поэтому в таких схемах за расчетное значение реактивного сопротивления гидрогенераторов правильнее принимать переходное сопротивление x'_d .

Наиболее трудоемко определение параметров линий электропередачи. Порядок расчета этих параметров приводится ниже.

Таблица 25-2

Расчетные формулы для параметров одноцепной ВЛ (без учета тросов)

	Удельные фазовые параметры ВЛ			
Парам е тры	Продольное сопротныление, ом/жм	Поперечная проводимость, 1/ом · к м		
Прямой последователь- ности	TOC. TE DOBATE. 15. $r_{1} = r_{np}$ $x_{1} = 29f \cdot 10^{-4} \lg \frac{d}{r_{b}}$ $b_{1} = \frac{-7}{\lg 4}$			
Нулевой последователь- ности	$r_{0} = r_{pp} + 3\pi^{2} i \cdot 10^{-4}$ $x_{0} = 87 i \cdot 10^{-4} \lg \frac{D_{0}}{D_{0}}$	$b_{0} = \frac{g_{0} = 0}{\frac{7,56}{\lg \frac{D_{0}D^{2}}{r_{B}d^{2}}}} 10^{-0}$		
D _m	20 30 /// Drs - Dze - Dgr	$I = \sqrt[1]{\sqrt{d_{12}d_{22}d_{21}}}$ $D_{\theta} = \sqrt[1]{\sqrt{D_{11}D_{22}D_{32}}}$ $D = \sqrt[1]{\sqrt{D_{12}D_{23}D_{31}}}$ $D_{3} = \frac{0.21}{\sqrt{\sqrt{\gamma}/\cdot 10^{-9}}}$ $D_{\theta} = \sqrt[1]{\sqrt{r_{\theta}d^{2}}}$		

Линия задается своими геометрическими размерами (см. табл. 25-2) и средним удельным сопротивлением земли $\gamma(1/ом \cdot m)$. По заданным размерам определяются средние расстояния:

между фазами

$$d = \sqrt[3]{d_{12}d_{21}d_{21}};$$

между проводами и их зеркальным изображением

$$D_0 = \sqrt[4]{D_{11}D_{22}D_{33}};$$

между проводом и зеркальным изображением других прово дов

$$D = \sqrt{D_{12}D_{23}D_{31}}.$$

Провода задаются их радиусом *г*; для расщепленных проводов используются эквивалентные радиусы *г*_в, определенные по формулам табл. 1-1.

Формулы для вычисления индуктивных сопротивлений и емкостных проводимостей на 1 км линии приводятся в табл. 25-2.

Магнитное поле прямой последовательности в основном сосредоточено в воздухе и только частично проникает в землю. Магнитное поле токов нулевой последовательности проникает в землю на большую глубину. Эквивалентный обратный «провод», имитирующий землю, находится на расстоянии D₃ от проводов линии. Электрическое поле напряжений прямой и нулевой последовательностей полностью расположено в воздухе; поверхность земли обладает нулевым потенциалом. Скорости распространения волн по каналам прямой и нулевой последовательностей разны:

$$v_1 = \frac{\omega}{\sqrt{x_1 b_1}} \text{ if } v_0 = \frac{\omega}{\sqrt{x_0 b_0}}.$$

На линни с идеально проводящей землей электрические и магнитные поля сосредоточены в воздухе и дуальны. На такой линии $v_1 = v_0 = c$ (c — скорость света). Вследствие разделения электрических и магнитных полей на линии с реальной землей, обладающей конечной проводимостью γ , скорость v_1 близка к скорости света ($v_1 \approx 0,98 c$), а скорость v_0 составляет примерно 0,6—0,7 c. Волновые сопротивления линии по каналам прямой и нулевой последовательностей равны $z_1 = \sqrt{x_1/b_1}$ и $z_0 = \tilde{\gamma} \sqrt{x_0/b_0}$. Так как $x_0 > x_1$, то и $z_0 > z_1$. По значениям волновых сопротивления z_1 и z_0 можно рассчитать собственные z и взаимные z' волновые сопротивления проводов (которые полагаются симметричными):

$$z = \frac{z_0 + 2z_1}{3}; \quad z' = \frac{z_0 - z_1}{3};$$

Заземленные тросы снижают индуктивные сопротивления и повышают емкостные проводимости линий. Однако на современных ВЛ высшего напряжения тросы обычно разземляют (см. § 22-14). В этом случае справедливы расчетные формулы линий без тросов, приведенные в табл. 25-2.

Таблица 25-3

Параметры			Прямая последо- вательность	Нулевая последо- вательность
Активное сопротивление. ом/км Индуктивное сопротивление, ом/км Дебротность x/r Емкестная проводимость, 1/ом км Волновое сопротивление, ом Скерость распространения волны, км/сек.	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	0,022 0,29 13,2 3,9·10-6 270 2,95·10 ⁵	0,17 0,94 6,5 2,7 · 10 - ⁶ 590 1,97 · 10 ⁵

Типовые параметры ВЛ 500 кв на рабочей частоте

В табл. 25-3 приведены параметры типовых линий электропередачи 500 кв с горизонтальным расположением проводов, вычисленные для грунтов со средним удельным сопротивлением $\rho = 10^2 \, \text{ ом} \cdot \text{см}$.

25-5. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Линии передачи являются элементами с распределенными параметрами. Поэтому схемы, содержащие линии передачи, имеют, вообще говоря, бесконечное множество собственных частот колебаний. При крутых фронтах воли коммутационного происхождения необходим учет большого числа собственных частот и соответствению линия должиа замещаться цепочечной схемой с большим числом звеньев. В этом случае проще учитывать волновой процесс на линии с многократными отражениями воли в узловых точках. Но большей частью волны коммутационного происхождения необходим и в этом случае линия может замещаться простыми точках. Но большей частью волны коммутационного происхождения имеют пологий фронт, и в этом случае линия может замещаться простыми T- или П-образными схемами. Физическое обоснование перехода от линий с распределенными параметрами к схемам замещения с сосредоточенными параметрами было дано в § 18-8. Параметры схем замещения вычисляются для частоты ω , эквивалентирующей воздействие внутреннего перенапряжения (часто берут $\omega = \omega_s = 1$). На этой частоте электрическая длина линии равна λ . Параметры Схемы вычисляются по формулам

$$x = z \sin \frac{\lambda}{2}; \quad b = \frac{1}{z} \operatorname{tg} \lambda;$$
 (25.7)

параметры П-образной схемы — по формулам

$$x = z \sin \lambda; \ b = \frac{1}{z} \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}$$
 (25-8)

Формулы упрощаются, если z=1 отн. ед. Для коротких линий (до 200—250 км), т. е. малых λ , sin $\lambda = tg \lambda = \lambda$ и формулы упрощаются до вида (при z=1): для Т-образной схемы

$$x = \frac{\lambda}{2}; \ b = \lambda; \tag{25-7a}$$

для II-образной схемы

$$x = \lambda; \ b = \frac{\lambda}{2}.$$
 (25-8a)

Схемы замещения с параметрами согласно формулам (25-7) или (25-8) вполне точно замещают линию на частоте ω , для которой определены параметры x н b, и



Рис. 25-3. Универсальная комплексная схема для несимметричной коммутации однофазного короткого замыкания.

а — неходная схема; б — расчетная схема. приближению справедливы для расчета переходных процессов в схемах, в которых коммутационные волны имеют достаточно пологий фронт. Соответствующие количественные оценки будут даны в гл. 26.

25-6. ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Во введении к настоящей книге были изложены особенности различных способов заземления и указано, что одной из основных причин применения заземленной нейтрали в сетях напряжением 110 кв и выше является изоляционная проблема; заземление нейтрали ограничивает повышение напряжения на здоровых фазах при однофазных коротких замыканиях. Этот вопрос теперь разбирается подробно.

На рис. 25-3,а приведена структурная схема сети, в которой произошло однофазное короткое замыкание. Строим для нее универсальную комплексную схему по методу, изложенному в § 25-3. Такая схема показана на рис. 25-3,6. Напряжения E_a , E_b , E_c являются эквивалентными источниками симметричного напряжения, z_1 и z_6 — эквивалентными сопротивлениями по каналам прямой и нулевой последовательностей. Фаза а заземлена через сопротивления R_a , фазы b и с изолированы.

В соответствии со схемой на рис. 25-3,6 напряжения здоровых фаз в точках b и c (месте короткого замыкания) равны:

$$\dot{U}_{b} = \dot{E}_{b} - \dot{U}_{N}; \ \dot{U}_{c} = \dot{E}_{c} - \dot{U}_{N},$$

а

$$\dot{U}_N = \dot{E}_a \frac{z_0 - z_1}{2z_1 + z_0 + 3R_3}.$$

Подстав іяя значение U_X и учитывая, что E_a , E_b и E_c образуют симметричную тройку векторов, получаем:

$$\dot{U}_{b} = \dot{E}_{a} \frac{(a^{2} - 1)\frac{z_{0}}{z_{1}} + (a^{2} - a) + a^{2}\frac{3R_{3}}{z_{1}}}{2 + \frac{z_{0}}{z_{1}} - \frac{3R_{3}}{z_{1}}};$$
(25-9)

$$\dot{U}_{c} = \dot{E}_{a} \frac{(a-1)\frac{z_{0}}{z_{1}} + (a-a^{2}) + a\frac{3R_{3}}{z_{1}}}{2 + \frac{z_{0}}{z_{1}} + \frac{3R_{3}}{z_{1}}},$$
(25-9a)

 $rae \ a = e^{\int \frac{2\pi}{3}}$

Обычно можно пренебречь активными сопротивлениями прямой последовательности, т. е. принять $z_1 = j x_1$. Активные сопротивления нулевой последовательности имеют существенную величину, и поэтому принимается $z_0 = r_0 + j x_0$.

На рис. 25-4 приведены кривые зависимости напряжений U_b/E_a и U_c/E_a от отношения реактивных сопротивлений x_0/x_1 при разных r_0/x_1 и $R_3=0$. Положительным x_0/x_1 соответствует область заземленной нейтрали системы, отрицательным x_0/x_1 , когда x_0 имеет емкостный характер, соответствует область насолированной нейтрали. Как видно из кривых, напряжения на фазе c выше, чем на фазе b, и они одинаковы только при $r_0=0$. Отношения U_b/E_a и U_c/E_a , характеризующие повышение напряжения на здоровых фазах при однофазных коротких замыканиях, обозначаются через коэффициент заземления k_3 .

В области заземленной нейтрали с ростом x_0/x_1 и z_0/x_1 напряжения U_b/E_a и U_c/E_a возрастают, стремясь при $x_0 \longrightarrow \infty$ или $r_0 \longrightarrow \infty$ к $\sqrt{3}$. В соответствии с кривыми на рис. 25-5 построены кривые на рис. 21-11, по которым определялись максимальные напряжения на разрядниках здоровых фаз при однофазных коротких замыканиях. Обычно в расчетах перенапряжений пренебрегают активными сопротивлениями и, следовательно, принимают $z_0/z_1 = x_0/x_1$. В этом случае $U_b = U_c$. Используя любую из формул (25-9), находим:

$$k_{3} = \frac{U_{b,c}}{E} = \left| 1 + e^{\pm j \frac{\pi}{3}} \left(1 - \frac{3x_{1}}{2x_{1} + x_{0}} \right) \right| = \left| 1 + e^{\pm j \frac{\pi}{3}} \left(1 - \frac{I_{\kappa,3}^{(1)}}{I_{\kappa,3}^{(3)}} \right) \right|, \quad (25-10)$$

 $I_{\kappa,3}^{(1)}$ и $I_{\kappa,3}^{(3)}$ — значения тока однофазного и трехфазного короткого замыкания в точке коммутации. Формула (25-10) удобна в расчетах, поскольку токи короткого замыкания в сетях обычно известны. Формуле (25-10) соответствуют на рис. 25-4 кривые $r_0/x_1=0$ в правой области.

Области эффективно заземленной нейтрали соответствуют значения $x_0/x_1 \le 3$. По кривым на рис. 25-4 или формуле (25-10) находим, что $x_0/x_1=3$ и $r_0/x_1=0$ соответствует $k_3=1,25$. С учетом того, что $E_a>U_{\phi}$ и $r_0>0$, нормами для выбора изоляции установлено повышение напряжения рабочей частоты на здоровых фазах до $0,8U_{\pi}=1,38U_{\phi}$ (см. гл. 21).

В области изолированной нейтрали при значении $x_0/x_1 = -2$ возникает резонанс. Резонанс возникает между индуктивным сопротивлением прямой последовательности и емкостным сопротивлением нулевой последовательности (сопротивлением емкостей фаз на землю). Напряжения на здоровых фазах согласно кривым на рис. 27-7 возрастают до очень высоких значений. Практически подобязый резонанс возможен только в очень разветвленных кабельных сетях, питаемых от относительно маломощного источника. Но в таких сетях, как правило, устанавливается дугогасящая катушка, резко повышающая $|x_0|$ сети. При $x_0/x_1 \rightarrow -\infty$ k_3 стремится к V 3. Следоваисточно, в бесконечности ветви кривых на рис. 25-4 в правой и левой областях сливаиотся. Кривые на рис. 25-4 относятся к случаю $R_3 = 0$. Влияние сопротивления заземления R_3 показано кривыми на рис. 25-5. На оси ординат отложено отношение $U_{\rm Maxc}/E_a$, где $U_{\rm Maxc}$ — максимальное напряжение на фазах b и c. При возрастании R_3/x_1 до единицы коэффициент k_3 возрастает. Дальнейшее повышение R_3/x_1 ведет к снижению k_3 . Очевидно, что при $R_3 = \infty$ короткое замыкание отсутствует и $k_3 = 1$.



Рис. 25-4. Кривые зависимости напряжения на здоровых фазах b н c от отношения x_0/x_1 для разных r_0/x_1 при однофазном коротком замыкании на фазе.

$$a$$
-кривые $\frac{U_b}{E_a} = f\left(\frac{x_0}{x_1}\right); \ 6$ -кривые $\frac{U_c}{E_a} = f\left(\frac{x_0}{x_1}\right); \ z_1 = 0 + jx_1; \ z_0 = r_0 + jx_0$



Рис. 25-5. Кривые зависимости максимальных напряжений на здоровых фазах от отношения x_0/x_1 для разных R_3/x_1 при однофазном коротком замыкании. $z_1=0+jx_1; z_0=0+jx_0.$

25-7. ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ИХ РАСЧЕТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

В нормальном режиме источники напряжения — генераторы (в том числе синхронные компенсаторы) имеют э. д. с., не болсе чем на 5% превышающие максимальное рабочее напряжение сеги. Но в переходных режимах эти э. д. с. могут существенно возрасти за счет повышения скорости вращения роторов генераторов и возрастания тока возбуждения. Такой процесс возникает при сбросе нагрузки с генератора после отключения короткого замыкания, например в схеме блока генератор — трансформатор — линия. При коротком замыкания на шинах приемной станции устройство АРВ фсрсирует ток возбуждения. После отключения короткого замыкания исчезает размагничивающий ток статора и возрастает поток возбуждения. Одновременно вследствие сброса нагрузки возрастает скорость вращения ротора генератора. В результате повышаются частота и напряжение генератора. На практике в результате действия АРВ и регуляторов турбин напряжение на выводах генератора Е даже в блоковой схеме повышается лишь до $1,2-1,3U_{\phi}$ и только в редких случаях до больших величин.

Напряжение на линии повышается вследствие емкостного эффекта. Повышение напряжения наблюдается на работающих линиях в режиме минимальной нагрузки и особенно на холостых (односторонне включенных) линиях. Прохождение емкостного тока I_c через реактивное сопротивление x_s сети приводит к повышению напряжения U по отношению к напряжению источника E. Это повышение пропорционально I_c и x_s . Отношение напряжений U/E, связанное с емкостным эффектом в симметричной схеме сети, обозначается через емкостный коэффициент k_c . В простом колебательном

контуре без погерь емкостный коэффициент $k_C = \frac{1}{1 - \frac{1}{m^2}}$ [см. формулу (25-1)]. Таким

образом, установившееся напряжение в симметричном режиме

$$U_{\mathrm{ycr}} = k_{\mathrm{c}} E. \tag{25-11}$$

Другой причиной повышения фазного напряжения в системах может быть однофазное короткое замыкание. Как было показано в § 25-7, это повышение напряжения характеризуется коэффициентом k_3 . При эффективно заземленной нейтрали коэффициент k_3 лежит в пределах 1—1,4, при изолированной нейтрали $k_3 = \sqrt{3}$. Обычно в течение времени короткого замыкания напряжение на здоровых фазах успевает установиться, так что коэффициент k_3 характеризует установившееся напряжение. Влияние всех факторов определяет кратность установившегося напряжения при коротком замыкании

$$U_{ycr} = k_3 k_c E.$$
 (25-11a)

Высокие установившиеся перенапряжения возникают также при несимметричных коммутациях фаз и в результате феррорезонансных колебаний на высших и низших

гармониках. В общем случае

$$U_{\text{ycr}} = k_{\text{ycr}} E, \qquad (25-116)$$

где kycr — коэффициент установившегося перенапряжения.

В переходном процессе, вызванном коммутацией — включением или отключением выключателя, коротким замыканием, обрывом провода и т. д., амплитуда напряжения $U_{\rm nep}$ превышает установившееся напряжение $U_{\rm ycr}$. Отношение напряжений $U_{\rm nep}/U_{\rm ycr}$ обозначается через ударный коэффициент $k_{\rm yg}$. Следовательно,

$$U_{\rm nep} = k_{\rm ycr} k_{\rm yz} E, \qquad (25-12)$$

25-8. ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИИ В ДЕИСТВУЮЩИХ СЕТЯХ

Наиболее ценный материал по внутренним перенапряжениям дают их измерения в действующих сетях. Одним нз видов таких измерений являются исследования, проводимые в ходе специально запланированных коммутаций в выделенных участках сети по подготовленным программам. Обычно эти исследования проводятся при внедрении электропередач нового высшего класса номинального напряжения или внедрении нового оборудования или новых схем выполнения электропередач. Образцом могут служить исследования на электропередачах 500 кв, которые проводились ВЭИ в конце 50-х и начале 60-х годов. Измерения перенапряжений проводятся, как правило, многолучевымп катодными осциллографами с механической разверткой, одновременно в нескольких точках сети с запуском их от цепей управления выключателями и с передачей сигналов по каналам высокочастотной связи. В исследованиях этого типа обычно определяются максимальные перенапряжения, возникающие при запланированной коммутации, либо их статистические характеристики.

Другой вид измерений заключается в массовой регистрации внутренних перенапряжений в эксплуатации с помощью автоматических катодных осциллографов или другой, более простой измерительной аппаратуры, регистрирующей только амплитуды перенапряжений. Эти исследования проводятся во многих странах. В СССР они широко поставлены в энергосистемах под руководством ЛПИ, ВНИИЭ и ВЭИ. Массовые измерения перенапряжений дают материал для статистического анализа амплитуд (и форм) внутренних перенапряжений и служат основой для выбора уровней изоляций линий и подстанционного оборудования. Чтобы служить этой цели, число измеретий должно быть достаточно велико и проведено на всех участках электрических сетей, где можно ожидать особенностей в развитии перенапряжений.

25-9. ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ Перенапряжения

Исследования внутренних перенапряжений в проектируемых уникальных электропередачах осуществляются на физических моделях. Такие исследования проводились для основных электропередач 500 кв и в настоящее время выполняются для электропередач 750 кв и выше. Физические модели, позволяющие проводить всесторонние исследования резонансных и коммутационных перенапряжений, имеются в лабораториях ТВН ВЭИ, МЭИ, ЛПИ, НИИПТ. Ниже дается описание физической модели кафедры ТВН МЭИ.

Модель содержит цепочечные линии общей длиной 3 000 км, модели трансформаторов, включателя и выключателя, разрядников, реакторов, емкостей поперечной и продольной компенсации, наборы реактивных сопротивлений. Напряжение модели $U_{\rm M} = 110$ в; масштаб времени $m_t = 1$. Масштаб сопротивлений может изменяться в пределах $m_R = 1,8 \div 2,2$.

Модель линии выполнена в виде трехфазной цепочечной схемы, каждая ячейкакоторой моделирует участок линии длиной 50 км. Схема ячейки линии приведена на рис. 25-6. В фазы включены индуктивности L_1 , в нулевой провод — индуктивность $L_N = \frac{L_0 L_1}{3}$, где индексы 1 и 0 означают прямую и нулевую последовательность. Емкость C_1 соединена в звезду, в нейтраль которой включена емкость $C_N = \frac{3C_1 - C_0}{C_1 - C_0}$. В приведенной схеме реактивные сопротивления по каналам прямой и нулевой последовательностей равны $x_1 = \omega L_1$ и $x_0 = \omega \left(L_1 + 3 \frac{L_0 - L_1}{3}\right) = \omega L_0$ и реактивные проводимости $b_1 = \omega C_1$ и $b_0 = \omega \left(C_1 \| \frac{1}{3} \cdot \frac{3C_1 C_0}{C_1 - C_0}\right) = \omega C_0$, как это и должно быть в трехфазной симметричной цепи.
Часть индуктивности в нулевом проводе L_N шунтирована активным сопротивлением. Схема с L_N и R_N имитирует частотную характеристику сопротивления z_0 (см. формулы в табл. 25-2). В качестве индуктивностей применяются катушки на альсиферовых сердечниках, сохраняющих линейную характеристику вплоть до пятикратного натурального тока линии.

Трансформаторы и автотрансформаторы моделируются по Г-образной схеме замещения (рис. 25-6). Модель состоит из шунтов намагни ивания (хатушки L_{μ} и L_{Λ}), включаемых по схеме «звезда» с заземленной нулевой точкой, сопротивлений рассеяния прямой последовательности (катушка L_{*}) и нулевой последовательности L_{*0} , включаемых на разомкнутый треугольник вторичных сбмоток катушек. В качестве нелинейного элемента используются катушки на тороядальных сердечниках из пермаллоя.



Рис. 25-6. Схема ячейки линии и автотрансформатора физической модели МЭИ.

Модель выключателя отключает каждую фазу при прохождении тока в фазе через нуль, моделирует кривую восстанавливающейся прочности дугогасящего промежутка выключателя $u_{\rm np}$ и осуществляет повторные зажигания в момент, когда напряжение на выключателе $u_{\rm n}$ достигает величины $u_{\rm np}$. Полная схема выключателя позволяет также моделировать включение фаз цепи при заданной электрической фазе напряжения.

Физическая модель располатает набором индуктивностей и емкостей для имитации реакторов и конденсаторных батарей поперечной и продольной компенсации. На модели были проведены разработки защиты от перенапряжений важнейших электропередач 500 и 750 кв.

25-10. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ (ЦВМ)

Переходный процесс на длинных линиях при коммутации протекает в форме волнового процесса. В гл. 18 было показано, что расчет волнового процесса на линин без потерь производится весьма элементарно на основе так называемого цифрового метода расчета. В узлах вычисляются преломленные и отраженные волны, причем вычисления включают только арифметические действия над числами — дискретными значениями волн. По этой причине вычисления переходных процессов в схемах с длинными линиями весьма эффективно осуществляются на ЦВМ. В узлах с реактивными этементами применяют хорошо известные алгоритмы расчета обыкновенных дифференциальных уравнений или же замещают реактивные элементы L, C линиями (см. § 18-10). Трехфазные системы приводятся к однофазным на основе комплексных схем замещения или же применяется матричный метод расчета в фазных и симметричных координатах. В настоящее время практика расчета переходных процессов на ЦВМ прочно утвердилась в исследовательских организациях ряда стран. В СССР первые такие программы для машин типа «Урал» были раззаботаны во ВНИИЭ и ЛПИ. В настоящее время по этим программам проводятся исследования коммутационных переходных процессов в дальних электропередачах.

Вопросы и задачи для самопроверки

I. Задана блоковая схема с параметрами генератора: $P_{\rm r} = 600~Msa,~x''_{\rm r} = 0,2;$ трансформатора: $P_{\rm rp} = 900~Msa,~x_{\rm rp} = 0,15;$ линия 500 кв ($U_{\rm pa6} = 525~\kappa s$) с волновым сопротивлением прямой последовательности $z_1 = 285~\sigma s$. Требуется выразить все сопротивление в относительных единицах, приняв натуральную мощность линии за базисную.

2. Составьте в общем виде универсальную комплексную схему замещения для случая: а) включения двумя фазами; 2) однофазного короткого замыкания и обрыва на той же фазе в одной точке сети.

3. Рассчитайте параметры линии 220 кв с горизонтальным расположением проводов и размерами (см. табл. 25-2) $d_{12} = d_{23} = 4 \ m$; $h_{cp} = 12 \ m$; $r_{np} = 12 \ m$ (AC-300). Удельная проводимость земли $\gamma = 0,2 \cdot 10^{-2} \frac{1}{0 \ m \cdot m}$.

4. Определите, используя расчетные кривые, повышение напряжения на здоровых фазах при однофазном коротком замыкании в сети с $x_0/x_1 = 2,5$ и $r_0/x_1 = 0,1$.

5. Какими коэффициентами выражаются составляющие перенапряжения при коммутации в сети с длинной линией при однофазном коротком замыкании?

Глава двадцать шестая

КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

26-1. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЛИНИИ

Каждое включение холостой линии сопровождается коммутационными перенапряжениями относительно небольшой кратности. Изучение



Рис. 26-1. Схемы для расчета перенапряжений при включении линии.

 а — исходная схема: б — Т-образная схема замещения;
 в — П-образная схема замещения;
 г — расчетный колебательный контур. перенапряжений этого вида началось при внедрении электропередач СВН в связи со снижением уровней изоляции.

Простейшая схема, в которой можно изучать особенности коммутационных перенапряжений на линиях, показана на рис. 26-1,а. В этой схеме линия длиной l с волносопротивлением ВЫМ Z подключается через предвключенное реактивное сопротивление сети x₈ к источнику синусоидального напряжения.

Для коротких линий Т-образдействительна ная или, более точно, IIобразная схема замещения (рис. 26-1,б и в). В обоих случаях вся схема может быть предпростейшими ставлена колебательным контуром 26-1,г). Для *rxb* (рис.

схемы на рис. 26-1,6 $x = x_s + x_{\pi}/2$; $b = b_{\pi}$; для схемы на рис. 26-1,6, преобразуя звезду реактивных сопротивлений в треугольник, как это показано на рис. 26-1,6 пунктиром, получаем

$$b = \frac{b_{\pi}}{2} \Big[1 + \Big(1 + \frac{x_{\pi}}{x_{*}} - x_{\pi} b_{\pi} \Big)^{-1} \Big].$$

Это преобразование выполнено на частоте источника, и потому оно лишь приближенно действительно в переходном режиме. Расчеты,

2,2 Figa

2,0

1,8

1,6



Рис. 26-2. Кривые переходного процесса при включении линии.

однако, показывают, что преобразованная схема на рис. 26-1, сболее полно отражает исходную схему в отношении протекания переходного процесса, чем схема на рис. 26-1, б.

Обычно в электрических сетях Т-образная схема замещения приме-



Рис. 26-3. Зависимость ударных коэффициентов, соответствующих первым трем максимумам напряжения, от частоты собственных колебаний при δ=0.

нима для линий длиной до 200—300 км, а П-образная схема (с преобразованием звезды в треугольник) — для линий длиной до 300—400 км. Активные потери, как правило, малы, т. е. много меньше характеристического сопротивления контура $\sqrt{x/b}$.

При включении колебательного контура *rxb* напряжение на емкости выражается формулой (25-1). Амплитуда напряжения на емкости **b**, т. е. коммутационное перенапряжение при включении линии на источник напряжения $E \cos(\tau + \psi)$, зависит от собственной частоты контура $\omega_0 = \sqrt{xb}$ (выраженной в долях от частоты источника) и фазы коммутации ψ .

Фаза ф является случайной величиной, зависимой от момента сближения контактов выключателя и пробоя промежутка между контактами. Измерения, проведенные на выключателях, показали значительный разброс величин ψ . Однако наиболее вероятна коммутация в результате пробоя промежутка в момент, близкий к максимальному напряжению между контактами, т. е. в момент, близкий к $\psi=0$. Так как значению $\psi=0$ соответствуют при $\omega_0 \gg 1$ максимальные напряжения на емко-

Kyai

сти (см. § 25-2), то в расчетах предельных перенапряжений принимается именно этот фазовый угол. При $\psi = 0$ и $\omega_0 \gg 1$ напряжение на смкости в соответствии с формулой (25-2) имеет вид:

$$u_{\rm nep} = U_{\rm yc\,\tau} \left(\cos\tau - e^{-\delta\tau}\cos\omega_0\tau\right). \tag{26-1}$$

В этой формуле амплитуда принужденной составляющей $U_{ycr} = \frac{E}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}$, собственная частота колебаний контура $\omega_0 = 1/\sqrt{xb}$; коэф-

фициент затухания $\delta = r/2x$ (с учетом джоулевых потерь на высоких частотах и потерь на корону δ порядка 0,1).

На рис. 26-2 приведены характерные кривые $u_{\text{пер}}(\tau)$ при разных значеннях ω_0 и $\delta = 0$. Как видно из кривых, при $\omega_0 = 3$ максимум напряжения наступает на первой полуволне, а при $\omega_0 = 1,7$ — на третьей полуволне. Эта закономерность имеет общий характер: чем ниже собственная частота ω_0 , тем дальше сдвигается максимум напряжения. Однако при наличии потерь, т. е. $\delta > 0$, собственные колебания затухают и максимум не возникает далее третьей полуволны. На рис. 26-3 даны кривые ударных коэффициентов $k_{yд1}$, k_{yg2} , k_{yd3} соответственно для максимумов на 1-й, 2-й и 3-й полуволнах в зависимости от частоты ω_0 . Кривые построены для цепи без потерь ($\delta = 0$), и поэтому наибольшие значения всех k_{yg} достигают 2. Потери можно учесть умножением k_{ygn}

на множитель 0,5 $\left(1+e^{-b\pi \frac{T}{2}}\right)$, где T — период собственных колебаний.

Пример 28-1. Определить кратность перенапряжения при включении линии в цепи на рис. 26-1, *a* с параметрами (в относительных единицах) $E = 1,1; x_s = 0,56; z = 1; \lambda = 0,1\pi$ (l = 300 км).

При указанной длине длиния может быть замещена Т-образной схемой, приведенной на рис. 26-1, б, с параметрами $x_{\pi}/2 = z\lambda/2 = 0,05\pi$ и $b_{41} = \lambda/2 = 0,1\pi$. Тогда колебательный контур имеет параметры: x = 0,715 и b = 3,314. Собственная частота $\omega_0 = 1/\sqrt{xb} = 2,2$; период колебания $T = 2\pi/\omega_0 = 2,85$. По кривой на рис. 26-3 находим $k_{y,1} \approx 1,3$; $k_{y,2} = 1,9$; $1k_{y,23} = 0,6$. Максимум напряжения наступает на второй полуволне с $k_{y,2} = 1,9$. С учетом потерь при $\delta = 0,1$

$$k_{y\pi} = 1.9 \cdot \frac{1}{2} \left(1 + e^{-0.1 \cdot 2 \cdot \frac{2.85}{2}} \right) = 1.65.$$

Емкостный коэффициент

$$k_C = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}} = 1,26.$$

Кратность коммутационного перенапряжения $U_{pop} = 1, 1 \cdot 1, 26 \cdot 1, 65 = 2, 3.$

При длине линий до 100—150 км (линии 110—220 кв) и_{пер} обычно достигает максимального значения вблизи амплитуды установившегося напряжения. Поэтому для таких линий действительна приближенная формула

$$U_{\rm IIC_{1}} = U_{\rm ycr} (1 + e^{-b\frac{T}{2}}). \tag{26-2}$$

Однофазная схема на рис. 26-1, а и ее схема замещения — колебательный контур достаточно полно отражают реальную трехфазную сеть при одновременном включении всех трех фаз, когда все напряже\$ 26-21

ния и токи в фазах образуют симметричную систему. Но так как углы коммутации ф выключателей являются случайными величинами, то всегда возникает некоторый разброс в углах ф для разных фаз линии. По этой причине переходные процессы на разных фазах линии протекают со сдвигом во времени. Взаимодействие этих процессов через взаимную индуктивность и емкость фаз линии (иначе говоря, через взаимное волновое сопротивление фаз) приводит к дополнитель-



Рис. 26-4. Влияние неодновременности замыкания контактов фаз выключателя при включении холостой линии на перенапряжения на ее разомкнутом конце.

а — осциялограмма при одновременном замыкании контактов; б — осциялограмма при неодновременном замыкании контактов (последней включалась фаза с); в — то же (последней включалась фаза b); мощность к. з. питающей сети 1 250 Мва; линия длиной 200 км.

ному повышению напряжения $u_{\text{пер}}$ на фазах, как это видно из осциллограмм на рис. 26-4. Поэтому в реальной трехфазной сети следует считаться с возможностью повышения $u_{\text{пер}}$, рассчитанного в однофазной схеме на рис. 26-1, на 15—25%.

26-2. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ХОЛОСТОЙ ЛИНИИ С ПОВТОРНЫМИ ПРОБОЯМИ

Предположим, что в схеме на рис. 26-5, а выключатель отключает холостую линию. В выключателе до отключения течет синусоидальный ток, и при обрыве этого тока, происходящем в момент прохождения его через нуль, напряжение на линии имеет амплитудное значение

$$U_{\text{ycr}} = \frac{E}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}$$

После обрыва тока на линии сохраняется напряжение $U_0 = U_{ycr}$, создаваемое зарядом на емкости линии. Это напряжение воздействует на линейный полюс выключателя. Со стороны шин напряжение в момент отключения падает с U_{ycr} до E (исчезает емкостный эффект) и

[Гл. 26

далее напряжение изменяется с частотой сети (рис. 26-5,б). Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя изменяется по закону

$$u_{\rm B}(\tau) = E \cos \tau - U_{\rm o}.$$

Если теперь при некоторой фазе ψ, отсчитываемой от момента погасания емкостного тока, произойдет повторный пробой дугогасительного промежутка в выключателе, возникает переходный процесс вклю-



Рис. 26-5. Отключение холостой линии с повторными пробоями. а — схема сетн; б — кривые напряження на выключателе со стороны питания и лянии.

чекия линии с начальным напряжением U₀. Напряжение на емкости линии изменяется по формуле

$$u_{\text{nep}} = U_{\text{ycr}} \left\{ \cos\left(\tau + \psi\right) - \left[\cos\psi\cos\omega_{0}\tau - \frac{1}{\omega_{0}}\sin\psi\sin\omega_{0}\tau \right] \times e^{-b\tau} \right\} - U_{0}\cos\omega_{0}\tau e^{-b\tau}.$$
(26-3)

Максимальное напряжение в переходном процессе зависит от фазы ψ , т. е. момента повторного пробоя. Возможность возникновения повторного пробоя определяется соотношением между ходом кривых возрастания электрической прочности промежутков выключателя и восстанавливающегося напряжения. Эти кривые показаны на рис. 26-6. Кривая $u_{\rm mp}(t)$ сдвинута влево на время $\Delta t < 0,01$ сек, равное интервалу от момента расхождения контактов выключателя до момента гашения емкостного тока и начала роста $u_{\rm s}(t)$. За время Δt контакты успевают разойтись на расстояние $v\Delta t(v -$ скорость движения контактов), и к началу роста $u_{\rm s}(t)$ электрическая прочность промежутков быстро нарастает, как это показано пунктирной линией на рис. 26-6. Так как момент расхождения контактов созершенно случаен, т. е. величина Δt равновероятна в пределах от нуля до 0,01 сек, то условия для возникновения повторного пробоя подчинены статистической закономерности. В наихудшем случае $\Delta t=0$. Повторный пробой возникает при условии, если кривая $u_{\rm B}(t)$ пересекает кривую $u_{\rm np}(t)$; если это пересечение происходит в момент максимума $u_{\rm B}(t)$, то перенапряжения на линии достигают максимального значения. Подставляя в формулу (26-3) $\psi=0$, находим, что амплитуда $U_{\rm nep}$ с учетом емкостного эффекта достигает (3÷3,5) U_{Φ} .

В воздушных и современных масляных выключателях скорость нарастания кривой $u_{np}(t)$ высока и наиболее вероятен повторный пробой в начальный момент нарастания $u_{\rm B}(t)$. Такие повторные пробои не приводят к высоким коммутационным перенапряжениям. В этом можно убедиться, произведя расчет по формуле (26-3) при малых ψ . Поэтому было предложено повторные пробои, происходящие при $\psi < \pi/2$, называть повторными зажиганиями и считать эти коммутации неопасными. Это, однако, справедливо только при больших ω_0 , когда можно прене-

бречь членом $\frac{1}{\omega_0} \sin \psi \sin \omega_0 \tau$ в формуле (26-3). При $\omega_0 < 2$ (линии большой длины) коммутация при $\psi < \pi/2$ приводит к $U_{\text{пер}}$, доходящим до (1,8÷1,9) $U_{\text{уст}}$ или (2,3÷2,5) U_{Φ} , т. е. опасным перенапряжениям для линий СВН. Поэтому для линий СВН, для которых характерны низкие

линии СБП. Поэтому для линии ω_0 , предельный угол ψ , при котором повторные пробои могут считаться неопасными повторными зажиганиями, должен быть существенно снижен.

Современные выключатели высокого напряжения должны иметь дугогасящие системы, допускающие только повторные зажигания, но не повторные пробои. В системах с такими выключателями перенапряжения при отключении холостых линий не представляют опасности. Однако в некоторых очень редких случаях при неблагоприятной схеме сети (большие реактивные сопротивления сети x_s), падении давления воздуха в воздушном выключателе и т. п. все же возможны повторные



Рис. 26-6. Кривые восстанавливающегося напряжения $u_{\rm s}$ и восстанавливающейся прочности $u_{\rm пр}$ для выключателя линии при интервале Δt между началом расхождения контактов и погасанием дуги.

А — момент расхождения контактов; Б — момент погасания дуга; В — повторное зажигание.

пробои, приводящие к перенапряжениям порядка 3,0 U_{Φ} или даже более высоким. Отключения холостых линий выключателями устаревших конструкций, особенно в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью (35 кв и ниже), часто сопровождаются повторными пробоями и коммутационными перенапряжениями высокой кратности.

Современными правилами эксплуатации допускается отключение холостых линий малой длины и шин подстанций разъединителями. При относительно медленном расхождении ножей разъединителя дуга емкостного тока в месте разрыва может многократно гаснуть и вновь зажигаться. Опыты показали, что при этом возникают перенапряжения до $(3,0\div3,5) U_{\Phi}$. Многократное срабатывание разрядника под воздействием этих перенапряжений может повести к его разгушению. 26*

26-3. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОВТОРНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ЛИНИИ (АПВ)

Рассмотрим схему на рис. 26-7, а, в которой однофазное короткое замыкание отключается с обеих сторон и далее происходит автоматическое повторное включение (АПВ), причем из-за разброса времени действия выключатели В1 и В2 отключают и включают линию неодновременно. Предположим для простоты изучения переходного процесса, что выключатель В1 последним отключает линию и первым ее вклю-



Рис. 26-7. Отключение и включение линии в цикле АПВ. 4 — схема сети; 6 — кривая напряжения на выключателе со стороны питания и линии.

чает. Когда линия будет отключена выключателем *B2*, напряжение (установившееся) на здоровых фазах линии будет равно $U_0 = U_{ycr}k_3$, где $U_{ycr} = \frac{E}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}$ — установившееся напряжение в симметричном режи-

ме; k₃ — коэффициент повышения напряжения при однофазном коротком замыкании. При отключении линии в фазах выключателя, питающих здоровые фазы линии, течет емкостный ток, и при обрыве этого тока в момент прохождения через нулевое значение напряжение на проводах имеет амплитудное значение, т. е. равно Uycrka. Как и при отключении холостой линии, это напряжение после отключения В1 поддерживается на проводах остаточными зарядами. Но в отличие от схемы на рис. 26-5 при повторном включении линии заряды на проводах в течение паузы AIIB частично стекают в землю по путям утечки изоляторов. В дождь проводимость этих путей высока, в сухую погоду мала. Стекание заряда, а следовательно, и снижение напряжения на здоровых фазах учитываются коэффициентом k_q , зависящим от длительности бестоковой паузы. В сухую погоду средние значения k_q равны 0,7 для $\Delta t = 0.2$ сек, 0,6 для $\Delta t = 0.4$ сек и 0,5 для $\Delta t = 1$ сек. Следовательно, за время бестоковой паузы напряжение на линии спадает до $k_q U_{\rm ycr}$. Это напряжение и будет являться начальным напряжением U₀ на емкости здоровых фаз при повторном включении линии.

Переходный процесс на здоровых фазах линии по-прежнему выражается формулами простого колебательного контура. Если АПВ было успешным, т. е. однофазное короткое замыкание вновь не возникает, то установившееся напряжение равно U_{ycr} симметричного режима. Если АПВ оказалось неуспешным, то установившееся напряжение на здоровых фазах вновь будет равно $U_{ycr}k_3$.

Предполагая, что коммутация повторного включения произойдет при противоположной полярности источника и в наиболее неблагоприятную фазу коммутации (рис. 26-7,6), получаем формулу для $u_{\text{пер}}$:

при успешном АПВ

$$u_{\mathrm{re}} = U_{\mathrm{ycr}} \left[(\cos \tau - \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}) - k_q k_3 \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau} \right]; \qquad (26-4)$$

при неуспешном АПВ

$$u_{\rm me} = k_3 U_{\rm ycr} \left[\cos \tau - (1 + k_q) \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau} \right], \qquad (26-4a)$$

где k₃ определяется по кривым на рис. 25-4.

Для коротких линий максимальные напряжения определяются формулами [аналогичными формуле (26-2)]:

при успешном АПВ

$$U_{\rm uel} = U_{\rm yc\tau} \left[1 + (1 + k_q k_s) e^{-\frac{1}{2}} \right];$$
(26-5)

при неуспешном АПВ

$$U_{\text{neg}} = k_3 U_{\text{ycr}} \left[1 + (1 + k_q) e^{-v \frac{T}{2}} \right].$$
 (26-5a)

Пример 26-2. Определить значение $U_{\text{пер}}$ в цепи на рис. 26-7,*a* с параметрами (см. пример 26-1): $E = 1,1; \omega_0 = 2,2; T = 2\pi/\omega_0 = 2,85; \delta = 0,1; k_3 = 1,2$ при успешном AIIB в хорошую погоду при $\Delta t = 0,4$ сек.

Указанному значению Δt соответствует $k_q = 0.6$. По формуле (26-5) находим:

$$U_{\text{nep}} = 1, 1 \cdot 1, 26 \left[1 + (1 + 0, 6 \cdot 1, 2)e^{-0.1 \cdot \frac{2.85}{2}} \right] \approx 3, 4.$$

Расчеты по формулам (26-4) и (26-5) показывают, что максимальные $U_{\text{пер}}$ достигают (3÷3,5) U_{Φ} . При учете неодновременности включения и взаимного влияния фаз линии эти значения могут быть еще выше. Повторные включения линий вследствие большой вероятности такой коммутации приводят к наиболее опасным перенапряжениям в сстях.

26-4. ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ Коротких замыканий

Отключение короткого замыкания рассмотрим на простейшей схеме рис. 26-8, а, в которой x_s и b_s — параметры сети. Емкостная проводимость b_s обычно очень мала, и при рабочей частоте ею можно пренебречь. Коммутация — отключение короткого замыкания — происходит при прохождении индуктивного тока через нулебое значение. Напряжение на выключатели может быть найдено из схемы на рис. 26-8, б, в которой источник тока $i_{\rm R,3} = I_{\rm R,3} \sin \tau$ включается на колебательный контур $x_s b_s$. Напряжение $u_{\rm B}(\tau)$ выражается формулой

$$u_{\mu} = I_{K,3} x_s (1 - \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}). \tag{26-6}$$

Кривая $u_{\rm B}(\tau)$ показана на рис. 26-8, в. На начальном участке кривой $u_{\rm B}(\tau)$ определяют $\Delta u_{\rm B}(\tau)/\Delta \tau$ — скорость восстанавливающегося напряжения (с. в. н.) после обрыва дуги в выключателе. Если с. в. н. меньше скоро-



8)

Рис. 26-8. Отключение короткого замыкания за выключателем. a - нсходная схема; 6 - расчетная схема; $s - кривая u_{B}(\tau)$. сти восстановления электрической прочности между контактами, то выключатель успешно отключает ток к. з. В противном случае дуга в выключателе загорается вновь, что затягивает отключение короткого замыкания или даже приводит к разрушению дугогасящих камер выключателя. По современным нормам выключатели должны маркироваться не только по отключаемой мощности $P = \sqrt{3U_{\rm H}}I_{\rm R,3}$, но и по допустимой скорости восстановления напряжения. Для средних напряжений 110-220 кв нормируется с. в. н. в I *кв/мксек* на начальной части кривой $u_{\rm B}(\tau)$.

Наибольшую опасность для выключателя представляют короткие замыкания на линии на расстоянии нескольких километров от выключателя — так называемые неудаленные короткие замыкания (рис. 26-9,*a*). Замещая линию колебательным контуром *x*_n, *b*_n, прихо-

дим к расчетной схеме, показанной на рис. 26-9,6. Напряжение $u_{\rm B}(\tau)$ выражается формулой

$$u_{\rm B} = I_{\rm R,3} x_s \left[(1 - \cos \omega_{0,1} \tau) e^{-b_1 \tau} + \frac{x_{\pi}}{x_s} (1 - \cos \omega_{0,2} \tau) e^{-b_1 \tau} \right]. \quad (26-6a)$$

Частоты колебаний равны соответственно $\omega_{0,1} = \frac{1}{\sqrt{x_s b_s}}$ и $\omega_{0,2} = \frac{1}{\sqrt{x_s b_\pi}}$. Вследствие малости x_π и b_π частота $\omega_{0,2} \ge \omega_{0,1}$. Наиболее опасны короткие замыкания за малым x_s и реактивным сопротивлением x_π , соответствующим $1 - 3 \kappa M$ линии.

В этом случае ток короткого замыкания
$$I_{\kappa,3} = \frac{E}{x_s + x_{\pi}}$$
 практически

не отличается от тока к. 3. на шинах питающей подстанции, напряжение $I_{\text{к,3}} \cdot x_{\pi}$ уже достаточно высоко, а частота восстанавливающегося напряжения со стороны линии $\omega_{0,2}$ также еще велика. Кривая $u_{\text{B}}(\tau)$ и ее составляющие для неудаленного короткого замыкания, построенные по формуле (26-6а), показаны на рис. 26-9,*в*.

Формулы (26-6) и кривые $u_B(\tau)$ на рис. 26-8 и 26-9 действительны при замещении линий П-образными схемами. В реальных, разветвленных сетях кривая напряжения $u_{B1}(\tau)$ со стороны шин апериодична с амплитудой порядка $1,3U_{\Phi}$. В начальной своей части, примерно до 70% амплитуды, u_{B1} нарастает прямолинейно со скоростью (с. в. н.) $I_{1::3}\omega z_{\Theta}$. где z_{Θ} — эквивалентное волновое сопротивление линий, приключенных к шинам (не считая линии, на которой произошло короткое замыкание). При неудаленных коротких замыканиях и учете волновых параметров участка линии восстанавливающееся напряжение со стороны линии имеет пилообразную форму и с. в. н. со стороны линии равна $I_{\kappa,3}\omega z_{\pi}$, где z_{π} — волновое сопротивление линии. Следовательно, суммарная с. в. н. равна $I_{\kappa,3}\omega (z_3+z_{\pi})$. Так как обычно $z_{\pi}\gg z_{3}$, то с. в. н. при неудаленном коротком за-

мыкании значительно превышает нормированные значения. Поэтому во многих странах проводят специальные испытания выключателей в схеме неудаленного короткого замыкания.

26-5. КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ И ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАЗРЫВЕ ПЕРЕДАЧИ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

Пусть в схеме на рис. 26-10, в которой генераторы e1 соедичерез электропередачу нены с мощной приемной системой е2, возник асинхронный режим. В этом режиме ротор е1 и соответственно вектор E_1 вращаются с некоторой малой частотой скольжения относительно вектора системы Е2. Предположим, что выключатель В отключает линию в момент $\tau = 0$, близкий к максимальному расхождению векторов Е1 и Е2. Соответственно мгновенные значения напряжений $e_1 =$ $=E_1 \cos(\tau + \psi_1)$ и $e_2 = -E_2 \times$ При разрыве $\times \cos(\tau + \psi_2)$. линии в колебательном конту-



Рис. 26-9. Отключение неудаленного короткого замыкания.

а — исходная схема; б — расчетная схема; в — крнвая и_в(т) и ее составляющие.



Рис. 26-10. Разрыв электропередачи в асинхронном режиме.

ре xb возникает переходный процесс, обусловленный изменением напряжения на b; до коммутации $u_c = e_2$, после коммутации u_c стремится к величине, определяемой только э. д. с. e_1 .

Колебательный процесс в контуре происходит при ненулевых начальных условиях. В момент $\tau=0$ начальное напряжение на емкости $U_0 = -E_2 \cos \psi_2$. Начальный ток в индуктивности *x* определяется из следующих соображений. Выключатель *B* разрывает цепь при прохождении тока $i_B = i_0 - i_C$ через нуль. Следовательно, в этот момент $i_0 = i_C = E_2 b \sin \psi_2$. Заметим при этом, что углы ψ_1 и ψ_2 связаны между собой соотношением $\frac{E_1 + E_2 \sin (\psi_1 - \psi_2)}{x} + E_2 b \sin \psi_2 = 0$, а следовательно, сущес твует однозначная связь между i_0 и расхождением векторов \dot{E}_1 и \dot{E}_2 . При указанных начальных условиях напряжение на емкости *b* выражается функцией

$$u_{\mathrm{ne}_{1}} = U_{\mathrm{yer}} \left\{ \cos\left(\tau + \psi\right) - \left[\cos\psi\cos\omega_{0}\tau - \frac{1}{\omega_{0}}\sin\psi\sin\omega_{0}\tau \right] e^{-5\tau} \right\} + U_{0}\cos\omega_{0}\tau e^{-\delta\tau} + i_{0}\sqrt{\frac{x}{b}}\sin\varepsilon_{0}\tau e^{-5\tau}, \qquad (26-7)$$

причем обозначения U_{ycr} , ω_0 , δ были введены ранее, $\psi = \psi_1 - \psi_2$.

Возникновению асинхронного режима обычно предшествует форсировка возбуждения генераторов (с целью избежать асинхронного режима). Поэтому значение E_1 оказывается повышенным до 1,2—1,3. Велико также начальное напряжение: $U_0 = -E_2 \cos \psi_2$. Наличие начального тока $i_0 = E_2 b \sin \psi_2$ приводит в процессе колебания к дополнительному подъему напряжения u_{nep} . Вследствие указанных причин амплитуда U_{nep} при разрыве электропередачи в асинхронном режиме доходит до $(3,5 \div 4) U_{\Phi}$, и эта коммутация считается наиболее опасной. Очень высока и амплитуда напряжения на выключателе $U_{\rm B}$, равная $U_{\rm B} = U_{\rm nep} + E_2$. Электрическая прочность между контактами выключателя должна нарасти до значений, превышающих $U_{\rm n}$, за время полупериода $T_0/2$ собственных колебаний контура x, b. Работу выключателя ω_0 .

Современная системная автоматика осуществляет ресинхронизацию систем, вышедших из синхронизма, без отключения электропередачи. Поэтому разрыв электропередачи в асинхронном режиме, да к тому же и в самый неблагоприятный момент максимального расхождения векторов, следует считать редким явлением в системах. В электропередачах, подверженных выпадению из синхронизма, например для слабых межсистемных связей, рационально устройство блокировки, исключающей отключение выключателя в момент, близкий к максимальному расхождению векторов E_1 и E_2 .

26-6. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УЧЕТЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ЛИНИЯМ

В схеме на рис. 26-1,*a*, которая служила основой при изучении переходных процессов, линия замещалась Т- или П-образной схемой с сосредоточенными постоянными. Рассмотрим особенности развития перенапряжений при учете волновых процессов на линиях. При этом система, замещенная ранее реактивным сопротивлением x_s , должна быть представлена с учетом реальной схемы присоединения на шинах подстанции. Обычно к шинам приключено несколько линий; пусть их число равно *n*. Тогда при исследовании волнового процесса на одной из линий остальные n-1 линия должны замещаться своими волновыми сопротивлениями $\frac{z}{n-1}$. В результате схема замещения принимает внд, показанный на рис. 26-11,*a*. В этой схеме реактивное сопротивлении через трансформаторы. Схема пригодна до прихода отраженных волн по одной из n-1 линий.

Особенностью схемы является почти прямоугольный фронт волны, движущейся по линии при включении выключателя B. На конце холостой линии происходит полное отражение. Если линия была заряжена до напряжения $U_0 = -U_{\Phi}$, а число линий n достаточно велико, то напряжение в конце линии вырастает примерно до $3U_{\Phi}$. Фронт волны несколько сглаживается (до десятков микросекуед) под действием потерь в линии.

На рис. 26-11, а рассмотрен только начальный участок волны; дальнейший ее ход определяется многократными отражениями по всем линиям системы. Расчет ампли-

туды волны достаточно точен по схеме замещения с сосредоточенными постоянными. Следовательно, схема (рис. 26-11) уточняет в основном форму фронта волны. Такое уточнение важно при оценке разрядных напряжений воздушной изоляции. Как было указано в § 5-6, разрядное напряжение при коммутационных импульсах с крутым фронтом снижается на 15—20% по отношению к U_.

Другой важный случай коммутационного волнового процесса показан на рис.

Рис. 26-11. Образование коммутационной вол.. ны с крутым фронтсм. а — при включении линии; б — при однофазном коротком замыкании.

26-11,6. На линни под действием коммутационного перенапряжения $U_{0,}$ развившегося, например, в результате включения линии, произошло однофазное короткое замыкание. Разрядная волна — U_0 , дойдя до трансформатора в начале линии, отражается, в результате

чего напряжение поднимется до. $-2U_0 + U_{\Phi}$. Если, например, принять, $U_0 = 2,5U_{\Phi}$, то на трансформаторе возникает волна с крутым фронтом с амплитудой $4U_{\Phi}$. Развитию столь высоких перенапряжений препятствуют вентильные разрядники у трансформаторов. Однако они могут быть опасны для продольной изоляции трансформаторов.

26-7. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ

Отключение индуктивных нагрузок — ненагруженного трансформатора. или реактора — ведет к появлению на них и на выключателе перенапряжений, связанных с обрывом (или «срезом») выключателем индуктивного то-. ка до его естественного перехода через нулевое значение. Высвобождающаяся магнитная энергия в индуктивности переходит в электрическую энергию. в емкости, приключенной параллельно индуктивности; с этой энергией и связано возникновение перенапряжения на емкости. Срез тока обусловлен интенсивной деионизацией промежутка. в выключателе, в результате которой резко падает проводимость дуги еще-



6)







до перехода тока через нулевое значение. Понижение проводимости ведет к снижению мощности, поступающей в дугу, и ее тепловой баланс нарушается. Параллельно дуговому промежутку всегда имеется некоторая емкость; падение проводимости дуги приводит к переходу тока в емкостную проводимость, вследствие чего ток в дуге еще более падает, дуга приобретает неустойчивый характер и гаснет, если только восстанавливающееся напряжение не оказывается достаточным для ее повторного зажигания.

Механизм образования перенапряжений можно проследить по схеме на рис. 26-12, а. В этой схеме трансформатор в ненагруженном режиме представлен эквивалентной схемой L_{μ} , C, g, где L_{μ} — индуктивность намагничивания трансформатора; С — емкость отключаемой обмотки; g — проводимость, эквивалентная потерям в меди и стали.

Собственная частота колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\mu}C}}$ для очень мощных трансформаторов—порядка сотен герц; декремент затухания колебаний $\delta \frac{2\pi}{\omega_0} \approx 0,1$; характеристическое сопротивление $z = \sqrt{L_{\mu}/C}$ — порядка десятков килоом. Срез тока выключателем обычно происходит на спадающей части кривой индуктивного тока i(t), как это показано на рис. 26-12. В момент коммутации начальный ток в индуктивности $i_{\mu} \approx i_{cp}$, а начальное

напряжение на емкости равно — ц_{ср}. После обрыва тока возникают колебания, в ходе которых напряжение на трансформаторе выражается формулой

$$u_{\rm rp} = \left(i_{\rm cp} \sqrt{\frac{L_{\mu}}{C}} \sin \omega_0 t + u_{\rm cp} \cos \omega_0 t\right) e^{-\delta \tau}.$$
 (26-8)

Максимальное напряжение на трансформаторе равно (потерями пренебрегаем):

$$U_{\rm nep} \approx \sqrt{i_{\rm cp}^2 \frac{L_{\mu}}{C} + u_{\rm cp}^2}, \qquad (26-9)$$

причем обычно первый член под корнем значительно превышает второй. Отсюда следует, что перенапряжения примерно пропорциональны

гоку среза i_{cp} и характеристическому сопротивлению цепи $\sqrt{\frac{L_{\mu}}{C}}$. Для каждого типа выключателя можно примерно указать максимальный ток среза i_{cp} .

Кривая напряжения $u_{\rm Tp}(t)$ согласно формуле (26-8) называется ожидаемым напряжением; такие напряжения возможны, если кривая восстанавливающейся прочности выключателя $u_{\rm np}(t)$ идет выше кривой напряжения на выключателе $u_{\rm B}(t) = u_{\rm Tp} - u_s$. При применении выключателя с подобной характеристикой перенапряжения на трансформаторе и выключателе могут достигать очень больших значений. В действительности прочность дугового промежутка обычно ограничивает напряжения $u_{\rm B}$, что приводит к образованию серии повторных зажиганий и погасаний дуги, в результате которых рассеивается энергия, запасенкая в L_{μ} , и снижаются перенапряжения. На рис. 26-13 показана стилизованная осциллограмма отключения малого индуктивного тока. При змачении намагничивающего тока $i_{\rm cp1}$ выключатель создал «срез» и напряжение $u_{\rm B1}$ нарастает в соответствим с кривой ожидаемого напряжения. Вследствие небольшого расхождения контактов выключателя пробивная прочность промежутка еще невелика и происходит повторное зажигание на фронте восстанавливающегося напряжения. Это приводит к высокочастотному разряду емкости C на цепь источника. Вследствие малого значения индуктивности источника L_s это колебание имеет очень высокую частоту. Когда в процессе колебательного разряда запасенная в емкости C энергия в значительной степени рассеется в сопротивлениях g и дуге и малый ток в дуге будет в основном определять-

ся к э. д. с. источника, дуга между контактами вновь гасится. Напряжение на емкости C и на контактах выключателя снова начинает нарастать, но уже по кривой с меньшей крутизной и меньшей ожидаемой амплитудой.

Процесс повторных зажиганий и обрывов дуги продолжается до тех пор, кривая восстанавлипока вающегося напряжения с амплитудой *и*вл уже не будет пересекать кривую прочности промежутка $u_{\rm mp}(t)$. Как видно из рис. 26-13, чем помедленнее нарастает следняя кривая, тем больше повторных зажиганий и гашений дуги имеет место, рассеивается больше тем энергия, запасенная в индуктивности L_{μ} и тем меньше амплитуда перенапряжений на емкости С и на контактах выключателя.

Форма кривой напряжения на трансформаторе при его отключении с повторными зажиганиями показана на рис. 26-14. Соответственно срезам и зажиганиям дуги в выключателе кривая напряжения на трансформагоре приобретает пилообразную составляющую с относи-



Рис. 26-13. Стилизованная осциялограмма напряжения и тока в выклочателе при отключении ненагруженного трансформатора с рядом (1, 2,, n) срезов тока и повторных зажиганий дуги в выключателе.



Рис. 26-14. Стилизовазная осциплограмма напряжения на трансформаторе и на шинах при отключении ненагружезного трансформатора.

тельно низкой частотой — порядка сотен или тысяч герц (низкочастотная составляющая $u_{\rm TP}$). При каждом зажигании дуги, кроме того, происходит высокочастотный процесс перезарядки емкости С через малую индуктивность сети x_s . Частота этих колебаний доходит до десятков и сотен килогерц (высокочастотная составляющая $u_{\rm TP}$), и колебания обычно с трудом различаются на осциллограммах. Наибольшие перенапряжения на трансформаторе возникают при повторном зажигании дуги в момент максимальной разности напряжений сети u_s и на трансформаторе $u_{\rm TP}$ (момент t_1 на кривой рис. 26-14). Такое повторное зажигание приводит к воздействию на трансформатор опасных срезанных волн ΔU .

Пример 26-3. Рассчитать максимально возможное перенапряжение при отключении на стороне 110 кв ненагруженного трансформатора P = 90 Мва, $U_{\rm H} = 110$ кв, $I_{\rm \mu} = 1\%$. Емкость обмотки 110 кв $C = 2\,000$ пф. Ток среза выключателя $I_{\rm CP} = 10a_{\rm Marc}$.

Индуктивность обмотки равна

$$L_{\mu} = \frac{U_{\pi}^2}{\omega P I_{\mu} \%} = \frac{110^2}{314 \cdot 90 \cdot 0.01} = 43 \text{ cm}.$$

Характеристическое сопротивление

$$z = \sqrt{\frac{L_{\mu}}{C}} = \sqrt{\frac{43}{2 \cdot 10^{-9}}} = 14,5 \cdot 10^4 \text{ o.m.}$$

Амплитуда тока намагничивания

$$I_{\mu} = \sqrt{2} \frac{P}{\sqrt{3} U_{\mu}} I_{\mu} = 2 \cdot \frac{90 \cdot 10^3}{3 \cdot 110} \cdot 0.01 = 6.7 a_{\text{MARC}} < I_{\text{cp}}.$$

Так как находится максимально возможное перенапряжение, полагаем, что срез происходит на максимуме тока, т. е. $i_{cp} = 6,7 a$. На максимуме тока $u_{cp} = 0$. Следовательно,

$$U_{\rm nep} = i_{\rm cp} \sqrt{\frac{L_{\mu}}{C}} = 6.7 \cdot 14.5 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3} = 980 \ \kappa e_{\rm maxc}.$$

Полученное U_{nep} совершенно недопустимо для обмотки 110 кв. Практически величина U_{nep} будет ограничена пробоями междуконтактного промежутка выключателя и срабатыванием вентильного разрядника на зажимах трансформатора.

На рис. 26-15 приведены кривые распределения перенапряжений, полученные в опытах отключения холостого трансформатора 110 кв, 20 Мва воздушным выключателем с интенсивным обрывом дуги (кри-



Рис. 26-15. Кривые распределения перенапряжений при отключении холостого хода трансформатора 110 кв, 20 Мва.

вая 1) и масляным выключателем с многократными зажиганнями дугового промежутка (кривая 2). Высокие перенапряжения, возникающие при отключении воздушным выключателем, показывают, что этот тип воздушного выключателя не обеспечивает достаточно «мягкого» гашения малых индуктивных токов.

К современным выключателям предъявляется требование не допускать крутых срезов тока, приводящих к очень высоким коммутационным перенапряжениям. Снижению последних способствует также применение в современ-

ных трансформаторах магнитопроводов из холоднокатаной стали. Такие трансформаторы имеют малый ток намагничивания; этот фактор приводит к уменьшению запасенной в трансформаторе магнитной энергии. Обычно перенапряжения при отключении трансформаторов и реакторов имеют кратность до 2,0—2,5. Более высокие перенапряжения возникают при отключении трансформатора через малый промежуток времени после включения, когда через выключатель проходит большой ток включения. Поэтому такую коммутацию следует считать опасной для изоляции трансформатора и не допускать в эксплуатации.

Эффективным средством ограничения переналряжений при отключении холостых трансформаторов и реакторов служат грозозащитные вентильные разрядники, включенные на выводах этих трансформаторов. Пробиваясь, PB рассеивают энергию, накапливающуюся на емкости трансформатора *C*, и ограничивают $u_{\rm TP}$ до величин, безопасных для изоляции. Пропускная способность обычных грозозащитных PB вполне достаточна для рассеяния этой энергии.

При отключении асинхронных двигателей высокого напряжения (3 кв и выше) возникают перенапряжения, природа которых та же, что и при отключении трансформаторов. При отключении вращающихся (с номинальной скоростью) двигателей перенапряжения не превышают $3U_{\Phi}$. При отключении заторможенного двигателя перенапряжения значительно возрастают, достигая при отключении воздушным выключателем 4,5 U_{Φ} . Такие высокие перенапряжения связаны с резким возрастанием индуктивного тока, потребляемого заторможенным двигателем. В промежуточных случаях, т. е. при вращении двигателя с пониженной скоростью перенапряжения, очевидно, также будут иметь промежуточные значения. Отключения полностью или частично заторможенных двигателей возможны на практике в результате перегрузки при восстановлении напряжения в сети после отключения короткого замыкания.

26-8. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПО КРАТНОСТЯМ Коммутационных перенапряжений

Развитие коммутационных перенапряжений связано с рядом факторов, имеющих статистический характер. К таким факторам относятся собственная частота сети в момент коммутации, фаза коммутации, возникновение повторных пробоев или срезов тока в выключателях и т. п. Вследствие такой связи сами коммутационные перенапряжения, в частности их кратность, имеют статистический характер. По этой причине коммутационные перенапряжения характеризуются кривыми вероятности, построение которых основано на массовых измерениях в электрических сетях.

В последние годы в НИИПТ были проведены широкие исследовання коммутационных перенапряжений на линиях. Эти исследования показали, что ударные коэффициенты при коммутациях мало зависят от схемы сети и длины линий и статистически распределяются в соответствии с нормальным законом (см. § 5-2):

$$P(k_{y,n}) = \frac{1}{\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}}} \int_{-\infty}^{k_{y,n}} e^{-\frac{(k_{y,n} - k_{y,n})^2}{2\sigma^4}} dk_{y,n} = \frac{\frac{k_{y,n} - k_{y,n}}{\sigma^4}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{k_{y,n} - k_{y,n}}{\sigma^4}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$
(26-10)

Для каждого вида коммутации, как и для всех коммутаций в целом, могут быть указаны среднее значение \bar{k}_{yg} и дисперсия σ . Наибольшие значения \bar{k}_{yg} , с которыми еще следует практически считаться, определяются трехсигмовым или двухсигмовым правилом $k_{yg,makc} = \bar{k}_{yg} + + (2 \div 3) \sigma$.

В табл. 26-1 приведены значения \bar{k}_{yg} и о для различных коммутаций по измерениям Д. Е. Артемьева и С. С. Шура.

Таблица 26-1

Параметры статистических распределений ударных коэффициентов (по данным исследований НИИПТ)

№ п/п.	Вид коммутации	Параметры распределения	
		Средний ударный коэффицвент ж _{уд}	Дисперсия с
1 2	Включение холостой линии Отключение холостой линии выключателем	1,61 2,0	0,183 0,34
3	(баковым) с повторными зажиганиями Включение линии в цикле ТАПВ (выключа- тель с отделителем)	1,57+0,55k _q k _a — коэффициент оста-	0,28
4	Включение линии в цикле ОАПВ	точного напряжения на ВЛ 1,6	0,18

Пример 26-4. Определить для условий коммутаций при ТАПВ, указанных в примере 26-2, максимальное значение $U_{\pi ep}$ в соответствии с двухсигмовым правилом. При $\Delta t = 0,6$ сек коэффициент $k_q = 0,4$. По формуле, приведенной к п. 3 табл. 26-1,

$$\bar{k}_{y_2} = 1.57 + 0.55 \cdot 0.4 = 1.75$$

и $k_{yz,makc} = 1,75 + 2.0,28 \approx 2,3.$

Максимальное перенапряжение равно:

$$U_{\text{nep}} = E k_{\text{ycr}} k_{\text{yg,make}} = E k_{\text{c}} k_{\text{s}} k_{\text{yg,make}} = 1, 1 \cdot 1, 26 \cdot 1, 2 \cdot 2, 3 = 3, 8.$$

Это очень высокое перенапряжение. При выборе изоляции ВЛ ориентируются на значения, близкие к средним, а не максимальным значениям.

Располагая параметрами распределения коммутационных перенапряжений \overline{U}_{nep} , σ_n и разрядных напряжений изоляции при коммутационных импульсах U, σ (см. § 5-6), можно вычислить число перекрытий изоляции по линии N_{пер} при заданном числе коммутаций n_к. Г. Н. Александровым выведена формула

$$N_{\Pi e_{\mathrm{p}}} = n_{\mathrm{R}} [1 - (1 - P_{\mathrm{i}})^{m}],$$

$$P_{\mathrm{i}} = \frac{1}{\sigma_{\mathrm{s}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\overline{U}_{\mathrm{nep}}} e^{-\frac{(\overline{U}_{\mathrm{nep}} - \overline{U})^{2}}{2\sigma_{\mathrm{s}}^{2}}} dU_{\mathrm{ner}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\overline{\sigma_{\mathrm{s}}}} e^{-\frac{t^{2}}{2}} dt; \quad (26\text{-}11)$$

$$\sigma_{\mathrm{s}} = \sqrt{\sigma_{\mathrm{s}}^{2} + \sigma^{2}};$$

(1

т—число изоляционных промежутков на линии.

λI

26-9. МЕЖДУФАЗНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Сведения о кратностях перенапряжений, изложенные в предыдущих параграфах, относились к перенапряжениям на фазах; на их основе выбирается фазная изоляция линий и подстанций. Важны также данные о междуфазных перенапряжениях для выбора междуфазной изоляции. Перенапряжения между фазами и_{пер.мф} равны разности перенапряжений на фазах $u_{\text{пер.}\phi}$. Статистическому разбросу $U_{\text{пер.}\phi}$ соответст-вует статистический разброс $U_{\text{пер.}M\phi}$, который осложнен разбросом действия фаз выключателя. Очевидно, что наибольшие $U_{\text{пер.мф}}$ возникают при таком процессе на фазах, когда в момент максимума $u_{\text{пер.ф}}$ их полярности на разных фазах противоположны. Исследования НИИПТ показали, что между средними значениями ударных коэффициентов перенапряжений на фазах ($\bar{k}_{yg,\Phi}$) и между фазами ($\bar{k}_{yg,M\Phi}$) существует почти прямолинейная корреляционная связь. Эта связь показана на рис. 26-16 для коммутации включения линии и включения в цикле АПВ Разброс опытных точек укладывается в заштрихованные области. В среднем можно принять, что $\bar{k}_{yg,M\Phi} = 0.85 \bar{k}_{yg,\Phi}$. С учетом того что $U_{M\Phi} = \sqrt{3}U_{\Phi}$, получаем, что $\bar{U}_{\text{пер.м\Phi}} = 0.85 \sqrt{3}\bar{U}_{\text{гер.\Phi}} = 1.45 \bar{U}_{\text{пер.\Phi}}$. Примерно те же результаты были получены в исследованиях, выполненных в ЧССР.

Междуфазная изоляция состоит из промежутков с электродами симметричной формы (например, провод провод и т. п.) что существенно поднимает их разрядное напряжение. По этой причине междуфазные промежутки на подстанциях, где можно не учитывать раскачивания проводов, принимаются близкими к фазным.

26-10. ОГРАНИЧЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ШУНТИРУЮЩИМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ В ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ

В настоящее время в практике всех стран наметилась тенденция к устрой-



Рис. 26-16. Зависимость (линии регрессии) между средними ударными кээффициентами перенапряжений между фазами $k_{yд.м\phi}$ и на фазах $\overline{k}_{yд.\phi}$. 1 - для включения линин: 2 - для включения линиив цякле АПВ.

ству выключателей (в первую очередь воздушных) с шунтирующими сопротивлениями $R_{\rm m}$. Шунтирующие сопротивления служат для ограничения скоростей и амплитуд восстанавливающихся напряжений и ограничения амплитуд коммутационных перенапряжений.

Две принципиальные схемы выполнения выключателей с $R_{\rm m}$ показаны на рис. 26-17. В обеих схемах отключение происходит в следующем порядке: первыми разрывают ток главные дугогасительные контакты I, которые шунтированы сопротивлением $R_{\rm m}$; после гашения дуги главными контактами в цепи проходит остаточный ток, ограниченный сопротивлением $R_{\rm m}$; этот ток обрывается добавочными контактами 2. Преимущество первой схемы на рис. 26-17, а состоит в том, что во включенном положении выключателя через контакты 2 рабочий ток не проходит и они могут выполняться облегченными. Недостатком этой схемы является необходимость поддержания сжатым воздухом полной изоляции между главными дугогасящими контактами 1 при отключенном положении выключателя. Во второй схеме (рис. 26-17,6) рабочий ток проходит через вспомогательные контакты 2, и это является ее недостатком по сравнению с первой схемой. Зато во второй схеме после обрыва дуги на обоих контактах главные контакты 1 вновь смыкаются,

а разрыв цепи поддерживается (сжатым воздухом) между вспомогательными контактами 2.

Современные воздушные выключатели выполняются многоступенчатыми. Воздушные выключатели серин ВВБ (завод «Электоаппарат») имеют номинальное напряжение ступени (модуля) 50—55 кв. На каждой ступени повторяется схема, приведенная на рис. 26-17, а. Проволочные шунтирующие сопротивления могут иметь величину 100 ом на ступень, и возможно снижение этих сопротивлений до нескольких десятков ом.





Отключение коротких замыканий. Важная роль шунтирующих сопротивлений $R_{\rm m}$ заключается в ограничении скорости роста и амплиту-

ды восстанавливающихся напряжений $u_{\rm B}$ при отключении к. з., в частности наиболее опасных неудаленных коротких замыканий (см. §26-4). При разрыве тока основными контактами 1 сопротивление $R_{\rm m}$ демпфирует колебания в контурах или снижает волновые сопротивления z_{0} и z_{1} . Чем ниже сопротивление $R_{\rm m}$, тем более эффективно ограничивается с. в. н. Однако, с другой стороны, чем ниже $R_{\rm m}$, тем выше с. в. н. во втором цикле — при отключении отделителя 2 и тем более тяжела конструкция $R_{\rm m}$ и отделителя. Оптимальное значение $R_{\rm m}$ — порядка сотен и десятков ом. Шунтирующие сопротивления такого порядка эффективны также для ограничения восстанавливающихся и коммутационных перенапряжений при разрыве электропередачи в асинхронном режиме.

Отключение холостых линий. При отключении холостой линии роль шунтирующего сопротивления $R_{\rm m}$ заключается в предотвращении повторных пробоев в выключателе путем ограничения амплитуды восстанавливающегося напряжения на контактах 1 выключателя. После обрыва дуги на контактах 1 остаточный заряд на емкости линии стекает через сопротивление $R_{\rm m}$ и индуктивность сети в землю, что приводит к снижению $u_{\rm B}(t)$.

На рис. 26-18 показано семейство кривых $u_{\rm B}(t)$ в долях напряжения источника E для типовой линии 220 кв. Как видно из кривых, чтобы добиться амплитуд $u_{\rm B}$, не превышающих E, требуется значение $R_{\rm m} \leq 3$ ком.

Включение линии в цикле AПВ. В § 26-3 было показано, что перенапряжения при включении линии в цикле AПВ достигают опасных значений вследствие сохранения на линии остаточных зарядов. Можно



Рис. 26-18. Кривые восстанавливающегося напряжения на главных контактах выключателя при отключении ненагруженных линий в зависимости от величаны $R_{\rm m}$: l=200 км.

разрядить линию через $R_{\rm m}$ и тем самым резко снизить перенапряжения. Заряд, стекающий с линии емкостью C, заряженной до напряжения U, равен:

$$q = \int_{0}^{\Delta t} i \, dt = \int_{0}^{\Delta t} \frac{U_{\bullet}}{R_{\rm m}} e^{-\frac{t}{T}} \, dt,$$

где Δt — интервал включения $R_{\rm m}$, $T = R_{\rm m}C$.

Подставляя значение Т и выполняя интегрирование, получаем:

$$q(\Delta t) = U_0 C (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}).$$
 (26-12)

В цикле АПВ вспомогательные контакты или отъединитель (см. рис. 26-17) отключаются с запаздыванием Δt по отношению к главным контактам. Примем, что $\Delta t = 0,15$ сек, C = 3 мкф (l = 300 км). Если принять $\Delta t = 2T$, то согласно формуле (26-12) за интервал Δt стечет около 90% остаточного заряда линии. При этих соотношениях $R_{\rm m} = 25$ ком. Такие беличины уже приближаются к значениям сопротивлений для выравнивания напряжения между разрывами выключателя. Таким образом, наиболее опасные перенапряжения при АПВ могут быть эффективно ограничены даже высокоомными, а следовательно, маломощными шунтирующими сопротивлениями.

Включение холостых линий. Перенапряжения при включении линий достигают опасных значений на линиях СВН вследствие пониженных уровней изоляции на этих линиях и больших длин линий. Поэтому в последние годы стали уделять внимание снижению Unep при включеныи линий (имеется в виду включение без остаточных зарядов на линии в цикле АПВ). Для этой цели в ЛПИ было предложено О. В. Щербачевым, К. П. Кадомской выполнять выключатели с R_m двустороннего действия. В этой конструкции R_m предотвращает возникновение опасных перенапряжений как при отключении, так и при включении линий. В схеме выключателя по рис. 26-17, а для этого необходимо, чтобы процесс включения протекал в следующей последовательности: вначале замыкаются вспомогательные контакты 2 с R_m, а затем главные контакты 1. В схеме на рис. 26-17,6 операция включения должна происходить в следующей, более сложной последовательности: вначале размыкаются главные контакты, затем замыкаются вспомогательные контакты 2, после чего вновь замыкаются контакты 1. В обеих схемах при включении контактов 2 емкости С заряжаются через сопротивление $R_{
m m}$. Чем выше сопротивление R_m, тем ниже U_{пер} в этой коммутации. Однако с повышением R_m растет U_{пер} при замыкании главных контактов 1 и шунтировании R_m.

Влияние $R_{\rm m}$ на перенапряжения при включении линии иллюстрируется рис. 26-19, на котором приведены кривые, вычисленные для повторного включения линии выключателями с $R_{\rm m}$ и без него. В обоих случаях предполагалось, что напряжение, остающееся на линии к моменту повторного включения, $U_0=1$. Фактически, если выключатель снабжен шунтирующим сопротивлением, U_0 будет существенно ниже, что дополнительно снижает перенапряжение.

Оптимальные значения \hat{R}_{m} , обеспечивающие минимальные перенапряжения при включении линии, составляют 500—1 000 ом при длинах линии соответственно 400—200 км.

Отключение ненагруженных трансформаторов. Шунтирующие сопротивления могут служить также для ограничения перенапряжений при 27—641 отключении малых индуктивных токов. В первом цикле отключения (разрыв главных контактов) параллельно обрываемому току i_{cp} включено сопротивление R_{m} . В этом цикле перенапряжение на контактах выключателя не превысит $i_{cp}R_{m}$. Во втором цикле отключения роль R_{m} заключается в ограничении тока и сглаживании колебаний при возникновении повторных зажиганий. Этому условию отвечает неравенство

 $R_{\rm m} < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{-\mu}{C}}$. Соответственно значениям характеристических сопротивлений трансформаторов $R_{\rm m}$ должно быть порядка десятков килоом.

Из изложенного видно, что затруднительно выбрать $R_{\rm m}$ наилучшим образом удовлетворяющее всем требованиям. Для ограничения с. в. н. при коротких замыканиях и перенапряжений при включении линий необходимы низкоомные $R_{\rm m}$. Такие же $R_{\rm m}$ предотвращают повторные про-



Рис. 26-19. Кривые напряжения на линии длиной 340 км при ее АПВ выключателем. Напряжение, остающееся на линии к моменту АПВ, принято равным 1; продолжительность введения R_{m} на включение 4 мсек. $1 - 6 es R_{m}; 2 - c R_{m} = 400$ ом.

ствия шунтирующих сопротивлений в выключателях высшего номинального напряжения.

Эффективным средством улучшения защитного действия шунтирующих сопротивлений является использование для их изготовления материалов с нелинейной вольт-амперной характеристикой вида $u = Ci^{\alpha}$. Шунтирование выключателя такими сопротивлениями тем эффективнее,

бои при отключении холостых линий. Для ограничения перенапряжений при отключении малых индуктивных токов необходимы высокоомные R_ш. Такие же R_ш можно использовать для ограничения перенапряжений при АПВ.

С номинального ростом напряжения растет число разрывов *n*, и если $\Delta R_{\rm m}$ — шунтирующее сопротивление одного разрыва, то $R_{\mathfrak{m}} = n\Delta R_{\mathfrak{m}}$. С другой стороны, с ростом номинального напряжения снижается волновое сопротивление линий, повышаются их длина и емкость и, следовательно, несколько снижается необходимое значение R_ш. Поэтому значения $\Delta R_{\rm m}$ должны снижаться крайней мере пропорциопо нально номинальному напряжению выключателя Выполнение этого условия приводит пропорциональному возраĸ станию мощности сопротивлений $\Delta R_{\rm m}$ с ростом $U_{\rm H}$ и неунифицированному выполнению этих сопротивлений для выключателей разного номинального напряжения. Поэтому заводы-изготовители часто выполняют выключатели с неизменными $\Delta R_{\rm m}$, что приводит к ухудшению защитного дейчем ниже коэффициент вентильности а. Основная трудность, связанная с конструированием нелинейных сопротивлений, заключается в необходимости обеспечить для них высокую пропускную способность.

26-11. РАЗРЯДНИКИ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Так как коэффициент импульса вентильного разрядника близок к единице, можно считать, что разрядное напряжение искрового промежутка РВ при коммутационных перенапряжениях равно разрядному напряжению при промышленной частоте¹.

Как было указано в гл. 21, грозозащитные разрядники РВМГ рассчитаны на прохождение тока до 400 а при длительности 2000 мксек. В сетях 110—220 кв токи коммутационного происхождения обычно не превосходят этих значений. Следовательно, в сетях 110—220 кв разрядники РВМГ могут быть использованы для ограничения коммутационных перенапряжений.

В электропередачах СВН 330 кв и выше коммутационные токи в РВ достигают 1000-2000 a при длительности в 1-2 полупериода промышленной частоты. Разрядник должен гасить сопровождающий ток рабочей частоты при высоких напряжениях гашения U_{гаш}, возможных при коммутациях в системе. Этим условиям обычные грозозащитные разрядники уже не удовлетворяют, в связи с чем в СССР выпускаются комбинированные магнитно-вентильные разрядники РВМК для защиты от коммутационных и грозовых перенапряжений. Разрядники РВМК выпускаются на напряжения 330-750 кв. Искровые промежутки разрядника РВМК имеют ту же конструкцию (с вращающейся дугой), что и грозовых разрядников (см. рис. 21-7). Рабочее сопротивление состоит из тервитовых дисков, обладающих в несколько раз большей пропускной способностью, чем вилитовые диски. Однако коэффициент нелинейности тервита несколько хуже, Линия чем вилита-

Вследствие относительно высоких коэффициентов нелинейности остаточное напряжение на рабочем тервитовом сопротивлении при прохождении расчетного импульсного грозового тока (10 ка) превышает допустимое значение. Для снижение этого напряжения используется схема, показанная на рис. 26-20. Эта схема построена в расчете на более высокие напряжения гашения при развитии коммутационных перенапряжений $U_{\rm гаш.к}$, чем при грозовых перенапряжениях $U_{\rm гаш.гр}$. Разрядник действует следующим образом. При коммутационных перенапряжениях работают искровой промежуток 1 и рабочее сопротивление 2. Ток в рабочем сопротивлении 2" ($I \ge 1500$ а) недостаточен для срабатывания искрового промежутка 3.

Рис. 26-20. Принципиальная схема комбинированного разрядника РВМК.

1 — основной искровой промежуток; 2 — основное рабочее сопротивление разрядника; 2' — рабочее сопротивление грозовой части разрядника; 2' шунтыруемая часть рабочего сопротивления; 3 — дополнительный (шунтырующий) искровой промежуток.



¹ Исключение составляют лишь случаи падения волн с крутым фронтом, когда пробивное напряжение PB определяется по его импульсной характеристике.

Сопротивление 2 ограничивает сопровождающий ток при напряжении *U*_{гаш.к} до значения, при котором он гасится искровыми промежутками 1. При атмосферных перенапряжениях и прохождении через сопротивление 2" импульсного тока 2000 а срабатывает искровой промежуток 3 и рабочее сопротивление РВ ограничивается участком 2'. Этот участок



Рис. 26-21. Вольт-амперные характеристики комбинированного вентильного разрядника 500 кв.

 2. 3 — характеристики рабочих сопротивлений 2. 2['], 2[']; U_{пр.д} пробивное напряжение дополнительно искрового промежутка.

в то же время ограничивает сопровождающий ток при напряжении U_{гаш.гр} до необходимой для гашения величины

Вольт-амперная характеристика комбинированного разрядника PBMK-500 приведена на рис. 26-21 (жирная линия). Она состоит из отрезков характеристик рабочего сопротивления 2 (кривая 1) и сопро-



Рис. 26-22. Принципиальная схема комплектного искрового промежутка разрядника с магнитным дугогашением со 100%-ной восстанавливающейся прочностью.

 2 — рабочие искровые промежутки разрядника; 3 — дополнительный искровой промежуток. тивления 2' (кривая 2). При прохождении тока I = 1500 *а* остаточное напряжение на PBMK-500 составляет 1050 кв, или 2,5 U_ф. Пробивное напряжение искрового промежутка разрядника при промышленной частоте или коммутационных импульсах составляет 2,25 U_ф.

Таким образом, разрядник РВМК-500 ограничивает амплитуды коммутационных перенапряжений до $(2,25 \div 2,5) U_{\Phi}$. Напряжение гашения разрядника $U_{\text{гаш.к}} = 485 \ \kappa s$, т. е. 1,6 U_{Φ} .

В дальних электропередачах напряжение промышленной частоты при разрыве передачи может превышать $1,6 U_{\Phi}$. В этом случае необходимы специальные мероприятия по ограничению напряжения (см. гл. 28). Возможно также выполнение искровых промежутков коммутационных разрядников по схеме, показанной на рис. 26-22, обеспечивающей 100%-ную восстанавливающуюся прочность искрового промежутка. Ра

бота схемы по рис. 26-22 заключается в следующем. Под действием перенапряжения срабатывает промежуток 3 и высокий потенциал через высокоомное сопротивление R₃ подается в точку а. Под действием этого потенциала срабатывает промежуток 2, точка а приобретает нулевой потенциал и срабатывает промежуток 1. Коммутационный ток отводится через вентильные сопротивления и промежутки 1 и 2. На этих промежутках гасится сопровождающий ток рабочей частоты. В промежутке 3 ток ограничивается высокоомным сопротивлением R_3 до нескольких ампер и легко гасится. Таким образом, в схеме на рис. 28-22 напряжение срабатывания разрядника устанавливается промежутком 3, а напряжение гашения — промежутками 2 и 1. Это позволяет выбирать верхний предел напряжения гашения почти равным нижнему пределу напряжения срабатывания РВ. Разрядники этого типа маркируются как РВМКП.

Комбинированные магнитно-вентильные разрядники предназначены для установки на линиях. На подстанциях СВН коммутационные токи через РВ существенно ниже, чем на линиях; ниже также и напряжение гашения. Поэтому на подстанциях СВН грозозащитные разрядники РВМГ в состоянии ограничить также коммутационные перенапряжения.

26-12. ВЛИЯНИЕ РЕАКТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ. Приключенных к линии, на развитие коммутационных перенапряжения

В ряде схем при отключении линий электропередачи на них остаются приключенными реакторы поперечной компенсации или трансформаторы напряжения. По индуктивности этих элементов остаточные (свободные) заряды на проводах отключаемой линии могут стекать в землю. В результате снижаются восстанавливающиеся напряжения и коммутационные перенапряжения при отключении линии выключателем с повторными пробоями и при включении линии в цикле АПВ.

В схеме с реактором после обрыва тока в выключателе напряжение на линии не остается постоянным, как в схеме без реакторов, а имеет колебательный характер с собственной частотой $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{x_p b_a}}$. Собственная частота ω_0 близка к рабочей (обычно несколько ниже ее, поскольку реакторы *P* компенсируют только часть емкости линии).



Рис. 26-23. Кривые напряжений на шинах u_{m} , на линии u_{a} и на контактах выключателя u_{B} при отключении линии с реактором поперечной компенсации.

Кривые напряжений на линии и на выключателе показаны на рис. 26-23. Из этих кривых видно, что через полпериода, когда при отсутствии реакторов можно ожидать наиболее опасного повторного зажигания, восстанавливающееся напряжение в данной схеме тем меньше, чем ближе частота ω_0 к рабочей частоте. Исследования показали, что при ω₀≈0,8 и повторном пробое в самый неблагоприятный момент кратность перенапряжений снижается до 1,5—2,0.

При повторном включении в цикле АПВ за время бестоковой паузы колебания на линии сильно затухают и начальное напряжение U_0 к моменту повторного включения снижается. Тем самым ограничиваются перенапряжения при повторном включении.

В схеме с электромагнитным трансформатором напряжения заряд линии после обрыва тока в выключателе стекает через нелинейную индуктивность трансформатора напряжения. Магнитную характеристику насыщающейся индуктивности можно представить в виде ломаной, показанной на рис. 26-24, а. Когда поток достигает значения $\Psi_{\text{нас}}$, индук-



Рис. 26-24. Кривая намагничивания (a) и расчетная схема (б) насыщающейся индуктивности трансформатора напряжения.

тивность трансформатора изменяется скачком с очень высокого значения нормального режима $L_{\rm H}$ до малой величины $L_{\rm Hac}$ в режиме насыщения. Этот процесс можно условно представить в виде схемы замещения, показанной на рис. 26-24,6. Замыкание ключа K снижает индуктивность цепи с $L_{\rm H}$ до $L_{\rm Hac}$. Последовательно включено активное сопротивление R обмотки трансформатора. Замыкание ключа K происходит, когда поток Ψ в индуктивности L достигает значения $\Psi_{\rm Hac}$.

Напряжение на насыщающейся индуктивности до точки насыщения равно:

$$u = \frac{d\Psi}{d\tau} \approx \frac{\Psi_{\text{Hac}}}{\Delta \tau},$$

где $\Delta \tau$ — время от момента включения схемы на источник с постоянным напряжением $U_{\rm 0}$ (момент обрыва тока в выключателе) до момента, когда поток Ψ окажется равным $\Psi_{\rm Hac}$, т. е. до момента замыкания ключа K. Полагая, что в это время напряжение на емкости C не изменяется, находим:

$$\Delta \tau = \frac{\Psi_{\text{HBC}}}{U_0}.$$

Предположим теперь, что в рабочем (синусоидальном) режиме индукция в магнитопроводе близка к точке насыщения, что позволяет принять $U_0 = \omega \Psi_{\text{нас}}$. Следовательно $\Delta \tau = \frac{1}{\omega} \approx \frac{1}{3}$ полупериода рабочей частоты. Таким образом, через $\Delta \tau = 1/3$ в схеме замещения на рис. 26-24 происходит замыкание ключа K, в результате чего емкость C разряжается через малую индуктивность $L_{\text{нас}}$ и активное сопротивление R. Разряд емкости носит характер сильно затухающих нелинейных колеба-

ний (для линий 110—220 кв) либо является апериодическим (для линий 500 кв).

Сопротивления R трансформаторов напряжения составляют примерно 25 ом на 1 кв номинального напряжения. Так, например, НКФ-500 имеет $R \approx 12,5$ ком. Такое сопротивление вполне достаточно для полного разряда емкости линии за время бестоковой паузы при АПВ. Следовательно, электромагнитные трансформаторы напряжения служат эффективным средством предотвращения наиболее опасных перенапряжений при повторных включениях. Примером этому могут служить многие волжские линии 500 кв, на которых установлены трансформаторы напряжения НКФ-500 и не установлены разрядники РВМК. На этих линиях автоматические катодные осциллографы (ЛПИ) не

исали перенапряжений выше 2,5U_ф. На напряжениях 110—220 кв ктромагнитные трансформаторы напряжения эффективно ограничиэт также перенапряжения при отключении линий выключателями овторными пробоями.

В сетях СВН имеется тенденция внедрения наиболее экономичных эстных трансформаторов напряжения. Эти трансформаторы, очею, не обладают свойством отвода зарядов линии. Поэтому при их льзовании особенно целесообразно выполнение выключателей с деими высокоомными шунтирующими сопротивлениями, способными яжать линию за бестоковую паузу цикла АПВ.

Вопросы и задачи для самопроверки

. Рассчитать кратность перенапряжения при включении линии в схеме на 6-1 при $x_0 = 0.5$, волновом сопротивлении линии z = 1 и длине линии l = 400 км. . Рассчитать кратность перенапряжения на той же линии при повторном вклюв цикле АПВ в схеме на рис. 26-7 на устойчивое однофазное короткое замыкаля точки к. з. отношение $x_0/x_1 = 2$. Бестоковая пауза $\Delta t = 0.5$ сек.

. Определите необходимое значение $R_{\rm m}$ для снижения остаточного напряжения нии до 0,1 начального значения за время бестоковой паузы AIIB, равной $\Delta t = zek$.

.. Рассчитать форму фронта волны на линии при ее включении в схеме на 5-11, а при $z=1, x_s=0,5$ и n=4.

і. Нарисуйте кривые напряжения на шинах и линин при отключении в схеме ~ 26.5 холостой линии с $\omega_0 = 4$ с повторным пробоем при $\psi = 120^\circ$; 30°. Приводят пробои к опасным перенапряжениям?

. Рассчитайте «ожидаемое» перенапряжение при отключении холостого транстора с параметрами, приведенными в примере 26-3, но при $I_{\mu}=3\%$ и $i_{cp}=12$ а. . Рассчитайте форму восстанавливающегося напряжения в схеме на рис. 26-9 $_{0,1}=10, z=1$ и длине линии до точки короткого замыкания $l=3 \ \kappa M$. Какими средиможно снизить с. в. н. при этом неудаленном коротком замыкания?

3. Каков порядок включения и отключения контактов в выключателе двусторондействия со схемой контактов по рис. 26-17. Определите оптимальное значение ля двухступенчатого включения линии длиной 400 км, питающейся от системы (ностью к. з. P=100 Msa.

). Опишите конструктивную схему разрядника PBMK и его действие при комионных и грозовых перенапряжениях.

). Перечислите меры (конструктивные, схемные и устройств автоматики) по ограию коммутационных перенапряжений.

Глава двадцать седьмая

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

1. НЕУСТОЙЧИВОЕ ГОРЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ ДУГИ И РАЗВИТИЕ Перенапряжений

Исталлическое замыкание на землю в сети с изолированной нейю приводит к повышению напряжения на здоровых фазах до $\sqrt{3U_{\Phi}}$ (в отсутствие резонансных явлений). Такие напряжения нормальная изоляция этих сетей должна выдерживать длительно. Если же замыкание на землю происходит через неустойчивую (перемежающуюся) дугу, горение которой сопровождается повторными погасаниями и зажиганиями, то на здоровых а также на поврежденной фазах сети возможно развитие перенапряжений.

Перенапряжения возникают при неустойчивом горении заземляющей дуги и сопровождаются смещением нейтрали системы, что может быть вызвано остаточными зарядами на емкостях при гашениях дуги. Были выдвинуты две основные теории развития перенапряжений. Согласно первой теории (Петерсена) остаточные заряды в системе обусловлены гашением дуги замыкания на землю в момент прохождения через нуль тока высокочастотного колебания, возникающего при зажигании дуги аналогично тому, как это имеет место в выключателях при отключении емкостной нагрузки. Согласно второй теории (Петерс и Слепян) гашение дуги происходит при прохождении тока рабочей частоты через нулевое значение. Вероятность того или иного механизма гашения дуги определяется деионизирующими факторами, воздействующими на дугу.

Гашение открытой дуги в воздухе обычно управляется током рабочей частоты. Дуга в масле может часто гаснуть и при прохождении через нуль высокочастотного тока. Большинство исследователей сходится на том, что возможны оба механизма гашения заземляющей дуги. В соответствии с тем или иным механизмом гашения дуги строится теория дуговых перенапряжений — по Петерсену или по Петерсу и Слепяну. Обе теории дают верхние значения амплитуд перенапряжений.

В Советском Союзе были выполнены серьезные исследования (У. М. Джувары, Н. Н. Беляков), в существенной степени разъяснившие механизм развития дуговых перенапряжений. Как показано Н. Н. Беляковым, существенную роль в этом механизме играет не столько вопрос о моменте гашения дуги, сколько фактор восстановления электрической прочности дугового промежутка после гашения дуги. От скорости восстановления прочности дугового промежутка зависит возможная амплитуда смещения потенциала всей системы, а следовательно, и возможные перенапряжения.

27-2. РАЗВИТИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕМСЯ ДУГОВОМ Замыкании на землю в трехфазной сети с изолированной нейтралью

Допустим, что в трехфазной сети на рис. 27-1 в результате ряда повторных зажиганий и погасаний дуги накопился свободный заряд,





лагаясь на фазные э. д. с. источника e_a , e_b , e_c , создает напряжения на фазных емкостях сети. Напряжение на поврежденной фазе a восстанавливается после гашения дуги с собственной частотой сети

накопился своюодный заряд, который после очередного погасания дуги равномерно распределяется по емкостям фаз b_{Φ} и создает на нейтрали напряжение смещения $U_{\rm см}$. Излагаемая теория (Н. Н. Белякова) не привязана к тому или иному механизму гашения дуги (Слепяна или Петерсена), и в этом ее большое достоинство. Напряжение $U_{\rm см}$, на-

 $\omega_0 \gg 1$ с нулевого значения до значения $u_a = e_a + U_{cm}$ (рис. 27-2). В ходе колебательного процесса напряжение иа достигает максималь-



Рис. 27-2. Восстановление напряжения на поврежденной фазе при гашении емкостной дуги замыкания на землю.

Рис. 27-3. Преобразованная схема рис. 27-1, иллюстрирующая снижение и_{пер} в соответb_o ствии с коэффициентом $\frac{-w}{b_{\Phi} + b_{M\Phi}}$

ного значения — пика гашения Unr. Величина этого пика ограничена

ка. Наименьшая величина U_{п.г} возникает, если дуга гасится в момент минимума напряжения $e_a + U_{cM}$ на фазе, как это показано на рис. 27-2. В этом случае $U_{\rm п.r} = 2 (U_{\rm см} - U_{\rm Ф}),$ откуда

$$U_{\rm cm} = U_{\Phi} + \frac{U_{\rm n.r}}{2}$$
. (27-1)

Колебательное восстановление напряжения на поврежденной фазе а не приводит к немедленному повторному зажиганию дуги лишь в том случае, если $U_{\rm n,r}$ будет меньше восстановившейся прочности дугового промежутка. Обработка многих осциллограмм, снятых при специальных опытах в сети 6—10 кв, показала, что максимальная вели- $U_{\mathbf{n}.\mathbf{r}}$ ограниченная чина прочностью дугового проме- $0,4U_{\Phi}$. жутка, составляет (27-1)Тогда из формулы находим, что максимальная величина U_{см} равна 1,2 U_ф (положительного или отрицательного знака).

восстанавливающейся электрической прочностью дугового промежут-



Рис. 27-4. Осциллограммы развития перенапряжений в трехфазной сети с изолированной нейтралью.

Определим теперь возможные перенапряжения в трехфазной сети (рис. 27-1). Величина перенапряжения определяется по формуле

$$u_{\rm mep} = u_{\rm yc\, r} + (u_{\rm yc\, r} - u_{\rm H}) \frac{b_{\Phi}}{b_{\Phi} + b_{\rm M\Phi}} (1 - d), \qquad (27-2)$$

где u_{ycr} и u_{H} — установившееся и начальное напряжения на фазах при повторном зажигании;

$$\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{\kappa\phi}}$$
 — коэффициент, учитывающий уменьшение амплитуды коле-

баний из-за влияния междуфазных емкостей;

d — коэффициент затухания высокочастотных колебаний.

Напряжение на какой-либо из здоровых фаз до повторного зажигания $u_{\rm H} = U_{\Phi} \sin(\tau + \psi) + U_{\rm CM}$; после повторного зажигания и затухания переходного процесса напряжение на фазе достигает линейного и равно $u_{\rm ycr} = \sqrt{3} U_{\Phi} \sin\left(\tau + \psi + \frac{\pi}{6}\right)$. Момент повторного зажигания должен быть выбран так, чтобы $u_{\rm neff}$, вычисленное по формуле (27-2), достигало максимального значения.

Мального значения. Объясним происхождение коэффициента $\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{x\phi}}$. После зажигания дуги емкость b_{ϕ} поврежденной фазы оказывается закороченной, а емкости b_{ϕ} здоровых фаз соединяются параллельно с междуфазными емкостями $b_{m\phi}$ (рис. 27-3). При таком соединении происходит перераспределение свободного заряда между емкостями и снижение свободного напряжения $u_{cu} = u_{\mu} - u_{ycr}$ в соответствии с коэффициентом $\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{x\phi}}$. Значение коэффициента для линий 35 кв составляет в среднем 0,75.

Коэффициент затухания (1-d) можно принять равным 0,9.

На рис. 27-4 приведены кривые напряжений на одной из здоровых фаз при величине $U_{cm} = -1,2 U_{\phi}$. Максимальное перенапряжение на здоровой фазе возникает при повторном зажиганин вблизи максимума напряжения u_{ycr} ; достаточно близкое значение мы получим, если для упрощения расчета примем, что повторное зажигание происходит точно в момент максимума u_{ycr} . Тогда

$$u_{ycr} = \sqrt[4]{3} U_{\Phi} \sin \frac{\pi}{2} = \sqrt[4]{3} U_{\Phi};$$
$$u_{R} = U_{\Phi} \sin \frac{2\pi}{3} + U_{CM} = U_{\Phi} \frac{\sqrt{3}}{2} - 1, 2U_{\Phi} = -0, 34U_{\Phi}.$$

Примем $\frac{b_{\Phi}}{b_{\Phi} + b_{\mu\Phi}} = 0,75$ и 1 — d = 0,9; тогда

 $U_{\rm nep} = 1,73 + (1,73 + 0,34)0,75 \cdot 0,9 = 3,13U_{\rm b}.$

Максимальные перенапряжения оказываются порядка (3,0÷ 3,2) U_{Φ} .

Многочисленные измерения, выполненные за последние годы рядом исследователей, показали, что указанные значения действительно являются предельными для перенапряжений дуговых замыканий на землю. Опыты ставились при горении дуги как в воздухе, так и в масле. Для возникновения максимального перенапряжения достаточен один цикл «гашение—зажигание». Причиной часто наблюдаемого увеличения перенапряжений к концу горения дуги является постепенное возрастание напряжений зажигания вследствие растягивания дуги. С ростом емкостного тока дуга становится более устойчивой, что ведет к снижению вероятности возникновения высоких перенапряжений.

Кратковременные перенапряжения порядка 3U_ф не опасны для нормальной изоляции на рабочих напряжениях до 35 кв включительно. Од-

Unep





Ue 4.5 **4**,0 3,5 Ъф 3,0 0.2 0.4 0.6 0 0.8 1.0 Рис. 27-6. Зависимости перенапряжений от отношения b_{a}/b_{ϕ} . 1 — при отсутствии междуфазной емкости (b_{м.ф.}=0); 2 — при междуфазной емкости $b_{M\Phi} = \frac{1}{3} b_{\Phi}$.

нако длительные перенапряжения могут повести к перекрытию загрязненной изоляции.

27-3. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ Перемежающемся дуговом Замыкании на землю и обрыве провода

Существенное повышение перенапряжений происходит при дуговом замыкании на землю, сопровождающемся обрывом фазного провода

(рис. 27-5,*a*). Такой обрыв может явиться следствием теплового действия заземляющей дуги. Причину возрастания кратности перенапряжений легко усмотреть из эквивалентной однофазной схемы на рис. 27-5,*6*.

Вследствие обрыва провода емкость поврежденной фазы $b_n < b_{\Phi}$. Междуфазное напряжение $E_{\vartheta} = 1,5U_{\Phi}$ создает на проводах потенциалы (напряжения относительно земли), равные $E_{\vartheta} \frac{b_{\vartheta}}{b_{\vartheta} + b_{\pi}}$ на поврежденной фазе и $E_{\vartheta} \frac{b_{\pi}}{b_{\vartheta} + b_{\pi}}$ на здоровой фазе. Напряжение смещения нейтрали при погасании дуги будет равно:

$$U_{\rm CM} = E_{\vartheta} \frac{b_{\vartheta}}{b_{\vartheta} + b_{\rm fl}} + \frac{U_{\rm n,r}}{2}.$$
(27-3)

Сравнение (27-3) и (27-1) показывает, что в рассматриваемом случае напряжение $U_{\rm CM}$, а следовательно, и возможные перенапряжения, определяемые (27-3), будет тем выше, чем больше отношение $\frac{b_{\rm B}}{b_{\rm E} + b_{\rm R}}$. При $b_{\rm H}$ =0 (потеря всей емкости фазы) $U_{\rm CM} = 1,5 U_{\rm \Phi} + \frac{U_{\rm R,F}}{2}$. На рис. 27-6 построены

ŧ.

зависимости максимальных перенапряжений от отношения $b_{\rm m}/b_{\rm o}$. Кр. рассчитаны для трехфазной сети по формулам (27-2) и (27-3) при усл $U_{\rm m,r} = 0.4U_{\rm O}$. Как видно из кривых, при малом $b_{\rm m}/b_{\rm o}$, т. е. при отсоед нии большей части емкости поврежденной фазы, возможны опасные изоляции перенапряжения.

27-4. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕМСЯ ДУГОВОМ Замыкании на землю в сети с дугогасящей катушкой

Дугогасящая катушка гасит дугу однофазного замыкания на зеі н тем самым устраняет причину развития перенапряжений. Одн в тех случаях, когда замыкание на землю сопровождается резким жением изоляции, наблюдаемым, например, в случаях пробоя или воо



Рис. 27-7. Восстановление напряжения на поврежденной фазе при гашении дуги в сети с дугогасящей катушкой.

разрушения изоляторов, падения проводов на землю, набросов и т дуга замыкания на землю не гаснет и может приобрести неустойчин перемежающийся характер с повторными гашениями и зажигания В этих случаях на емкостях сети при очередном гашении дуги мо сохраниться остаточные заряды, поднимающие потенциал нейтрали $U_{\rm CM}$. Как и при изолированной нейтрали, переход напряжения на врежденной фазе от нулевого значения к $U_{\rm CM} + U_{\Phi}$ происходит пу ... колебания с высокой частотой $\omega'_0 \gg 1$ (рис. 27-7). Одновременно в контуре развиваются колебания с низкой частотой $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3b_{\Phi}x_{\rm K}}}$, где $x_{\rm K}$ — индуктивное сопротивление дугогасящей катушки. Частота ω_0 близка к 1, что приводит к возникновению биений с частотой $(1 - \omega_0)$, как это показано на рис. 27-7.

Через полупериод биений $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{1 - \omega_0}$ напряжение на поврежденной $-\delta \frac{T}{2}$

фазе оказывается равным $U_{\Phi} + U_{c \, \bowtie} e^{-z}$ аналогично тому, как это имело место и в случае изолированной нейтрали.

Если в этот (или близкий к нему) момент произойдет зажигание дуги на поврежденной фазе, то перенапряжение на здоровой фазе в ре-

428

[Γ.

6666666666666666

«TEN

элебаний будет по-прежнему определяться по формуле (27-2),

$$u_{\rm M} = U_{\Phi} \sin(\tau + \psi) + U_{\rm CM} e^{-b \frac{T}{2}}.$$
 (27-4)

соотношения видно что возможные перенапряжения тем ниже, $\delta \frac{T}{2}$, т. е. при заданном затухании δ больше период биений T

е расстройка дугогасящей катушки
$$v = 1 - \omega_0^2$$
.

эвательно, улучшая настройку катушки, мы тем самым сниозможные кратности дуговых перенапряжений. С другой стоа больших расстройках катушки возможны перенапряжения, ющиеся по амплитуде от тех, которые развиваются при изолинейтрали. В некотором отношении катушка даже может споить развитию перенапряжений. Вследствие возрастания отрезка от момента погасания дуги до максимума напряжения на дуге т также интервал времени деионизации дуги и становится юятным повторное замыкание дуги в наиболее неблагоприятент времени, соответствующий максимуму ипер.

Вопросы и задачи для самопроверки

считайте максимально возможное перенапряжение в сети с изолированной при возникновении перемежающегося дугового замыкания на землю, пола-

).4
$$U_{\Phi}$$
; $\frac{b_{\Phi}}{b_{\Phi} + b_{\mu\phi}} = 0.75$; $d = 0.15$.

4

:считайте для того же примера $U_{\text{пер}}$ при условии обрыва провода одной $b_{\phi} = 0.5$.

ъясните, какое влияние на максимально возможные перенапряжения при м замыкании на землю имеет: а) настройка дугогасящей катушки; б) затуиточного напряжения на фазах.

Глава двадцать восьмая

РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

3-1. РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ НА РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЕ

резонансных перенапряжениях проявляется емкостный эффект й. Как было показано в § 25-1, при замене линий Т-образной схезамещения установившееся напряжение на емкости линии выражаформулой

$$U_{\mathrm{yc}\,\mathrm{T}} = E \, \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}} \cdot$$

С увеличением длины линии собственная частота сети $\omega_0 \rightarrow 1$ и соэтственно U_{ycr} неограниченно возрастает (при неучете потерь). Возает явление резонанса. Однако длинные линии уже неправомерно ещать Т- или даже П-образной схемой, и расчет следует вести на ове уравнений длинных линий. Рассмотрим типовую схему, показанную на рис. 28-1, в которой длинная линия односторонне включена через реактивность x_s сети к источнику напряжения E. Линия задана параметрами симметричного режима — волновым сопротивлением z и скоростью распространения v. Электрическая длина линии $\lambda = l/v$.

Записываем общие уравнения длинной линии без потерь, связывающие напряжения и токи на рабочей частоте в начале и конце линии

$$U_{1} = U_{2} \cos \lambda + j z I_{2} \sin \lambda;$$

$$\dot{I}_{1} = \dot{I}_{2} \cos \lambda + j \frac{\dot{U}_{2}}{z} \sin \lambda.$$
(28-1)

В рассматриваемой схеме ток на конце линии $I_2 = 0$ и, следовательно, уравнения (28-1) присбретают вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda; \ \dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_1}{z} \sin \lambda,$$

откуда находим входное сопротивление линии:

$$z_{\text{BX}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = -jz \operatorname{ctg} \lambda. \tag{28-2}$$

При длине линии до 1500 км (λ до $\pi/2$) $z_{\text{вх}}$ имеет емкостный характер. Эквивлентное емкостное сопротивление линии $x_{C\mathfrak{s}} = z \operatorname{ctg} \lambda$. Напряжение в начале линии

$$U_{1} = E \frac{x_{C9}}{x_{C9} - x_{s}} = E \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega_{0,2}^{2}}},$$
 (28-3)

где $\omega_{0s}^2 = x_{Cs}/x_s$. Вид формулы (28-3) такой же, как и для простого колебательного контура.

Отношение напряжений в конце и начале линии U_2/U_1 называется коэффициентом передачи напряжения. Из формулы (28-1) следует, что для холостой линии без потерь этот коэффициент равен:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \lambda}.$$
 (28-4)

Формула (28-3) показывает, что чем ближе x_{C3} к x_s , т. е. чем больше длина линии и меньше мощность источника, тем выше перенапряжения в начале линии. Формула (28-4) показывает, что на конце линии напряжение дополнительно возрастает. Отношения U_2/E в зависимости от длины линий при разных x_s показаны на рис. 28-1 пунктирными линиями. На возрастающих частях кривых 1, 2, 3 $x_{C3} > x_s$, и в цепи проходит емкостный ток; на спадающих частях кривых $x_{C3} < x_s$, и в цепи проходит индуктивный ток. Условию точного резонанса соответствует $x_{C3} = x_s$ и ординаты кривых уходят в бесконечность (в цепи без потерь).

Длины линий СВН могут достигать 1 000 км и более, и соответственно отношения U_2/E по кривым на рис. 28-1 могут возрастать весьма значительно. Рост U_2/E ограничивается активным сопротивлением проводов и действием развивающейся на них общей короны. Влияние активного сопротивления проводов учитывается коэффициентом потерь $\delta = R/2x$, где R и x — активное и индуктивное сопротивления линии.

Входное сопротивление линии с потерями имеет комплексную форму:

$$z_{\text{BX}} = -jz \operatorname{ctg} \lambda [1 + j\delta(\lambda \operatorname{tg} \lambda + \lambda \operatorname{ctg} \lambda - 1)], \qquad (28-5)$$

а коэффициент передачи напряжения равен:

$$\frac{\dot{U}_s}{\dot{U}_1} = \frac{1}{\cos\lambda + j\delta\lambda\sin\lambda}.$$
(28-6)

Общая корона возникает на проводах линии СВН уже при напряжении, на 15—20% превышающем рабочее напряжение линии, и является основным фактором, ограничивающим

резонансные повышения напряжения рабочей частоты.

Как было установлено в § 10-8, с короной связаны активная проводимость и дополнительная емкость фаз линии. Зависимости g_{κ} и ΔC_{κ} от напряжения U были заданы формулами (10-19). Проводимость g_к ведет к снижению напряжений; дополнительная емкость ΔC_{κ} , увеличивая электрическую длину линий, вызывает некоторое повышение напряжений, но в целом корона эффективно ограничивает перенапряжения, превышающие 2,00. Это видно из хода сплошных кривых на рис. 28-1, построенных с учетом короны на проводах. Резонансный пик, амплитуда которого не ограничена в линейной цепи без потерь, ограничивается короной до $(2,5 \div 2,85) U_{\Phi}$. Но и эти значения (имеется в виду длительность резонансных перенапряжений) все же чрезмерны для электропередач СВН. Кроме того, интенсивная корона создает существенные помехи для каналов связи. Поэтому на линиях СВН большой длины принимают специальные меры по ограничению резонансных перенапряжений (см. § 28-2).



Рис. 28-1. Схема односторонне включенной длинной линии и зависимость напряжения в конце холостой линии без учета потерь (пунктирные кривые) и с учетом короны (сплошные кривые) от длины линии.

 $1 - x_s/z = 1; 2 - x_s/z = 0,4; 3 - x_s/z = 0.$

28-2. ОГРАНИЧЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИИ НА ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ С ПОМОЩЬЮ РЕАКТОРОВ

Перенапряжения, обусловленные емкостным эффектом, возникают при одностороннем включении линии, необходимом, например, для синхронизации электропередачи с приемной системой. Поэтому перенапряжения следует ограничнть до значений, близких к максимальному рабочему напряжению электропередачи. Ограничение осуществляется с помощью шунтовых реакторов, которые называются также реакторами поперечной компенсации. Реакторы компенсируют емкостный ток линии и, следовательно, уменьшают эквивалентную емкость линии, что в соответствии с формулой (28-3) снижает напряжение U₁. Снижается также перепад напряжения между началом и концом линии. Реакторы для снижения перенапряжений при одностороннем отключении линии используют также для поддержания экономичного режима при снижении нагрузок в элекгропередаче. По этой причине реакторы устанавливаются не по концам линии, а в промежуточных точ-



Рис. 28-2. Схема с реактором в промежуточной точке линии (a) и зависимость $U_{\rm M}/U_1$ от мощности реактора и места его установки (б).

1 — реактор в середине линин: 2 — реактор в конце линии; 3 — реактор в начале линии.

Токи связаны между собой уравнением

$$\dot{I}'_{1} = \dot{I}'_{2} + \dot{I}_{p} = \dot{I}'_{2} - jb_{1}\dot{U}_{p}.$$
 (28-76)

Решая совместно уравнения (28-7) и (28-76), находим входное сопротивление линии z_{BR} . Обычно реакторы только частично компенсируют емкостный ток и поэтому z_{BR} сохраняет емкостный характер. Следовательно, $z_{BR} = -jx_{CR}$. Эквивалентное емкостное сопротивление линии равно:

$$x_{C9} = z \frac{\cos \lambda + q_{\rm p} \sin \lambda_1 \cos \lambda_2}{\sin \lambda - q_{\rm p} \cos \lambda_1 \cos \lambda_2}.$$
 (28-8)

Через q_р обозначена проводимость или мощность реактора в относительных единицах:

$$q_{\rm F} = z b_{\rm F} = \frac{Q_{\rm p}}{P_{\rm Har}}$$

Из системы уравнений (28-7), (28-7а) и (28-7б) находим также коэффициент передачи напряжения:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\cos \lambda + q_p \sin \lambda_1 \cos \lambda_2}.$$
 (28-9)

На рис. 28-2 показано влияние места установки и мощности реактора на наибольшее напряжение промышленной частоты U_{макс}, наблю-

ках ее, обычно на промежуточных точках ее, обычно на промежуточных подстанциях, где осуществляется питание потребителей, расположенных по трассе линии. Если эти потребители маломощные, то питание осуществляется от самих реакторов по схеме деления напряжения или от вторичной обмотки реактора, используемого в этом случае также в качестве понизительного трансформатора.

Эффект ограничения перенапряжений с помощью реакторов рассмотрим по схеме, показанной на рис. 28-2, в которой реактор с реактивной проводимостью b_p включен на расстоянии λ_1 от начала линии. Записываем уравнения для участков λ_1 и λ_2 :

для участка λ_2 ($I_2=0$)

$$\dot{U}_{\rm p} = \dot{U}_{\rm z} \cos \lambda_{\rm z}; \ \dot{I}'_{\rm z} = j \frac{\dot{U}_{\rm z}}{z} \sin \lambda_{\rm z}; \ (28-7)$$

для участка λ_1

$$\dot{U}_{i} = \dot{U}_{p} \cos \lambda_{i} + jz\dot{I}'_{i} \sin \lambda_{i}; \dot{I}_{i} = \dot{I}'_{i} \cos \lambda_{i} + j\frac{U_{p}}{z} \sin \lambda_{i}.$$
 (28-7a)
даемое в односторонне включенной линии 500 кв длиной 900 км. Кривые $U_{\text{макс}}/U_1 = f(q_p)$ рассчитаны для трех характерных случаев размещения реактора — в середине или на концах ВЛ, что соответствует $\lambda_1 = -\lambda_2 = \lambda/2$; $\lambda_1 = \lambda$ и $\lambda_2 = 0$ или $\lambda_1 = 0$ и $\lambda_2 = \lambda$.

Как видно из рис. 28-2, наименьшее влияние оказывает реактор, помещенный в начале линии. Эффективность реактора, расположенного в середине или в конце линии, почти одинакова. При установке реактора в начале или середине линии наибольшие напряжения наблюдаются на ее конце ($U_{\text{макс}} = U_2$); при установке реактора в конце линии макси-мальное напряжение возникает в середине линии, причем $U_{\text{макс}} = U_2 \sqrt{1+q_p^2}$.

Наиболее эффективно распределение реактивной мощности вдоль линии, однако при этом возрастает суммарная стоимость реакторов и стоимость их установки. Поэтому реакторы на линиях устанавливают в одном-двух пунктах.

28-3. РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Предположим, что в конце длинной линии, находящейся под нагрузкой, произошло однофазное короткое замыкание (рис. 28-3). Линия вначале отключается со стороны системы II и до отключения со стороны системы I остается в режиме одностороннего включения с одно-

фазным коротким замыканием на конце. На здоровых фазах возникает повышение напряжения (перенапряжение), значение которого определяется по кривым на рис. 25-4 в зависимости от отношения x_0/x_1 .

Для схемы на рис. 28-3 реактивные сопротивления x₀ и x₁, рассчитанные из места короткого замыкания относительно шин *I*, равны:

 $x_1 = z_1 \operatorname{tg} \lambda_1; \ x_0 = z_0 \operatorname{tg} \lambda_0,$

где индексы 0 и 1 относятся соответственно к нулевой и прямой последовательности;

$$\frac{x_0}{x_1} = \frac{z_0}{z_1} \cdot \frac{\lg \lambda_1}{\lg \lambda_0}.$$
 (28-10)

На рис. 28-3 приведена кривая коэффициента $k_3 = U_2/U_1$ в зависимости от длины линни l, параметры которой приведе-



Рис. 28-3. Коэффициенты повышения напряжения k₃ при однофазном коротком замыкании в конце длинной линии. Выключатель B1 включен, B2 отключен.

ны в табл. 25-3. Вследствие высокого значения λ_0 отношение x_0/x_1 резковозрастает, уже начиная с длин порядка 800 км. С ростом длины линии растет и напряжение U_{ycr} симметричного режима, поэтому напряжение $U_{пер}$ в несимметричном режиме достигает очень высоких значений.

Шунтовые реакторы, устанавливаемые на линии для снижения напряжений симметричного режима, снижают и напряжения при одно-28—641 фазных коротких замыканиях. В данном случае эффект реакторов сказывается как в снижении U_{ycr} симметричного режима, так и в снижении отношений x_0/x_1 и коэффициента k_a .

28-4. РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ Коммутациях фаз линии

При неодновременном включении или отключении фаз линии выключателями или разъединителями возможны схемы, в которых одна или две фазы линии оказываются разорванными в одной точке. В возникающей несимметричной схеме возможны резонансные перенапряжения, обусловленные резонансом схем прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В общем виде универсальная комплексная схема с одной отключенной фазой показана на рис. 28-4,*а* (потери не учитываются). Соединяя две параллельные ветви в одну, получаем схему по рис. 28-4,*б*. Общее реактивное сопротивление схемы равно:

$$x = \frac{x_1}{2} + \frac{x_0 - x_1}{3} = \frac{2x_0 + x_1}{6}.$$

Здесь под x_1 и x_0 подразумеваются входные сопротивления линии по прямой и нулевой последовательностям, определенные из точки разрыва.

Полный резонанс возникает при условии $2x_0 + x_1 = 0$, откуда находим:

$$\frac{x_0}{x_1} = -0,5$$
 или $\frac{b_0}{b_1} = -2.$ (28-11)

Это условие показывает, что резонанс возникает при различных знаках входных реактивных сопротивлений x₀ и x₁.

6)

Перенапряжения будут тем выше, чем ближе отношение x0/x1

t

Unep

к условию полного резонанса (28-11). Перенапряжения ограничиваются насыщением стали магнитопроводов или короной на проводах.

Рассмотрим несколько конкретных примеров возникновения резонансных перенапряжений.

1. Линия СВН с реакторами поперечной компенсации оказалась вклюдвумя фазами ченной (рис. 28-5). Емкостные проводимости или сопротивления линии показаны в виде звезды с изолированной нейтралью И звезды с заземленной нейтралью. Емкостная проводимость линии для пряпоследовательности мой равна b_{1л}, для нулевой последовательности $b_{0\pi}$. Проводимость схемы пря-



z,

x,

Тı

a)

Ia-I1





Рис. 28-5. Схема односторонне включенной линии с реакторами при одной отключенной фазе.

Εc

мой последовательности равна $b_1 = -b_p + b_{1\pi}$; обычно $b_{1\pi} > b_p$ и проводимость b_1 имеет емкостный характер. Проводимость схемы нулевой последовательности равна $b_0 = -b_p + b_{0\pi}$. Вследствие меньшего значения $b_{0\pi}$ проводимость b_0 может иметь индуктивный характер.





Условие полного резонанса (28-11) записывается в данном случае в виде

 $\frac{-b_{p}+b_{e^{\pi}}}{-b_{p}+b_{1^{\pi}}}=-2.$



Рис. 28-7. Блок автотрансформатор — длинная линия при одностороннем включении двумя фазами. *а* – нсходная схема; *б* – схемы замещения для прямой и нулевой последовательностей.

Перенапряжение U_{пер} возникает на отключенной фазе линии. При реакторах без стального сердечника перенапряжения ограничиваются только короной на проводах линии. Для примера на рис. 28-6 приведе-





ны расчетные и опытные кривые амплитуд перенапряжения в функции длины линии 400 кв (или пропорциональной длине емкости линии). Как

видно из кривых, корона ограничивает перенапряжения до 1,75U_ф. 2. Линия с повышающим автотрансформатором (рис. 28-7,*a*) включается с низкой стороны двумя фазами (выключатели на высокой стороне не установлены). Автотрансформатор имеет компенсационную обмотку, сое-

диненную треугольником.

Схемы прямой и нулевой последовательностей показаны на рис. 28-7, б. Реактивное сопротивление прямой последовательности x₁ имеет емкостный характер (отрицательно); реактивное сопротивление нулевой последовательности x₀ вследствие наличия шунта имеет обычно индуктивный характер

компенсационной обмотки x_{σ_*} имеет обычно индуктивный хара (положительно). При x_0/x_1 , близком к — 0,5, возникает резонанс. 28*

На рис. 28-8 приведены расчетные значения перенапряжений на фазе линии 500 кв, одноименной с невключившейся со стороны 220 кв. Кривые указывают на возможность очень высоких резонансных перенапряжений, которые в действительности ограничиваются короной и насыщением магнитопровода трансформатора.

28-5. РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЦЕПЯХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ИНДУКТИВНОСТЯМИ

На резонансные явления в электрических системах существенное влияние оказывают ферромагнитные элементы. Такими элементами являются шунты намагничивания трансформаторов, а также шунтовые реакторы (поперечной компенсации) и дугогасящие катушки. В расчетах эти элементы представляются нелинейными индуктивностями L^{μ} . На рис. 28-9 показаны характеристики $i=f(\Psi)$, связывающие мгновен-



Рис. 28-9. Типовые кривые намагничивания. *I* — трансформатора; *2* — реактора; *I*_{µH} — номинальный ток намагничивания трансформатора; *I*_µ — номинальный ток трансформатора или реактора. Принято, что для трансформатора *I*_{µH} = 0,02 *I*_H.

ограничивается насыщением магнитопроводов.

 Когда собственная частота колебаний линейной части цепи, включая начальное значение индуктивности ферромагнитного элемента, близка к полному резонансу (ω₀≈1), амплитуды колебаний ограничиваются в основном насыщением, а не активными сопротивлениями цепи. Возникают скачки режима—так называемые феррорезонансные скачки.

3. При насыщении магнитопровода ферромагнитного элемента поток основной гармоники (рабочей частоты) порождает нечетные высшие гармоники n=3, 5, 7..., которые можно назвать сопутствующими гармониками (n—частота гармоники по отношению к основной частоте).

4. В цепи с нелинейной индуктивностью может возникнуть резонанс на высших гармониках (ультрагармониках) и на дробных гармониках (субгармониках). В свою очередь, высшие гармоники могут быть разделены на нечетные (n=3, 5, 7...) и четные (n=2, 4, 6...)*. По четности знаменателя можно разделить и дробные гармоники на нечетные ($n=\frac{1}{3}, \frac{1}{5}...$) и четные ($n=\frac{1}{2}, \frac{1}{4}...$).

Источником высших и дробных гармоник является нелинейная индуктивность, в которой при определенных фазовых условиях (зависимых от внешней цепи) происходит преобразование энергии: энергия на основной частоте (n=1), поступающая от источника напряжения, преобразуется в энергию колебаний на n-й гармонике $(n \neq 1)$.

 $= f(\Psi)$, связывающие міновенные значения потокосцепления Ψ с током *i* для трансформатора и реактора. Шунты намагничивания трансформаторов имеют характеристику $i=f(\Psi)$ с резко выраженной нелинейностью . Реакторы и дугогасящие катушки имеют стальной магнитопровод с большими воздушными зазорами, и по этой причине их характеристика близка к линейной.

Влияние ферромагнитных элементов на резонансные явления состоит в следующем: 1. Повышение напряжения рабочей частоты вследствие емкостного эффекта (или повышения э. д. с. генераторов) Перечислим особенности резонанса на п-й гармонике.

а) Для резонанса на *n*-й гармонике необходимо, чтобы линейная часть цепи (включая начальную индуктивность ферромагнитного элемента) имела собственную частоту, близкую к частоте *n*. Активные потери в цепи должны быть малы.

б) Резонанс на *n*-й гармонике может проявляться в скачкообразном нарастании *n*-й гармоники или в возникновении *n*-й гармоники в результате переходного процесса в цепи, вызванного какой-либо коммутацией.

Нечетные высшие гармоники (n=3, 5...) сопутствуют основной гармонике в любой цепи, а не только в резонансных условиях. При резонансе возникает резкое возрастание амплитуды n-й гармоники. Высшие четные и дробные гармоники могут возникать только в колебательной цепи, в которой имеются резонансные условия на данной гармонике.

в) Так как нелинейная индуктивность играет роль преобразователя энергии между основной и резонансной гармоникой, то естественно, что для возникновения резонанса на *n*-й гармонике необходима определенная степень насыщения нелинейной индуктивости. От формы характеристики нелинейной индуктивности должна зависеть возможность резонанса па той или другой гармонике. Чем более нелинейную форму имеет характеристика индуктивности, тем богаче возможность резонанса на высших и дробных гармониках.

В последующих параграфах приводится более подробное описание форм резонансных явлений и методов их расчета на основной гармонике (рабочей частоте) и на высших и низших гармониках.

28-6. ОГРАНИЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫМИ ИНДУКТИВНОСТЯМИ И ФЕРРОРЕЗОНАНС НА ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКЕ

При упрощенном изучении резонансных колебаний на основной гармонике удобно использовать вольт-амперную характеристику (в. а. х.) нелинейной индуктивности по первой гармонике или по действующему значению¹. В основе метода в. а. х лежит допущение, что высшие гармоники, всегда сопутствующие первой гармонике, относительно малы и могут не учитываться в расчете. Все напряжения и токи в цепи полагаются гармоническими функциями, нелинейная индуктивность L_{μ} представляется сопротивлением x_{μ} , для которого действителен оснозной закон линейного элемента $\dot{U}_{\mu} = j x_{\mu} \dot{I}_{\mu}$, но x_{μ} зависит от амплитуды тока I_{μ} (или напряжения U_{μ}). Вид вольт-амперной характеристики $U_{\mu} = \varphi(I_{\mu})$ для нелинейной индуктивности—шунта намагничивания трансформатора — показан на рис. 28-10. По осям отложены значения U_{μ} и I_{μ} , причем за базисные величины приняты номинальное напряжение и номинальный ток трансформатора (при $U_{\mu} = U_{\rm R}$ $I_{\mu} \approx 0,02I_{\rm B}$).

Метод в. а. х. позволяет использовать для расчета нелинейных цепей все методы линейных цепей. В общем случае электрическая цепь с нелинейной индуктивностью может быть приведена к схеме, в которой линейная часть схемы замещается эквивалентным источником напряжения E_3 (напряжением холостого хода) и эквивалентным сопротивлением z_3 (сопротивление короткого замыкания).

Эквивалентное сопротивление z_{3} может быть индуктивного или емкостного характера. Разберем оба этих случая. Эквивалентная индуктивная схема приведена на рис. 28-11, а. Падения напряжения на x_{3} и x_{4} скла-

¹ Вольт-амперная характеристика $U_{\mu} = \varphi(I_{\mu})$ связывается с характеристикой мгновешных значений $i=f(\Psi)$ путем выделения первых гармоник напряжения и тока.

дываются; обычно в расчетах можно пренебречь малым активным сопротивлением z_3 . Графический расчет напряжения в U - I координатах для индуктивной эквивалентной схемы показан на рис. 28-11,6. Пересечение в. а. х. нелинейной индуктивности x_{μ} и в. а. х. линейной части цепи $U = E_3 - Ix_3$ определяет искомые U_{μ} и I_{μ} . Как видно из приведенного построения, нелинейная индуктивность снижает напряжение основной гармоники в цепи.

Пример 28-1. Задана схема на рис. 28-12 с источником E=1, предвилюченным сопротивлением (в долях от волнового сопротивления линии z=1) $x_s=0,4$, линией без потерь длиной l=600 км и шунтом намагничивания трансформатора на конце (реактивностью рассеяния пренебрегаем). Мощность трансформатора равна натуральной мощности линии. Найти напряжение основной гармоники в конце линии.

Находим параметры эквивалентной схемы. По методу активного двухполюсника E_0 равно напряжению на конце холостой линии. По кривой 2 на рис. 28-1 находим, что $E_0 \approx 1,7$. Сопротивление z_0 равно сопротивлению линии со стороны шунта при закороченном источнике. Это сопротивление в данном случае выражается формулой

$$z_0 = j x_0 = j \frac{x_s + \lg \lambda}{1 - x_s \lg \lambda}.$$

где волновая длина линии $\lambda = \frac{600}{3\,000}\pi = 0,628$. При $\lambda < \frac{\pi}{2} x_{\circ}$ положительно, [т. е. $z_{\rm m}$ имеет индуктивный характер. Подставляя числовые значения, находим $x_{\circ} = 1,6$. Числовые значения, соответствующие этому примеру, приведены на рис. 28-11,6. Из графика видно, что искомое напряжение $U_{\mu} = 1,3$.



Рис. 28-10. Вольт-амперная характеристика магнитного шунта трансформатора.

Эквивалентная емкостная схема показана на рис. 28-13, а. Как видно из рисунка, цепь приводится к простому колебательному контуру, в котором могут возникать условия для феррорезонанса. Графический расчет напряжений для эквивалентной емкостной схемы показан на рис. 28-13, б. В этой схеме падения напряжения на x_{C2} и x противоположны по знаку; вблизи резонанса уже нельзя пренебрегать r_2 . По



Рис. 28-11. Расчет напряжения U_{μ} в эквивалентной индуктивной схеме. *а*—эквивалентная схема: *б*—графический расчет по вольт-амперным характеристикам элементов схемы (численные значения соответствуют примеру 28-1).

общим правилам расчета цепей переменного тока записываем:

$$E_{\mathfrak{d}} = \sqrt{(U_{\mu} - I_{\mu} x_{C\mathfrak{d}})^{2} + (I_{\mu} r_{\mathfrak{d}})^{2}},$$

$$U_{\mu} = \sqrt{E_{\mathfrak{d}}^{2} - (I_{\mu} r_{\mathfrak{d}})^{2}} + I_{\mu} x_{C\mathfrak{d}}.$$
(28-12)

откуда

Первое слагаемое в правой части представляет графически эллипс с полуосями, равными $\pm E_{\mathfrak{d}}$ и $E_{\mathfrak{d}}/r_{\mathfrak{d}}$. Сумма ординат этого эллипса и наклонной прямой $I_{\mu}x_{C_{\mathfrak{d}}}$ дает правую часть уравнения (28-12). Точки пересечения полученной кривой с вольт-амперной характеристикой $U_{\mu} = \varphi(I_{\mu})$ определяют напряжение на нелинейной индуктивности x_{μ} .



3,5 3,0 2,5 2,0 FIL. 1,5 $(E_{3}^{*}-(I_{\mu}r_{3})^{2}+I_{\mu}x_{C_{3}})$ 10 E3 - 0,5 0.4 0,6 0.8 10 -05 -1,6 6

Рис. 28-13. Расчет напряжения U_µ в эквивалентной емкостной схеме.

а -- эквивалентная схема; б -- графический расчет по вольт-амперным характеристикам элементов схемы (численные значения соответствуют примеру 28-2).

Как видно из построения, приведенного на рис. 28-13,6, графики пересекаются в трех точках 1, 2 и 3. Возможность существования трех режимов в цепи при одной и той же E_{2} является характерной особенностью нелинейной цепи. При малых или очень больших x_{C2} пересечение происходит только в одной точке (точка 1 на рис. 28-13,6).

В идеальном случае отсутствия потерь (r_э=0) уравнение (28-12) приобретает вид:

$$U_{\mu} = \pm E_{a} + I_{\mu} x_{Ca} \tag{28-12a}$$

и наклонный эллипс вырождается в две параллельные прямые, указанные на рис. 28-13,6 пунктиром и пересекающиеся с характеристикой $U_{\mu} = f(I_{\mu})$ в точках 1, 2' и 3'. Очевидно, что для $r_{\theta} = 0$ при сколь угодно малых $x_{C_{\theta}}$ возможно существование в цепи трех режимов.

[Гл. 28

Изменяя наклон прямой $I_{\mu}x_{C^{3}}$, можно найти значения U_{μ} при разных $x_{C^{3}}$ и построить (при неизменном E) кривую U_{μ} в зависимости от $x_{C^{3}}$ или какого-либо другого параметра, связанного с $x_{C^{3}}$ функциональной зависимостью.

На рис. 28-14 показана резонансная кривая $U_{\mu} = \varphi(b_{\vartheta})$, где $b_{\vartheta} = 1/x_{C\vartheta}$. Каждому значению U_{μ} соответствуют два значения b_{ϑ} , а каждому значению b_{ϑ} — три или одно значение U_{μ} . При изменении b_{ϑ} в точках a и b происходят феррорезонансные скачки напряжения; в точке a напряжение скачкообразно падает, в точке b— скачкообразно возрастает. При скачках



Рис. 28-14. Зависимость напряжения U_{μ} от эквивалентной емкостной проводимости $b_{\mathbf{B}}$ в схеме на рис. 28-13.

происходит опрокидывание, т. е. изменение на 180°, фазы напряжения U_{μ} . Режимы, лежащие на ветви ab, неустойчивы, т. е. физически нереализуемы. Поэтому эта ветвь показана пунктиром. При отсутствии потерь $(r_{a}=0)$ ветви кривой $U_{\mu}=\varphi(b_{a})$, показанные на рис. 28-14 тонкими линиями, не пересекаются при возрастании b_{a} . Такая зависимость, понятно, физически недостижима.

В линейной колебательной цепи резонансная кривая $U_{\mu} = \varphi(b_{\theta})$ имеет вид, показанный на рис. 28-14 штрих-пунктиром. Нелинейность приводит к своеобразному завалу кривой и ограничению напряжений U_{μ} . Физически это объясняется следующим образом. В то время как в линейной цепи при подходе к точке полного резонанса напряжения и токи, ограниченные только активными сопротивлениями, могут резко возрастать, в нелинейной цепи рост тока приводит к изменению x_{μ} и расстройке контура. Следовательно, нелинейная индуктивность ограничивает все напряжения и токи в колебательной цепи основной гармоники, эффект ограничения приводит к возникновению феррорезонансных скачков.

Пример 28-2. Задана схема, показанная на рис. 28-15,а, с источником E=1, предвключенным сопротивлением $z_s=r_s+jx_s$ с добротностью $x_s/r_s=10$, двумя параллельными линиями длиной 600 км ($\lambda=0,628$) с параметрами z=1, $\delta=0,05$ и шунтом намагничивания трансформатора в начале линии (реактивностью рассеяния со стороны ВН нренебрегаем). Мощность трансформатора равна натуральной мощности линий. Требуется найти зависимость напряжения (основной гармоники) U_{μ} от реактивного сопротивления x_s .

Покажем ход расчета для одного значения x_s , например $x_s=2$. В этом случае сопротивление z_s равно $z_s=0,2+j2$. По формуле (28-2) находим входное сопротивление двух параллельных линий, подставляя z=1, $\lambda=0,628$, $\delta=0,05$: $z_{Bx}=1/2$ (0,022—j1,37) =

Полученное выражение показывает, что r_s=0,32 и реактивное сопротивление имеет емкостный характер: x_{Cs}=1,05. Эквивалентная э. д. с. равна:

$$|E_{\mathfrak{p}}| = \left|\frac{EY_{\mathfrak{s}} + 0Y_{\mathfrak{p}\mathfrak{x}}}{Y_{\mathfrak{s}} + Y_{\mathfrak{p}\mathfrak{x}}}\right| \approx 0.5$$

где

$$Y_{\bullet} = \frac{1}{z_{\bullet}}$$

И

$$Y_{\mathtt{px}} = \frac{1}{z_{\mathtt{px}}}.$$

Осуществляем построение, показанное на рис. 28-13.6, применительно к числовым значениям данного примера. По точкам пересечения *I*, *2*, *3* находим три значелия U_{μ} : 0,5 (точка *I*), 1,95 (точка *2*) и 1,68 (точка *3*). Точка *3* неустойчива.

Задаваясь разными значениями x_s и проводя аналогичные расчеты, строим кривую $U_{\mu} = \varphi(x_s)$, показанную на рис. 28-15,6. Неустойчивая ветвь показана пунктиром. На участке верхней ветви с одним решением эквивалентное сопротивление z_s имеет индуктивный характер.

Для сравнения на рис. 28-15,6 показаны также результаты расчета при неучете активных сопротивлений схемы и в отсутствие шунта намагничивания.



вой в схеме с длинной линией. a-ысходная схема; 6-резонансная кривая $U_{\mu}=f(x_s); 1$ при учете всех условий задачи: 2-при неучете активного сопротивления схемы; 3- при линейном шунте намагничивания, вычисленном по начальному участку $U_{\mu} = f(I_{\mu}).$

В ілинейной цепи резонансные условия независимы от напряжения источника. В нелинейной цепи феррорезонансные скачки могут быть получены и изменением напряжения источника, поскольку x_{μ} зависимо от U_{μ} и, следовательно, от E. Зависимость U_{μ} от E_{a} в схеме на рис. 28-13, а показана на рис. 28-16. С ростом E_{a} в точке а возникает феррорезонансный скачок, в результате которого напряжение U_{μ} резко возрастает. В точке b возникает второй феррорезонансный скачок, приводящий к срыву с верхней ветви характеристики и резкому падению U_{μ} .

Характерной особенностью феррорезонанса является так называемое затягивание. Сущность этого явления можно проиллюстрировать на



Рис. 28-16. Зависимось напряжения U_{μ} от напряжения E_{ν} в схеме на рис. 28-13,*a*.

характеристике, приведенной на рис. 28-16. В то время как для возникновения феррорезонансного скачка при ' плавном подъеме напряжения источника необходимо напряжение E_{э1}, для срыва феррорезонансных колебаний, соответствующих верхнему участку кривой, необходимо напряжение Е_{э2} < < Е_{э1}. В практических условиях это означает, что феррорезонансные колебания большой амплитуды могут сохраниться в сети, если даже устранены условия, породившие их возникновение.

Другая особенность феррорезонанса состоит в том, что все устойчивые режимы в цепи могут возникнуть в результате переходного про-

цесса, последовавшего после коммутации в цепи. Поэтому коммутации в резонансной цепи могут приводить к опасным перенапряжениям.

28-7. СОПУТСТВУЮЩИЕ НЕЧЕТНЫЕ ГАРМОНИКИ

При повышении напряжения основной гармоники на шунте намагничивания трансформатора сверх 1,2 U_{ϕ} в цепи возникают высшие нечетные гармоники частоты n=3, 5, 7... В трехфазных цепях трансформа-



Рис. 28-17. Составление схемы замещения магнитного шунта как генератора 5-й гармоники.

а-зависимость $U_{\mu5} = f(I_{\mu5})$ в относительных единицах; $\delta -$ схема замещения,





торы, как правило, имеют обмотку, соединенную треугольником, которая служит низкоомным шунтом для третьих гармоник тока. Поэтому в трехфазных цепях следует в основном считаться с нечетными гармониками частоты n=5,7...

Расчет 5-й гармоники (предложенный Л. ТФ. Дмоховской) состоит в следующем. Если на основную гармонику напряжения $u_{\mu l} = U_{\mu l} \sin \tau$ наложить 5-ю гармонику $u_{\mu 5} = U_{\mu 5} \sin 5\tau$ и на основании характеристики намагничивания $t = f(\Psi)$ построить кривую тока, то в ней можно выделить 1-ю и 5-ю гармоники $i_{\mu l} = I_{\mu 1} \sin \tau$ и $i_{\mu 5} = I_{\mu 5} \sin 5\tau$. Наложение 5-й гармоники при условни $U_{\mu 5} < 0.5 < U_{\mu 1}$ оказывает малое влияние на связь первых гармоник напряжения и тока. Зависимость амплитуд $U_{\mu 5} = f(I_{\mu 5})$ при заданном $U_{\mu 1}$ показана на рис. 28-17, а. Оказывается, что такие кривые для



Рис. 28-19. Осциллограммы напряжения при наличии 5-й гармоники. a - для индуктивного сопротивления z_{35} : $\delta - для$ емкостного сопротивления z_{35} .

разных $U_{\mu 1}$ представляют прямые линии. На основании этого графика можно оставить схему замещения для 5-й гармоники (а также для гармоник =7, 11...), показанную на рис. 28-17,6. Источник напряжения $E_{\mu 5}$ включается через внутреннее реактивное сопротивление $x_{\mu 5}$ на внешнее эквивалентное сопротивление z_{25} , вычисленное на частоте n = 5. Напряжение на cz_{25} и есть напряжение 5-й гармоники на шунте намагничивания. Кривые зависимости $E_{\mu 5} = f(U_{\mu 1})$ и $x_{\mu 5} = f(U_{\mu 1})$ приведены на рис. 28-18. Значение $U_{\mu 1}$ находится по методике, изложенной в § 28-6. Наложение 1-й и 5-й гармоник показано на рис. 28-19. Фаза 5-й гармоники по отношению к фазе 1-й может быть отрицательной и положительной. Так как $E_{\mu 5}$ имеет отрицательный знак, а $x_{\mu 5}$ — индуктивное сопротивление, то при индуктивном $z_{25} = jx_{25}$ фаза отрицательна (рис. 28-19), а при емкостном $z_{25} =$ $= -jx_{C95}$ фаза положительна (рис. 28-19,6). Отметим, что в последнем случае возникают условия для феррорезонанса на 5-й гармонике (см. § 28-9).

случае возникают условия для феррорезонанса на 5-й гармонике (см. § 28-9). При высоких насыщениях ($U_{\mu l} > 1,4$) $|E_{\mu 5}|$ снижается; снижение $|E_{\mu 5}|$ сопровождается повышением 7-й гармоники, для которой, кстати говоря, применима та же методика расчета. Рост высших гармоник показывает, что расчет перенапряжения только по 1-й и 5-й гармоникам уже недействителен.

Пример 28-3. Для схемы на рис. 28-12 определить напряжение 5-й гармоники в конце линии. В примере 28-2 было определено $U_{\mu 1} = 1,3$. По кривым на рис. 28-18 находим значения $E_{\mu 5} = 0,42$ и $x_{\mu 5} = 7,5$. Эквивалентное сопротивление линии на частоте n = 5 равно:

$$z_{\texttt{PS}} = j \frac{5x_s + z \, \text{tg } 5\lambda}{1 - \frac{5x_s}{z} \, \text{tg } 5\lambda} - \frac{5 \cdot 0.4 + 1 \cdot \text{tg } (5 \cdot 0.628)}{1 - \frac{5 \cdot 0.4}{1} \, \text{tg } (5 \cdot 0.628)} = j2.$$

Как видно из полученного (значения, x_{эв} имеет индуктивный характер. Напряжение 5-й гармоники равно:

$$U_{\mu5} = E_{\mu5} \frac{x_{\mu5}}{x_{\mu5} + x_{\mu5}} = -0.42 \cdot \frac{2}{2+7.5} = 0.09.$$

28-8. РЕЗОНАНС НА ВЫСШИХ И НИЗШИХ ГАРМОНИКАХ

В § 28-5 были указаны общие закономерности возникновения резонанса на *п*-й гармонике (*n*≠1). Изучим теперь детали этого явления. Пусть задана цепь на рис. 28-20.*a*, в которой, как полагаем, существуют 1-я (частота источника) и *n*-я гармоники тока и напряжения. Очевидно, что должен существовать баланс напряжений и токов раздельно на 1-й и *n*-й гармониках. На рис. 28-20,6 приведены эквивалентные



Рис. 28-20. Схемы, иллюстрирующие возникновение резонанса на *п*-й гармонике. *а* — исходная схема; б — схемы на 1-й и *п*-й гармониках; *в* — в. а. х. схем 1-й и *п*-й гармоник.

схемы на этих гармониках. В схеме 1-й гармоники предполагаем отсутствие резонансных условий; поэтому линейная часть цепи замещена индуктивным сопротивлением x_{31} . В схеме *n*-й гармоники имеются резонансные условия; поэтому линейная часть цепи замещена емкостным сопротивлением x_{C3n} на частоте *n*. В схеме *n*-й гармоники отсутствует источник напряжения. Поэтому в этой схеме каждая из сумм реактивных и активных сопротивлений должна быть равна нулю. Это требование означает, что в этой схеме нелинейная индуктивность представляет индуктивное сопротивление $x_{\mu n}$ на *n*-й частоте и отрицательное активное сопротивление — $r_{\mu n}$, причем должно быть

$$-x_{C \ni n} + x_{\mu n} = 0 \text{ is } r_{B,n} - r_{\mu n} = 0. \tag{28-13}$$

Отрицательное сопротивление является источником энергии. Это видно из того, что угол сдвига между векторами тока $l_{\mu n}$ и напряжения $\dot{U}_{\mu n} = l_{\mu n} (-r_{\mu n} + j x_{\mu n})$ превышает $\pi/2$.

Энергия, поступающая в цепь на частоте n=5, может поступать только из источника напряжения, т. е. из схемы 1-й гармоники. Преобразование энергии между гармониками происходит в нелинейной индуктивности, которая является смесителем частот. Следовательно, в схеме 1-й гармоники нелинейная индуктивность должна

замещаться индуктивным сопротивлением $x_{\mu 1}$ и положительным активным сопротивлением $r_{\mu 1}$, в котором потребляемая энергия на 1-й гармонике переходит в схему *n*-й гармоники и затрачивается на джоулево тепло в сопротивлении r_{0n} . Этот переход показан на рис. 28-20,6 стрелкой. Как и — $r_{\mu n}$, сопротивление $+ r_{\mu 1}$ является фиктивным, в том смысле, что в нем не происходит выделения тепла. Угол сдвига между векторами тока $I_{\mu 1}$ и напряжения $U_1 = I_{\mu 1} (+ r_{\mu 1} + j x_{\mu 1})$ меньше $\pi/2$. Из изложенного следует баланс энергий:

$$U_{\mu 1} I_{\mu 1} \cos \varphi_{\mu 1} - U_{\mu n} I_{\mu n} \cos \varphi_{\mu n} = 0. \qquad (28-14)$$

Построим в. а. х. реактивных элементов для схем 1-й и *n*-й гармоник. Эти характеристики показаны на рис. 28-20, в. Первому уравнению (28-13) соответствует пересечение прямой линии $U_{\mu n} = x_{C \ni n} I_{\mu n}$ с в. а. х. нелинейной индуктивности на частоте *n*. По вычисленным $I_{\mu n}$ и $U_{\mu n}$ можно определить и мощность $P_n = I_{\mu n}^2 r_{\Theta n} = U_{\mu n} I_{\mu n} \times$ $\times \cos \varphi_{\mu n}$. С другой стороны, существует максимальное значение мощности $P_{\text{макс}}$, которое может быть передано от 1-й к *n*-й гармонике. Это значение тем больше, чем более нелинейна характеристика $i = f(\Psi)$, чем далее расположена рабочая точка (на основной частоте) за коленом кривой намагничивания и чем ближе частота *n* к основной частоте источника. Резонанс на *n*-й гармонике возможен, если $P_n < P_{\text{макс}}$.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для существования резонанса по *n*-й гармонике необходимо, чтобы соблюдалось неравенство $x_{C3n} < x_{\mu n0}$, где $x_{\mu n0}$ — реактивное сопротивление нелинейного шунта на начальном (линейном) участке его характеристики намагничивания. Это правило можно сформулировать так: необходимо, чтобы одна из собственных частот ω_0 линейной части цели на рис. 28-20,*a*, включая начальное значение неликейной индуктивности, была меньше *n*.

2. Чем ближе $x_{C \ni n}$ к $x_{\mu n0}$ или чем ближе ω_{0} к n, тем меньше значение $I_{\mu n}$ и тем меньше мощность P_{n} , необходимая для поддержания n-й гармоники и, следовательно, тем легче условия для возникновения резонанса на n-й гармонике.

3. Чем более линейна в. а. х. на частоте *n*, тем при прочих равных условиях больше амплитуда резонансной *n*-й гармоники (рис. 28-20,*a*), однако тем меньшее сопротивление необходимо для исключения резонанса на *n*-й гармонике и, наоборот, при более нелинейной характеристике меньше амплитуда *n*-й гармоники, но более благоприятны условия ее существования.

4. Чем дальше отстойт резонансная частота n от частоты источника, тем меньше передаваемая энергия $P_{\text{мажс}}$ и тем меньшее сопротивление r_{3n} достаточно для исключения резонанса на n-й гармонике.

5. Резонанс на *n*-й гармонике может возникать при достаточно высоком напряжении источника, которому соответствует достаточно высокая передаваемая мощность *Р*макс.

Рассмотрим теперь формы проявления резонанса на разных гармониках.

Резонанс на высших гармониках (ультрагармониках). На высших гармониках резонанс может возникать в результате переходного процесса при коммутации в цепи или в результате плавного изменения какого-либо параметра цепи. В первом случае резонанс проявляется в установлении в цепи после окончания переходного процесса незатухающей *п*-й гармоники высокой (резонансной) амплитуды. Во втором случае резонанс проявляется в феррорезонансном скачке амплитуды *п*-й гармоники в



Рис. 28-21. Стилизованные осциллограммы напряжений при резонансах.

а — на 2-й; б — 3-й; в — 4-й; г — 5-й гармонике.

тот момент, когда в результате плавного изменения параметра в цепи возникают резонансные условия. В обоих случаях резонанс может быть сорван путем устранения резонансных условий, например снижения напряжения источника или включения в цепь активного сопротивления. Но как и при резонансе на основной гармонике, наблюдается явление затягивания, вследствие которого феррорезонасные колебания *n*-й гармоники сохраняются даже при значительном отклонении параметров от тех, при которых явление резонанса возникло.

Существует коренное отличие между резонансом на высших нечетных (n=3, 5...) и четных (n=2, 4...) гармониках. Нечетные гармоника являются сопутствующими,

[Гл. 28

т. е. они существуют в цепи и при отсутствии резонансных условий и резонанс проявляется в резком возрастании их амплитуды. Четные гармоники в нерезонансных условиях отсутствуют, и при резонансе они как бы «рождаются», что весьма эффектно проявляется на осциллографе. Стилизованные осциллограммы резонанса на гармониках n=2, 3, 4, 5 показаны на рис. 28-21. В электрических сетях обычно следует считаться с резонансом на 5-й и 2-й гармониках. Четная гармоника искажает кривую напряжения несимметрично, т. е. положительные и отрицательные полуволны различаются по форме [иначе говоря, $u(t) \neq -u\left(t + \frac{T}{2}\right)$, где T — период колебания].

Недавно было обнаружено (Т. М. Мамедовым), что возникновение 2-й гармоники часто сопровождается образованием в магнитопроводе трансформатора постоянного







Рис. 28-22. Осциллограммы субгармоник в колебательном контуре. *u* — приложенное напряжение: *l* — ток; *u*_µ — напряжение на индуктивности; *u*_C — напряжение на емкости: *a* — субгармоника 1/2; *б* — субгармоника 1/3; *в* — субгармоника 1/4; *г* — субгармоника 1/5; *д* — субгармоника 1/7; *е* — субгармоника 1/9.

потока, который смещает рабочую точку на кривой намагничивания и в свою очередь поддерживает существование 2-й (и вообще четной) гармоники.

Резонанс на низших гармониках (субгармониках). Субгармоники отсутствуют в нормальном режиме сети. Субгармонический резонанс, в результате которого в токах и напряжениях появляется субгармоника, возникает только как следствие переходного процесса при коммутации (причина этого будет установлена в § 28-10). Обычно следует считаться с резонансом на субгармонике n=1/3 (частота $f=16^2/3$ гц), реже на субгармониках n=1/2 и 1/3. Можно предполагать, что с возникновением четной субгармоники n=1/2 также связан постоянный поток в магнитопроводе. Осциллограммы токов и напряжений при наличии субгармоник показаны на рис. 28-22. Обращает на себя внимание, что в кривой напряжения u_c слабо выявлена основная гармоника.

себя внимание, что в кривой напряжения u_c слабо выявлена основная гармоника. Сложные виды резонансов. В сложных разветвленных цепях иногда возникают резонансные условия на двух (или нескольких) гармониках. Это происходит, когда две собственные частоты линейной части цепи ω_{01} и ω_{02} удовлетворяют условию $\frac{1}{2}(\omega_{01}+\omega_{02})=n$, где n целое число. Если одна из резонансных частот основная и

возникает феррорезонансный скачок на основной гармонике, то возможно возникнове-

ние субгармоник помимо коммутационного переходного процесса; внутреннюю «коммутацию» создает феррорезонансный скачок.

В трехфазных сетях с изолированной нейтралью часты случаи медленных модуляций амплитуды резонансных колебаний с частотой порядка нескольких или даже долей герца. Такие модуляции связаны с медленным обменом энергии между резонансными контурами в разных фазах.

28-9. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС И САМОВОЗБУЖДЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Параметрический резоланс — это резонанс, вызываемый в колебательной системе посредством периодического изменения какого-либо ее параметра внешними силами. В электрической цепи таким параметром может служить индуктивность, взаимная индуктивность или емкость. В электрических системах следует считаться только с переменными собственными или взаимными индуктивностями вращающихся машин.



Рис. 28-23. Колебательный контур с переменной индуктивностью.

а — схема; б — параметры переменной индуктивности.

Для параметрического возбуждения колебаний или параметрического резонанса в электрической цепи не нужен источник напряжения или тока. Периодические изменения параметра сопряжены с затратой механической энергии, которая переходит в энергию электромагнитных колебаний. Для пояснения этого процесса рассмотрим схему на рис. 28-23, а, на которой показана переменная индуктивность $x(\tau)$ * с вращаю-

щимся стальным ротором. Угловая скорость или частота вращения ротора ω_s=1. Как видно из рис. 28-23,6, индуктивность x максимальна при продольном положении ротора

и минимальна при поперечном положении ротора. Колебания индуктивности происходят с двойной частотой ($\omega = 2$). Формула для изменения x во времени записывается в виде

$$x(\tau) = x_0 (1 - 2q \cos 2\tau).$$
 (28-15)

Если коэффициент q мал, то частота собственных колебаний в цепи примерно равна $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{x_0 b}}$. Пусть ω_0 равна частоте вынуждающей силы ($\omega_0 = 1$).

Предположим далее, что в результате какого-либо случайного воздействия в цепи возникло колебание тока $i=l\cos(\tau+\varphi)$ с собственной частотой $\omega_0=1$ со сколь угодно малой амплитудой и произвольной фазой φ . Реальной причиной этого «первого» толчка может служить, например, э. д. с., возбуждаемая остаточным магнетизмом магнито-провода ротора.

* Знак ~ обозначает переменный параметр электрической цепи.

Мощность (активная), затрачиваемая на прохождение тока i в индуктивности $x \in \mathbf{x}$ (т), равна:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} u i \, d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \frac{d}{d\tau} \left[\sum_{\alpha} (\tau) \, i \, (\tau) \right] i \, (\tau) \, d\tau.$$
(28-16)

При x = const этот интеграл равен нулю. Подставляя значения $x(\tau) = x_0(1-2q\cos 2\tau)$ и $i(\tau)$, находим:

$$P = -\frac{1}{2} I x_{0} \sin 2\varphi.$$
 (28-17)

При 0< $\phi < \frac{\pi}{2}$ мощность *P* отрицательна. Это означает, что необходимо затратить механическую мощность на изменение индуктивности *x*, обтекаемой током *i*.

Переменная индуктивность конструкции, представленной на рис. 28-23, является прототипом синхронной машины. Теория самовозбуждения показывает, что закономерности развития колебаний в цепи с х могут быть перене-



Рис. 28-24. Зоны самовозбуждения для синхронной машины, замкнутой на сложную цепь с эквивалентным сопротивлением $z_3 = = r_9 - jx_{C_9}$. сены на колебательную цепь с синхронной машиной. Существенное значение имеет различие в продольной и поперечной осях ротора синхронной машины. Известно, что в продольной оси реактивные сопротивления машины могут принимать значения x_d и x'_d ; в поперечной оси реактивное сопротивление равно x_q (принимаются в расчет только синхронные и переходные реактивные сопротивления машины в осях x_{C_3} , r_3 имеют вид двух окружностей, опирающихся на отрезки x_dx_q и $x_qx'_d$ как диаметры (рис. 28-24). Уравнения этих окружностей имеют вид:

$$\{ (x_d - x_{C_3}) (x_q - x_{C_3}) + r_3^2 = 0; \\ (x_q - x_{C_3}) (x'_d - x_{C_3}) + r_3^2 = 0; \}$$

$$(28-18)$$

где x_с, и r_э — эквивалентные сопротивления внешней цепи на синхронной частоте (частота источника).

В области *I* возникает так называемое синхронное самовозбуждение, в области *II* — асинхронное самовозбуждение. Синхронное самовозбуждение отличается малой скоростью нарастания колебаний. При асинхронном самовозбуждении колебания нарастают с большой скоростью. С точки зрення классификации электромагнитных моментов в синхронных машинах самовозбуждение в области *I* связано с реактивным моментом явнополюсности, а самовозбуждение в области *III* — с цинамическим моментом явнополюсности. Для турбогенератора, у которого $x_d = x_q$, возможно только асинхронное самовозбуждение.

Синхронное самовозбуждение развивается на частоте ω, асинхронное самовозбуждение — на частоте, мало отличающейся от синхронной . До сих пор рассматривалось построение областей самовозбуждения, по которым

можно определить сам факт возникновения самовозбуждения в цепи. Нас интересуют в то же время амплитуды перенапряжений, возникающие при самовозбуждении. В этой связи возникает вопрос: что ограничивает рост колебаний при самовозбуждении? Когда рассматривался линейный резонанс в цепи с постоянными r, x, x_c, то отмечалось, что амплитуды колебаний ограничиваются активным сопротивлением r. В контуре с переменной индуктивностью x активное сопротивление уже не ограничивает нара-

стание колебаний. Действительно, если только самовозбуждение в цепи возникает, то это означает, что в каждый период колебаний энергия, вносимая в контур (посредством изменения индуктивности), превышает энергию, рассеиваемую в сопротивлении *г*, и, следовательно, колебания в цепи должны нарастать неограниченно.

В действительности колебания ограничиваются насыщением магнитопровода машины и еще в большей степени насыщением магнитопровода трансформатора. Максимальные напряжения определяются пересечением в. а. х. машины и внешней сети, включая трансформатор. Измерения, проведенные на аналоговых вычислительных машинах, показали, что напряжения ограничиваются насыщением магнитопроводов до $(1,7 \div 2,0) U_{\Phi}$.

¹ Здесь не рассматривается так называемая III область самовозбуждения при $x_{Co} < x'_{d}$.

28-10. АВТОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ СКАЧКОВ На основной и высших гармониках

В § 28-9 было указано, что феррорезонанс на основной и высших гармониках проявляется в форме скачков на резонансной гармонике. Физическая природа этих скачков связана с параметрическими явлениями.

Обозначим исходный режим нелинейной индуктивности с характеристикой $i=f(\Psi)$ индексом 0. В этом режиме поток и ток в нелинейной индуктивности связаны соотношением

$$i_{\bullet} = f(\Psi_{\bullet}). \tag{28-19}$$

Предположим, что ток і и поток Ψ получили некоторые малые приращения δі и бΨ, например в результате повышения напряжения источника. Тогда предыдущее равенство запишется в виде

$$i_{\bullet} + \delta i = f(\Psi_{\bullet} + \delta \Psi). \tag{28-20}$$

При малых δi и $\delta \Psi$, разлагая $f(\Psi_0 + \delta \Psi)$ в ряд Тейлора, равенство (28-20) можно записать в виде

$$i_{0} + \delta i \approx f(\Psi_{0}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \Psi}\right)_{0} \delta \Psi,$$
 (28-21)

где индекс 0 у коэффициента $\partial f/\partial \Psi$ означает, что берется значение производной функции $f(\Psi)$ в исходном режиме.

Вычитая (28-19) и (28-21), получаем:

$$\delta i = \left(\frac{\partial f}{\partial \Psi}\right)_{v} \delta \Psi. \tag{28-22}$$

Коэффициент ($\partial f/\partial \Psi$), носит название инверсной дифференциальной индуктивности г'. Пусть, например, $i = \gamma \Psi^5$ и $\Psi_0 = A \sin \tau$. Тогда

$$\Gamma' = \left(\frac{\partial i}{\partial \Psi}\right)_0 = 5\gamma \Psi_0^4 = 5\gamma A^4 (\sin \tau)^4 = \frac{5}{8} \gamma A^4 (3 - 4\cos 2\tau + \cos 4\tau).$$

Как видно из этого соотношения, инверсная индуктивность имеет постоянную составляющую и высшие четные гармоники частоты 2, 4... Согласно выволам § 28-9, изменение индуктивности (или инверсной индуктивности Г) с частотой 2 может вызвать в контуре с собственной частотой $\omega_n = 1$ параметрический резонанс на частоте n=1 (на основной гармонике), изменение Г' с частотой 4 — параметрический резонанс на частоте n=1 (на основной гармонике), изменение Г' с частотой 4 — параметрический резонанс на частоте n=1 (удет содержать гармоники n=2, 4, 6, 8 и возможны параметрические резонансы на частотах n=1, 2, 3, 4 и т. д. Возникновение в феррорезонансной цепи параметрического резонанса относительно приращений δ_i и δ_{ij} равносильно неустойчивости исходного режима; в цепи самопроизвольно (т. е. без изменения напряжения источника) развиваются колебания, скачкообразно приводящие к новому устойчивому режиму. Энергия, вносимая в цель колебанием инверсной индуктивности, соответствует внесению в цепь отрицательного активного сопротивления, показанного в схеме на рис. 28-20,6. Так как колебания инверсной индуктивности возникают не под действием внешних сил (как в случае схемы с вращающимся ротором), а в результате колебания скачков.

Колебания инверсной индуктивности могут также поддерживать переходный процесс в цепи, резко снижая коэффициент затухания свободных колебаний. Представим, что в цепи с нелинейной индуктивностью в результате коммутации возник переходный процесс, в котором одна из гармоник свободных колебаний имеет частоту, близкую к n=2, 4, 5... Эта гармоника создает колебание инверсной индуктивносты Γ с частотой 4, 8..., что в свою очередь вносит в схему n-й гармоника отрицательное активное сопротивление (см. 28-20.6). Если даже в цепи и не возникает устойчивый резонансный режим, n-я гармоника поддерживается в течение длительного времени (до минут), т. е. возникают квазиустановившиеся феррорезонансные колебания.

29-641

28-11. ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ

Как следует из теоретического рассмотрения вопроса, резонанс на высших гармониках возможен при достаточно глубоком насыщении нелинейной индуктивности, представленной в цепях электрических систем нелинейным шунтом трансформаторов. Глубокое насыщение возникает в холостых режимах в блочных схемах (трансформатор — линия трансформатор) или полублочных схемах (трансформатор — линия или линия — трансформатор).

В сетях 110 кв и ниже с высокими частотами собственных колебаний возможны резонансные перенапряжения на 5-й, реже на 7-й гармони-



Рис. 28-25. Кратности перенапряжений на открытом конце линии 220 кв при сбросе нагрузки. Мощность источника P=200 Mea, l — длина линии.

Напряжение источника: I — E = 1,0 отн. ед.; 2 — E = 1,2 отн. ед. Выключатель B1 отключен.

ках. В сетях 220-500 кв частоты свободных колебаний порядка 200 гц и ниже, и в сетях возможны резонансные перенапряжения на 2-й, реже на 4-й гармониках. Феррорезонанс на 1-й гармонике (рабочей частоте) возникает в несимметричных режимах электропередач, например в схемах приведенных в § 28-4. Кроме того, феррорезонансные явления на 1-й гармонике (скачки напряжения) могут возникать в симметричных режимах при самовозбуждении генераторов.

Феррорезонанс на низших гармониках (субгармониках) возникает при частотах собственных колебаний $\omega_0 \ll 1$. Такие частоты имеют место в электро-

передачах с продольной компенсацией. Условия возникновения субгармоник в этих электропередачах рассматриваются в § 28-15.

На рис. 28-25 приведены кривые повышения напряжения на полублочной линии 220 кв в зависимости от длины линий. При плавном подъеме напряжения источника E до 1,2 отн. ед. в результате сброса нагрузки (отключение выключателя у приемного конца линии) возникают феррорезонансные пики напряжения на линии. При длине линии около 150 км возникает пик 5-й гармоники, при длине 320 км возникает слабо выраженный (из-за шунта треугольника) пик 3-й гармоники, при длинах 480—540 км возникает резонанс на 2-й гармонике. Кривые сняты на физической модели и дают обычно преувеличенные $U_{пер}$.

Наиболее часто перенапряжения в блочных или полублочных схемах возникают при коммутациях — включении блока или отключении короткого замыкания на приемном конце. Типичные осциллограммы напряжений, полученные при включении блочной электропередачи, приведены на рис. 28-26. Феррорезонансные перенапряжения в блочных схемах с присоединенными трансформаторами протекают как квазиустановившиеся, т. е. очень медленно затухающие. Физическая природа такого явления была разъяснена в § 28-10.

Феррорезонансные квазиустановившиеся перенапряжения при коммутациях, как и вообще коммутационные перенапряжения, характеризуются коэффициентом установившегося напряжения (рабочей частоты) $k_{yc\tau}$ и ударным коэффициентом k_{yg} . Расчетная зависимость коэффициента $k_{yc\tau}$ от низшей собственной частоты колебаний ω_0 в типовой блоч-



Рис. 28-26. Схема опыта и осциллограммы напряжений на конце линии при ее включении. a — по блочной схеме; б — по полублочной схеме (без трансформатора на конце).

ной схемы, оказывается зависимым Д. Е. Артемьева и С. С. Шура

1 — с учетом нелинейного шунта намагинчивания трансформатора; 2 — без учета нелинейного шунта.

ной электропередаче выражается кривой на рис. 28-7. На том же рисунке дана зависимость $k_{yc\tau}$ от ω_0 без учета нелинейных шунтов трансформаторов. Как следует из сравнения кривых, насыщение нелинейных шунтов (в основном трансформатора на конце линии) приводит к существенному снижению k_{yct} .

Коэффициент k_{уд} при возникновении феррорезонансных колебаний, в отличие от линейот частоты ω₀. По данным

$$\bar{k}_{yg} = 1 + \exp(b_1 \omega_0 - b_2 \omega_0^2 - b_0),$$

где $b_1=9,4$, $b_2=2,47$, $b_0=10,4$. Дисперсия σ в значениях k_{yg} находится в пределах 0,12—0,08. Большие значения относятся к меньшим ω_0 .

28-12. МЕРЫ, ПРЕДОТВРАЩАЮЩИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ Явлений на длинных линиях

Резонансные перенапряжения на длинных линиях, хотя обычно и имеют амплитуды, не превышающие $2U_{\Phi}$, опасны для изоляции, в первую очередь для трансформаторов, вследствие своей длительности. Резонансные перенапряжения также опасны для коммутационных разрядников. Эти разрядники предназначены для ограничения кратковременных коммутационных перенапряжений и могут не погасить дугу сопровождающего тока при установившемся напряжении, превышающем $U_{\rm гаm}$ разрядников.

Среди мер, предотвращающих возникновение высоких резонансных перенапряжений, на первом месте следует поставить мероприятия схемного характера, которыми при проектировании дальних электропередач стремятся исключить возможность образования резонансных или близких к ним условий на линиях.

Устранить или по крайней мере снизить длительность резонансных перенапряжений до нескольких периодов могут системная автоматика 29* и релейная защита. Так как наиболее опасен режим сброса нагрузки при одностороннем отключении линии, то для длинных линий целесообразно использовать защиту с подачей сигнала на отключение выключателей на обоих концах линии.

Регуляторы сильного действия, установленные на станциях, позволяют поддерживать постоянство напряжения не только на выводах генераторов, но и на шинах высокого напряжения. Это мероприятие, рассматриваемое обычно под углом зрения поддержания устойчивости, имеет большое значение и для устранения опасных резонансных пере-



Рис. 28-28. Схема искрового включения реактора.

а — реактор подключается к линии СВН; б — реактор подключается к обмотке низшего напряжения автотрансформатора СВН. напряжений, в частности резко снижает вероятность возбуждения высших гармонических из-за насыщения магнитопроводов трансформаторов. В точках сети, удаленных от станций, ту же роль могут играть синхронные компенсаторы, снабженные регуляторами сильного действия.

Обычно резонансные условия на основной гармонике расстраиваются путем включения шунтирующих реакторов (см. § 28-2). Но в режимах передачи максимальной мощности реакторы на линии обычно отключены, и если в это время произойдет разрыв электропередачи, то возникающий резонанс не будет ограничен реакторами. Для устранения этого недостатка Ю. И. Лысковым была предложена схема искрового подключения реакторов (рис. 28-28). При повышении напряжения срабатывает искровой промежуток ИП и к линии подключается реактор с относительно малой индуктивностью, расстраивающей резонансные условия на линии. При срабатывании ИП подается импульс на включение шунтирующего выключателя В. После устранения резонансного режима в системе выключатель В отключается.

Для того чтобы реактор эффективно ограничивал резонансные перенапряжения и предотвращал разрушение коммутационных разрядников, необходимо, чтобы $U\Pi$ реактора имелнизкое разрядное напряжение порядка $1,4U_{\phi}$. Выключатель B при отключении не должен

создавать коммутационные перенапряжения выше этого уровня; в противном случае ИП вновь пробьется и возникнет режим повторных замыканий и размыканий. Для снижения разброса разрядных напряжений искровые промежутки реакторов должны выполняться стабилизированными по типу, показанному на рис. 21-18, или по типу искровых промежутков вентильных разрядников с магнитным дутьем.

Недостатком искрового подключения реакторов является возможность «неселективного» срабатывания ИП при возникновении коммутационных перенапряжений в системе. Возможно использование схемы в которой реактор подключается к линии выключателем от импульса, подаваемого на отключение линейного выключателя. Но для того чтобы реактор эффективно снижал резонансные перенапряжения, необходимо, чтобы время действия включателя было меньше собственного времени действия современного выключателя СВН, т. е. менее чем 0,05—0,06 сек. Такие включатели механического, плазменного или лазерного типа в настоящее время разрабатываются.

Включение на линии реакторов, в том числе искровое включение, расстраивает резонансные условия не только на основной, но и на выспих гармониках.

28-13. ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В сетях с изолированной нейтралью при несимметричных коммутациях могут образовываться резонансные контуры с реактивностью намагничивания трансформаторов. В таких контурах возникают ферро-





Рис. 28-29. Схемы замещения системы с изолированной нейтралью при обрыве одного провода. 4 — общая схема; б н в — однофазные схемы замещения.

резонансные перенапряжения. Рассмотрим типичные примеры возникновения таких перенапряжений.

а) В результате обрыва и заземления одной фазы линии образовалась схема, приведенная на рис. 28-29, а. На приемной подстанции

включен холостой трансформатор, входящий в схему своими реактивностями намагничивания.

В нелинейной цепи метод симметричных составляющих непосредственно неприменим (поскольку нелинейная индуктивность зависит от полного тока), поэтому приводим грехфазную схему к эквивалентной однофазной схеме замещения. Такая схема для данного случая приведена на рис. 28-29,6.

В схеме действует э. д. с., слагающаяся из э. д. с. фазы a и проекций векторов э. д. с. фаз b и c на ось a. Поэтому в схему входит источник напряжения $1,5U_{\Phi}$. Емкости фаз b н c, подключенные непосредственно к источнику, в схему не входят. Емкости C соединяются па-



Рис. 28-30. Зависимость напряжения на емкости оборванного провода в схеме на рис. 28-29 от отношения x_c/x_u ; $C_1=2C_{\Phi}$.

раллельно с реактивностями L_{μ} и последовательно с емкостью C'_{Φ} фазы а. В результате приходим к схеме на рис. 28-29, в.

Путем расчета, методика которого была приведена в § 28-7, можно найти амплитудные кривые напряжения Uycr на емкости C'_ф (на фазе a линии) в расчетной схеме. Такие кривые для случая $C = 2C_{\phi}$ и $C'_{\phi} = C_{\phi}$ показаны на рис. 28-30. По оси абсцисс нанесены отношения x_C/x_{μ} , по оси ординат — кратности напряжений $U_{\rm ycr}$. Сплошными линиями нанесены устойчивые ветви характеристики, пунктиром — неустойчивая ветвь. В области x_C/x_{μ} меньше критического значения существуют два решения; высокие амплитуды, соответствующие нижней ветви, могут быть достигнуты в результате переходного процесса в цепи, вызванного разрывом провода линии; фаза напряжения u_a на емкости C'_{ϕ} «опрокидывается», т. е. изменяется последовательность чередования фаз напря-





Рис. 28-31. Схема, в которой возможно возникновение неустойчивости нейтрали (a) и области существования различных типов колебаний нейтрали (б).

жения на приемном конце. Если к трансформатору приключена маломощная двигательная нагрузка, то «опрокидывание» фазы u_{α} ведет к изменению направления вращения двигателей.

б) В электрических системах часты случаи, когда генератор или трансформатор с изолированной нейтралью (хотя система может иметь и заземленную нейтраль) включается на ненагруженные шины, к которым приключен электромагнитный трансформатор напряжения (рис. 28-31). Трансформатор напряжения обычно имеет заземленную нейтраль, а его вторичная обмотка собрана в открытый треугольник.

В такой схеме, характеризуемой малыми емкостными токами, может возникать самопроизвольное смещение нейтрали. Процесс этот протекает следующим образом. Вследствие некоторой исходной несимметрии напряжение одной из фаз, например фазы *a*, может оказаться достаточным для некоторого насыщения магнитопровода трансформатора напряжения и, как следствие, для снижения реактивного сопротивления ТН на этой фазе. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению полной проводимости фазы (предполагаем, что $x_C < x_{\mu}$), смещению потенциала нейтрали силового трансформатора, повышению напряжения фазы *a*, более глубокому насыщению магнитопровода трансформатора напряжением этой фазы и т. д. Смещение нейтрали может зайти очень далеко, вплоть до выхода потенциала нейтрали за пределы треугольника напряжений и вызвать феррорезонансные скачки (опрокидывания фаз).

Другая возможность состоит в том, что в результате коммутации (например, включения выключателя) в схеме могут возникать перенапряжения, связанные с устойчивыми колебаниями на изолированной нейтрали силового трансформатора (явление это характеризуют как неустойчивость нейтрали). Резонанс чаще всего возникает на 2-й гармонике, основной гармонике или субгармонике 1/2, реже 1/4. Кратности перенапряжений на ошиновке доходят до $3U_{\Phi}$. Резонанс на 3-й гармонике возможен только при отсутствии компенсационных обмоток в трансформаторе напряжения и силовом.

Физически происхождение указанного явления объясняется следующим образом. При включении схемы токи в фазах в переходном периоде неодинаковы. Вследствие этого индуктивные нелинейные сопротивления фаз трансформатора напряжения также неодинаковы. Возможно такое соотношение $x_{C\Phi}$ и x_{μ} на разных фазах, что в одной фазе эквивалентное сопротивление параллельного соединения $x_{C\Phi}$ и x_{μ} имеет емкостный характер, а в двух других фазах — индуктивный или наоборот. В этой схеме возможны феррорезонансные колебания разных типов, но преимущественно основной и 2-й гармоник и субгармоннки частоты 1/2 или 1/4.

Для устранения феррорезонансных перенапряжений рассматриваемого типа достаточно повысить потери, в цепи, например путем включения в разрыв обмотки, соединенной в открытый треугольник, активного сопротивления $r \approx 0.5 x_{\mu}$.

28-14. РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ С ДУГОГАСЯЩИМИ КАТУШКАМИ

3

Дугогасящая катушка, настроенная в резонанс (на рабочей частоте) с емкостью сети, служит для гашения дуги замыкания на землю (см. гл. 11). В то же время резонансная настройка дугогасящей катушки может служить источником перенапряжений при появлении в сети несимметрии, ведущей к повышениям напряжения в нейтрали. Рассмотрим возможности появления таких перенапряжений.

а) Резонансные повышения напряжения вследствие несимметрии емкостей фаз системы. При несимметрии емкостей фаз системы на землю возникает так называемое напряжение несимметрии, определямое формулой

$$\dot{U}_{o} = \frac{1}{3} \left(\dot{U}_{a} \frac{C_{a}}{C} + \dot{U}_{b} \frac{C_{b}}{C} + \dot{U}_{c} \frac{C_{e}}{C} \right), \qquad (28-23)$$

где *C* обозначена средняя емкость трех фаз сети, $C = \frac{C_a + C_b + C_c}{3}$; C_a, C_b , C_c — емкости фаз на землю. При отсутствии дугогасящей катушки напря-

 C_c — емкости фаз на землю. При отсутствии дугогасящей катушки вапряжение на нейтрали равно U_0 . Подключение дугогасящей катушки в соответствии с расчетной однофазной схемой (рис. 28-32) вызывает возрастание потенциала нейтрали до величины

$$U_{\rm H} = \frac{U_{\rm o}}{\sqrt[4]{v^2 + d^2}},\tag{28-24}$$

где v = 1 - K обозначает расстройку точной компенсации (см. § 11-5): $d = \frac{g_{\kappa}}{3\omega C_{\Phi}} -$ коэффициент потерь. При идеальной настройке (v=0) $U_{\rm H}=U_0/d$. Полагая, например, d=0,05, получаем $U_{\rm H}=20U_0$. Этот результат показывает, что для того чтобы удержать $U_{\rm H}$ в приемлемых границах, необходимо снижать напряжение несимметрии U_0 . Это достигается симметрированием фаз. При $C_a=C_b=C_c=C_{\rm p}$ напряжение $U_0=0$. На практике удается снижать U_0 до 0,5—0,75%. При этом напряжение $U_{\rm H}$ достигает (0,1÷0,15) $U_{\rm p}$,



Рис. 28-32. Расчетная схема для определения потенциала нейтрали в системе с дугогасящей катушкой.

что считается допустимым.

Резкое увеличение U_0 возможно в аварийных случаях, например при обрывах одной из фаз системы. Предположим, что в симметричной сети с емкостями прямой и нулевой последовательностей C_1 и C_0 на одной фазе произошло отключение участка длиною (1-m)l, где l—



Рис. 28-33. Кривые кратности напряжения на нейтрали U_R в зависимости от коэффициента 1—*m* для случаев разной исходной настройки катушки.

1 — K-1,0 (точная компенсация); 2 — K-1,1 (10%-ная перекомпенсация); 3 — K-0,9 (10%-ная недокомпенсация); <u>C₁</u> = 2.

общая длина сети. Составляя эквивалентную схему по методике, изложенной в § 25-3, находим напряжение нейтрали (без катушки) равным

$$U_{0} = U_{\Phi} \frac{1 - m}{2 + m \frac{C_{0}}{C_{1}}}.$$
 (28-25)

В то же время с изменением суммарной емкости фаз изменяется и настройка катушки. Если до отключения настройка была равна $K = \frac{1}{\omega_s^2 L_s 3 C_{\Phi}}$, то после отключения она равна

$$K' = \frac{\omega_0^2}{\omega_s^2} = \frac{1}{\omega_s^{2L_{\rm tr}} C_{\phi} (2+m)} = K \frac{3}{2+m}.$$
 (28-26)

Расстройка катушки будет равна:

$$v' = 1 - K' = 1 - K \frac{'3}{2 + m}.$$
 (28-27)

Смещение нейтрали в резонансном контуре с дугогасящей катушкой определяется по формуле (28-24)

$$U_{\rm H} = \frac{U_{\bullet}}{\sqrt{v'^2 + d^2}} = U_{\Phi} \frac{1 - m}{\left(2 + m\frac{C_{\bullet}}{C_{\rm 1}}\right)} \sqrt{\left(1 - \frac{3}{2 + m}K\right)^2 + d^2} .$$
(28-28)

На рис. 28-33 приведены кривые $U_{\rm H}/U_{\Phi}$ в зависимости от 1 — m для случаев различной исходной настройки катушки. Как видно из хода кривых, в случае точной настройки по мере роста 1 — m, т. е. возрастания отключившейся емкости, растет напряжение в нейтрали $U_{\rm H}$. При полном отключении емкости одной фазы (1 — m=1) напряжение $U_{\rm H}\approx$ $\approx U_{\Phi}$. В случае исходной перекомпенсации отключение части емкости одной фазы ведет, как это следует из формулы (28-27), к повышению расстройки υ' и как следствие к снижению напряжений $U_{\rm H}$. Следовательно, перекомпенсация способствует снижению напряжения смещения нейтрали в аварийных режимах. Однако расстройка катушки должна быть ограничена величиной $\upsilon \approx -0.05$, исходя из условия надежного гашения заземляющей дуги.

В случае исходной недокомпенсации отключение части емкости одной фазы, а именно части 1 - m = 3(1 - K), приводит к расстройке $v' = 1 - \frac{3}{2+m}K = 0$, т. е. к полному резонансу, при котором напряжение смещения нейтрали резко возрастает. В данном числовом примере



Рис. 28-34. Схема сети, в которой возникают резонансные перенапряжения в системе *II* с дугогасящей катушкой при однофазном коротком замыкании в системе *I* с эффективно заземленной нейтралью.

(рис. 28-33, кривая 3) это напряжение возрастает до $U_{\rm H}=2,7U_{\rm \phi}$ и перенапряжения на фазах достигают $U_{\rm ycr}=3,7U_{\rm \phi}$. Перенапряжения ограничиваются насыщением катушки, однако в. а. х. катушки имеет слабо нелинейный характер и потому это ограничение проявляется существенно лишь при $U_{\rm ycr}>(1,5\div2)U_{\rm \phi}$. Вследствие возможных резких смещений нейтрали настройка катушки с недокомпенсацией, даже относительно малой, обычно не допускается в системах. Исключением является компенсация емкостного тока в блоках генератор — трансформатор, Где возможность отключения части емкости фаз практически исключена.

6) Резонансные перенапряжения в схеме с дугогасящей катушкой при однофазном коротком замыкании в системе с эффективно заземленной нейтралью. Дугогасящие катушки обычно устанавливаются на узловых подстанциях, где сосредоточены распределительные устройства разных номинальных напряжений, в том числе систем с эффективно заземленной нейтралью (рис. 28-34). Если в системе I на данной подстанции произошло однофазное короткое замыкание, то на заземлении подстанции R_3 возникает напряжение $U_3 = I_{K,3}R_3$. Это напряжение действует в резонансном контуре дугогасящая катушка — емкость сети системы II. Сохраняется расчетная схема, показанная на рис. 28-32, где теперь вместо U_0 следует подставить U_3 .

Пример 28-4. На подстанции 110/35 кв на стороне 110 кв произошло однофазное короткое замыкание. Ток к. з. $I_{\kappa,s}=10 \ \kappa a_{\rm действ}$, сопротивление заземления подстанции $R_s=0.5$ ом. Приняв для сети 35 кв v=0.05 и d=0.05, оценить напряжение на нейтрали и фазе сети 35 кв при к. з.

Напряжение на заземлении подстанции $U_3 = I_{K,3}R_3 = 10 \cdot 0.5 \pm 5$ кв, что для системы 35 кв эквивалентно $\sim 0.22U_{\Phi}$. Используя формулу (28-24), находим:

$$U_{\rm g} = \frac{U_{\rm o}}{\sqrt{v^2 + d^2}} = \frac{0.22}{\sqrt{0.05^2 + 0.05^2}} = 3.1.$$

Напряжение на фазе равно 4,1 U_{Φ} . Практически кратности перенапряжений будут несколько ограничены насыщением дугогасящей катушки.

Кратковременность существования однофазных к. з., отключаемых выключателем в сети с эффективно заземленной нейтралью, может явиться фактором, ограничивающим амплитуду рассматриваемых перенапряжений. В переходном режиме включения напряжения U_3 на схему, приведенную на рис. 28-32, нарастание амплитуды колебаний происходит относительно медленно. Время нарастания амплитуды до максимального значения — порядка $\Delta t = 1/vf$, где v — расстройка катушек; f — рабочая частота, равная 50 гц.

Принимая v = 0.05, получаем $\Delta t = 0.4$ сек. Время отключения короткого замыкания Δt обычно меньше этого значения. Снижением Δt до 0,15—0,2 сек можно добиться существенного снижения амплитуд резонансных перенапряжений данного вида.

28-15. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ И ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ С ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Устройства продольной компенсации (УПК) применяются:

a) на линиях распределительных сетей — для повышения напряжения, устранения больших колебаний напряжений у потребителя, для распределения потоков мощности между линиями;

б) на магистральных линиях высокого напряжения — для повышения пропускной способности линий и повышения динамической устойчивости дальних электропередач.

Номинальное напряжение УПК определяется максимальным рабочим током в линии и принятым емкостным сопротивлением батарей x_c

$$U_{CH} = k_{3au} I_{I \cdot a5, \text{ make}} x_C, \qquad (28-29)$$

где k_{3an} — коэффициент запаса. Перенапряжения на батарее продольной компенсации (БПК) выражаются в кратности по отношению к U_{CH} .

Рассмотрим отключение трехфазного короткого замыкания (с землей) за УПК (рис. 28-35). В процессе короткого замыкания на УПК повышается напряжение. В установившемся режиме (рассматриваем однофазную схему замещения)

$$U_{C y c \tau} = I_{R.3} x_{C} = U_{\Phi} \frac{x_{C}}{x - x_{C}} . \qquad (28-30)$$

В значение x входят реактивные сопротивления линии до места короткого замыкания и реактивное сопротивление системы ($x = x'_n + x_s$). Обозначая отношение $x'_n/x_s = m$ и коэффициент компенсации $x_c/x_n = n$ ($x_n - p$ еактивные сопротивление всей линии), получаем формулу

$$U_{Cycr} = U_{\Phi} \frac{1}{\frac{x_s}{x_c} + \frac{m}{n} - 1}.$$
 (28-31)

Так как короткое замыкание может произойти в любой точке линии, то при произвольном расположении УПК на линии может возник-

нуть режим полного резонанса, при котором U_{суст} ограничено только активными сопротивлениями цепи. Обычно стремятся установить УПК в таких точках линии, чтобы избежать резонансного режима.

Формула (28-31) относится к установившемуся режиму короткого замыкания. В переходном режиме на напряжение U_{Cyct} накладываются свободные колебания с частотой $\omega_0 = \sqrt{\frac{x_c}{x_\pi}}$. В результате напряжение U_{CMAKC} может значительно превзойти U_{Cyct} . Протекание переходного режима в значительной степени зависит от фазы напряжений в момент

короткого замыкания. Наибольшие перенапряжения возникают, когда фазное напряжение линии проходит через нуль. В этом случае, пренебрегая затуханием свободных колебаний, имеем:

$$U_{C \text{ Marc}} = U_{\Phi} \frac{\omega_{\bullet}}{1 - \omega_{\bullet}}.$$
 (28-32)

По мере приближения ω_0 к единице, т. е. к полному резонансу, неограниченно растет U_{CMakc} . Вблизи резонанса колебания имеют форму биений, огибающая которых колеблется с частотой $1-\omega_0$.

Как следует из изложенного, при коротком замыкании за УПК на конденсаторной батарее возможны высокие перенапряжения. Их ограничивают с помощью шунти-

рующих разрядников РПК. Обозначим пробивное напряжение (уставку) разрядника РПК через Up. Выбор уставки разрядников определяется в первую очередь исходя из условий надежной работы изоляции конденсаторов УПК. С другой стороны, уставка должна быть достаточно высокой для того, чтобы разрядник не шунтировал УПК в переходных режимах, требующих наличия продольной компенсации. Так, например, разрядник не должен работать во время переходного процесса, связанного с качанием роторов генераторов после короткого замыкания, когда напряжение U_C достигает $(2 \div 2,5) U_{CH}$ Уставка pa3быть должна рядника также выше перенапряже-



Рис. 28-35. Схема электропередачи с продольной компенсацией (короткое замыкание за УПК) и эпюра напряжений вдоль линии в начальный момент отключения короткого замыкания (U_R), в установившемся режиме (U_{yer}), в переходном режиме (U_{make}).

ния на УПК при его дешунтировании.

Для конденсаторов, применяемых в установках продольной компенсации, пробивное напряжение разрядников берется обычно в пределах $(3,5 \div 0,4) U_{CH}$.

Уставка разрядника U_p оказывает значительное влияние также на восстанавливающееся напряжение на выключателе. Предположим, что короткое замыкание произошло в такой точке линии, в которой переходный процесс приводит к перенапряжениям U_c , почти равным U_p . В расчетах можно принять $U_{CMAKC} = U_p$. Ток в УПК и выключателе проходит через нуль в моменты максимумов напряжения u_c . В один из этих моментов происходит отключение выключателя B2 и на УПК остается максимальное напряжение U_{c0} . Эпюра напряжения U_{c0} в момент, предшествующий отключению к. з., показана на рис. 28-35. После отключения к. з. напряжение на конце линии стремится к установившемуся значению U_{yct} . В переходном режиме возникают высокочастотные колебания, в процессе которых напряжение U_1 достигает значения $2U_{\phi} + U_{c0}$. Так как заряд на УПК остается связанным, то напряжение на УПК остается неизменным и, следовательно, напряжение U_2 достигает значения ($2U_{\phi} + U_{c0}$) + $U_{c0} = 2U_{\phi} + 2U_{c0}$, т. е. на значение $2U_{c0}$ выше, чем в отсутствие продольной компенсации. Напряжение U_2 есть перенапряжение на изоляции фазы и восстанавливающееся напряжение на вы-

Таким образом, максимальное напряжение на контактах выключателя в значительной степени определяется остаточным напряжением U_{co} , которое равно уставке шунтирующего разрядника.

Разрядники РПК выполняются многоэлектродными, в фарфоровой рубашке, с воздушным или магнитным дутьем аналогично конструкции воздушного выключателя или промежутков вентильных разрядников. Дугогашению способствует малая, близкая к рабочей частоте скорость восстановления напряжения на разряднике. Возможно применение также простейших роговых промежутков (см. рис. 4-17,6), на которых дуга гаснет при растяжении и снижении восстанавливающегося напряжения после отключения тока короткого замыкания.

При разрывах электропередачи с УПК могут возникнуть резонансные контуры, содержащие большую емкость УПК и нелинейные индуктивности компенсирующих реакторов (показаны на рис. 28-35 пунктиром) или ветви намагничивания трансформатора.

Вследствие высокого значения x_p и малого x_c собственная частота в контуре ω_0 мала и в цепи могут возбудиться субгармоники. Обычно возбуждаются субгармоники n=1/3. С возбуждением субгармоник связаны перенапряжения на конденсаторной батарее и сверхтоки в реакторе. Субгармонический резонанс устраняется путем кратковременного шунтирования УПК выключателем или разрядником.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Рассчитайте в схеме на рис. 28-1 с параметрами $x_0=0.8$; z=1; длина линии l=600 км напряжение в конце и начале линии.

2. В схеме с параметрами из примера 28-1 в середине линии установлен реактор мощностью $q_p = 4$. Рассчитайте напряжение в конце и начале линии.

3. В схеме на рис. 28-3 с параметрами $x_{s1}=0,8; x_{s0}=0,4; z_1=1; \lambda_1=0,628; z_0=2,2; \lambda_0=0.94$ рассчитайте напряжение U_2/E при однофазном коротком замыкании в конце линии.

Указание. Рассчитайте отношение x_0/x_1 из точки короткого замыкания относительно источника *E*. Напряжение в симметричном режиме определено в примере 28-1.

4. В схеме на рис. 28-7 произошло включение блока автотрансформатор — линия одной фазой. Составьте универсальную комплексную схему, выразите значения x_1 и x_N в этой схеме через сопротивления исходной схемы и найдите условие полного резонанса.

5. Объясните принцип действия и назначение искрового подключения реакторов. До каких значений необходимо ограничивать напряжения установившегося режима в дальних электропередачах?

6. В схеме на рис. 28-12 с параметрами x,=0,6; z=1; длина линии l=800 км рассчитайте напряжения основной гармоники в начале и конце линии:

а) при отсутствии реактора;

б) при установке в конце линии реактора мощностью q_p=4, имеющего типовую характеристику намагничивания.

 Рассчитайте для примера 28-1 напряжение 5-й гармоники в начале линии и постройте полную кривую напряжения.

ключателе В2.

 Для схемы на рис. 28-12 с параметрами x_s=0,8; z=:1 найдите длину линии λ, при которой возможен резонансный скачок на: а) 5-й гармонике; б) на 2-й гармонике.
 Объясните, какое влияние на резонанс на n-й гармонике оказывают степень нелинейности индуктивности и активные сопротивления в цепи.

10. Объясните физическую природу феррорезонансных скачков на 2-й, 4-й, 5-й гармониках. Почему субгармоники в простом колебательном контуре возникают только в результате какой-либо коммутации в цепи?

11. Начертите область самовозбуждения для синхронной машины с $x_d = 1,4;$ $x_q = 0,6.$

12. Объясните причины самопроизвольного смещения и неустойчивости нейтрали в схеме на рис. 28-31.

13. В сети с дугогасящей катушкой, настроенной с перекомпенсацией в 5%, произошло отключение 1/3 емкости одной из фаз. Рассчитайте напряжение на нейтрали сети. Примите d=0,05.

14. В электропередаче (схема на рис. 28-35) длиной $l=600 \ \kappa m$ в середине линии установлена батарея продольной компенсации (УПК), компенсирующая 40% индуктивности линии. Параметры схемы $x_s=0.4$; z=1. Реакторы отсутствуют. Номинальное напряжение УПК выбрано исходя из натурального тока линии. Рассчитать кратность перенапряжения на УПК при коротком замыкании за УПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Техника высоких напряжений, как это видно из учебного пособия, неотделима от общих задач электроэнергетики. С другой стороны, прогресс в области ТВН непосредственно влияет на решение узловых проблем электроэнергетики. Представляет интерес в заключение кратко рассмотреть те основные задачи, которые ставятся в настоящее время и в ближайшем будущем перед ТВН.

При изучении разряда в изоляции, развития атмосферных и внутренних перенапряжений был выявлен статистический характер указанных явлений. Поэтому выбор изоляции одной электропередачи и подстанций должен основываться на статистических закономерностях и использовании теории вероятности. Ряд частных примеров этому уже был дан в учебном пособии. По существу выбор всех нормативов предполагает вероятностный характер явлений. Однако до последнего времени этот выбор был основан скорее на инженерной интуиции, чем на точных расчетах. В последние годы разработаны (Н. Н. Тиходеевым, Г. Н. Александровым) основы статистического метода выбора изоляции, в первую очередь на линиях электропередачи. Этот метод требует знания законов распределения ряда факторов, с которыми связан разряд в изоляции. Это в первую очередь вероятностные характеристики грозовых и внутренних перенапряжений. Хотя уже накоплены обширные данные в этой области, продолжают быть актуальными исследования параметров токов молнии, особенно в новых районах строительства электропередач (Сибирь, Средняя Азия), а также грозозащитных характеристик линий — удельного числа п. у. м., вероятности прорыва молнии через тросовую защиту, эффективности заземлителей, в частности протяженных. Для определения вероятностных характеристик внутренних перенапряжений большую ценность представляют измерения в эксплуатации с помощью автоматических катодных осциллографов, начатые в энергосистемах под руководством кафедры, ТВН ЛПИ.

Для воздушной изоляции необходимо знание вероятностных характеристик погодных условий — ветра, давления, температуры, влажности, грозовых дней. Соответствующие исследования проводятся во многих энергосистемах по методике, разработанной ВНИИЭ. Задача состоит в том, чтобы эти исследования охватили все районы предполагаемого широкого строительства сетей.

Разработка и технология изготовления высоковольтного оборудования тесно связана с ТВН. Даже краткий перечень проблем в этой области потребовал бы многих страниц. Отметим только, что в настоящее время наиболее остро стоит задача совершенствования технологии, т. е. проблема качества выполнения изоляции на заводах и внедрения новых высококачественных изоляционных материалов. Это касается всех звеньев электроэнергетических систем — генераторов, трансформаторов, аппаратов и линий. Патентные публикации показывают также, что большие успехи могут быть достигнуты и на пути создания новых оригинальных конструкций высоковольтных устройств. Существенную роль в разработке изоляционных конструкций должны приобрести вычислительные машины и физические модели, на которых можно весьма точно рассчитывать электрические (и магнитные) поля и переходные процессы в обмотках.

Большое значение для всей изоляционной проблемы имеет совершенствование защитной аппаратуры — в первую очередь вентильных разрядников. Среди задач ТВН существенны также разработка и выпуск таких конструкций выключателей, в которых перенапряжения при отключении или включении элементов сети были бы резко ограничены. Опять-таки в этом вопросе решающая роль принадлежит технико-экономическим подсчетам, поскольку выключатели, удовлетворяющие указанному условию, имеют и повышенную стоимость.

Пересмотру подлежат методы испытаний высоковольтного оборудования. Принятое в настоящее время испытание одноминутным напряжением промышленной частоты не соответствует реальным воздействиям в эксплуатации и условиям развития разряда в изоляции. Более полно эти условия отражают испытания коммутационными импульсами и длительным приложением напряжения промышленной частоты с одновременным измерением частичных разрядов для определения напряжения возникновения ионизации. Наиболее дорогостоящее высоковольтное оборудование, в первую очередь трансформаторы, целесообразно снабдить устройствами для непрерывного контроля за частичными разрядами в эксплуатации.

Физической основой ТВН является физика разряда в газах и в изоляционных материалах. Исследования последнего десятилетия открыли много новых сторон газового разряда — резкое снижение разрядных граднентов в длинных промежутках, особенности разряда при коммутационных импульсах, тонкую структуру коронного разряда. Еще недостаточно исследовано поведение изоляции при высоких напряженностях постоянного тока, необходимых для построения экономичного оборудования электропередач ±750 кв и выше.

Исследования молнии проводятся уже 30—40 лет. Тем не менее остается невыясненным процесс перехода лидерного разряда в главный в месте поражения высоких объектов, например высоких опор. Детали этого процесса играют основную роль в развитии перенапряжений п. у. м., под действием которых возникает обратное перекрытие на опорах. Исследования в этом направлении требуют установки тонкой измерительной аппратуры на опорах.

В области изучения переходных процессов подлежат усовершенствованию физические модели и алгоритмы расчета на ЦВМ для максимального приближения к натурным условиям. Важнейшей задачей является моделирование (физическое и математическое) и изучение электромагнитных переходных процессов, возникающих в электропередачах постоянного тока, где сеточное управление непосредственно воздействует на ход этих процессов.

Центральной проблемой ТВН является решение задач, непосредственно связанных с внедрением сверхвысоких напряжений 750 кв и выше. В настоящее время уже ведутся работы по исследованию проблем ТВН в новом классе напряжений переменного тока 1 000-1 200 кв. Но и это напряжение переменного тока не является предельным и считается возможным построение ВЛ напряжением 1 700-1 800 кв.

Электропередачи постоянного тока могут выполняться на напряжения, предельные значения которых еще трудно предугадать. Вслед за проектируемыми передачами ±750 кв намечается внедрение электропередач ±1100 кв.

Кабельные линии постоянного тока в принципе допускают повышение рабочего напряжения до больших значений, чем воздушные. Перспективны коаксиальные линии в трубах с газовой изоляцией под давлением. В физике и физической химии изоляционных материалов еще далеко не сказано последнее слово в изыскании материалов высокой электрической прочности, и успехи в этих отраслях науки могут привести к крупным достижениям в кабельной технике.

Закончим перечисление проблем ТВН проблемой подготовки кадров. Для выполнения задач, которые выдвигаются развитием электроэнергетики, требуются инженеры с хорошей подготовкой в области точных наук специальности и эксперимента. Творческий подход к делу всегда был отличительной особенностью специалистов в области ТВН. Изучение ТВН должно выражаться не только в усвоении достигнутого в этой области техники, но и в понимании задач, которые еще предстоит решать, и путей решения этих задач.

ОБЩАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Техника высоких напряжений, под ред. Л. И. Сиротинского, ч. І и ІІ, Госэнергоиз-

дат, 1951, 1953. 2. Сиротинский Л. И., Техника вы-соких напряжений, ч. III; вып. 1. Госэнергоиздат, 1959.

3. Техника высоких напряжений, под ред.
 Д. В. Разевига, Госэнергоиздат, 1963.
 4. С те фа но в К. С., Техника высоких напряжений, изд-во «Энергия», 1967.

5. Проект «Руководящих указаний по за-

Проект «Руковолящих указании по за-щите от перенапряжений», «Электрические станции», 1964, № 4, 6, 7, 9, 11, 12; 1965, № 2, 8. 6. Федченко И. К., Техника высоких напряжений, Государственное изд-во техниче-ской литературы УССР. 1963.
 Рюденберг Р., Переходные процес-сы в электрознергетических системах, Изд-во ичосто лит. 1955.

сы в электроэнергетических системах, Изд-во иностр. лит., 1955. 8. Высоковольтное испытательное обору-дование и измерения, под ред. А. А. Во-робьева. Госэнергоиздат, 1960. 9. Долгинов А. И.. Перенапряжения в электрических системах, Госэнергоиздат,

1962.

10. Левинштейн М. Л., Операцион-ное исчисление и его приложения к задачам электротехники, кад-во «Энергия», 1964.

электротехники, вздею «элергая», тэм. 11. Электроизоляционные материалы, под ред. Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, ч. І н II, Госэнергоиздат, 1958, 1959. 12. Правила устройства электроустановок, издево «Энергия», 1966.

Литература к первому разделу

1. Миролюбов Н. Н., Костен-ко М. В., Левинштейн М. Л., Тихо-деев Н. Н., Методы расчета электростати-Костен-Л., Тихоческих полей, изд-во «Высшая школа», 1963.

2. Говорков В. А., Электрические и магнитные поля. Связьиздат, 1951.

3. Бухгольц Г., Расчет электрических и магнитных полей, Изд-во иностр. лит., 1961.

4. Мантров М. П., Электрический расчет высоковольтных вводов, изд. МЭИ, 1962. Литература ко второму разделу

1. Леб Л., Основные процессы электри-

 Л. ССНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИ-ческих разрядов в газах. Гостехиздат. (950.
 Стекольннков И. С., Природа длинной искры, Изд-во АН СССР, 1960.
 Разрядные напряжения длинных воз-душных промежутков, Изд-во АН СССР, ВИНИТИ, серия «Итоги науки и техники», осос 1964.

4. Буткевич Г. В., Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. изд-во «Высшая школа», 1967.

5. Залесский А. М., Полтев А. И. Электрическая прочность некоторых газов при повышенных давлениях, «Электричество», 1963, Nº 11.

1963. № 11. 6. Мерхалев С. Д., Соломо-ник Е. А., Механизм развития разряда по загрязненной поверхности изоляторов, «Элек-трические станции», 1964, № 12. 7. Руководящие указания по проектирова-ню и эксплуатация ВЛ и ОРУ 3-500 кв с за-грязненной атмосферой, «Электрические стан-ции», 1966, № 7, 8. 8. За десский А. М. Зибер К.,

цпн*, 1500, 1927, о. 8. Залесский А. М., Зибер К., Полтев А. И., Некоторые исследования разрядных напряжений в сжатых газах, «Элек-тричество», 1967, № 12.

Литература к третьему разделу

1. Воробьев Α. Α. Завадовская Е. К., Электрическая прочность твер-дых диэлектриков, Гостехиздат, 1956. 2. Уайтхед С., Пробой твердых ди-электриков, Госэнергоиздат. 1957.

3. Беркс Д., Шулман Д., Прогресс в области дизлектриков, т. І. Госэнергоиздат. 1962.

4. Балыгин И. Е., Электрическая прочность жидких диэлектриков. Госэнергоиздат. 1963.

5. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных изоляционных конструкциях, под ред. Г. С. Кучинского, Госэнергоиздат, 1963. 6. Каплан Д. А., Конторо-вич А. М., Кучннский Г. С., Грей-сух М. А., Мессерман Г. Т., Электриче-ские характеристики аппаратной бумажно-

ские характеристики аппаратной бумажно-масляной изоляции при коммутационных пе-ренапряжениях, «Электричество», 1967, № 2. 7. Борисоглебский П. В., Физиче-ские основы и методы профилактики промыш-ленной изоляции, Госэнергоиздат, 1949. 8. Хомяков М. В., Профилактические испытания высоковольтного оборудования, Госянергоиздат. 1957

Госэнергоиздат, 1957. 9. С в и П. М., Контроль высоковольтной изоляции методом частичных разрядов, Госэнергоиздат, 1962.

Литература к четвертому разделу

1. Мельников Н. А., Роко-тян С. С., Шеренцис А. 11., Просктирование электрической части воздушных линий электропередачи 330—500 кв, Гссэнергоиздат,

1963. 2. Дальние электропередачи 500 кв, Сб. статей под общей ред. А. М. Некрасова и С. С. Рокотяна, изд-во «Энергия», 1964. 3. Лысков Ю. И., Соколов Н. Н., Рокотян С. С., Дальние электропередачи

750 кв. «Электрические станция», 1964, № 5.
 4. Дальние электропередачи, под ред.
 С. С. Рокотяна, изд-во «Энергия», 1968.
 5. Попков В. И., Богданова Н. Б.,

5. Попков В. И., Богданова Н. Б., О методике оценки готовых потерь энергин на корону, «Электричество», 1957, № 2. 6. Левитов В. И., Попков В. И., Исследование короны на высоковольтных элек-тропередачах, Известня АН СССР, «Энергети-кан транспорт», 1964, № 3. 7. Емельянов Н. П., Потери мощно-сти при короне на линиях электропередачи с расщепленной фазой 330 кв и выше, «Элек-трические станция», 1967, № 9. 8. Бургсдорф В. В., Журав-лев Э. Н., Радиопомехи от линий электропер-

редач сверхвысокого напряжения и выбор се-чений проводов, Известия АН СССР, «Энерге-тика и транспорт», 1966, № 5. 9. Майкопар А. С., Дуговые замыка-ния на линиях электропередачи, изд-во «Энер-

гня», 1965.

10. Федченко И. К., ИльенкоО.С., Определение критических параметров откры-

определентрических параметров открыт топ электрических параметров открыт «Энергетика», 1964, № 5. 11. Лихачев Ф. А., Выбор, установка и эксплуатация дугогасящих аппаратов, Гос-энергоиздат, 1955.

12. Бронгулеева М. Н., Городец-кий С. С., Кабельные линии высокого напря-жения, Госэнергоиздат, 1963.

Литература к пятому разделу

1. ГОСТ 1516-60, Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения, Нормы и методы испытания электрической прочности изоляции, Стандартиз, 1960. 2. Бачурин Н. И., Литая изоляция вы-

2. Бачурин п. п., литая долация вы сокого напряжения, Госэнергонздаг, 1963. 3. Бачурин Н. И., Трансформаторы то-ка, Госэнергонздат, 1963. 4. Ренне В. Г., Багалей Ю. В., Фридберг И. Д., Расчет и конструирование конденсаторов, изд-во «Техника», Киев, 1966.

5. Сапожников А. В., Конструирова-ние трансформаторов, Госэнергоиздат, 1959.

6. Калиниченко И. С., Трансформа-торы на 330—500 кв. «Вестник электропромыш-ленности», 1962, № 3.

7. Алексенко Г. В., Ашрятов А. К., Фрид Е. С., Испытания высоковольтных и мощных трансформаторов я автотрансформа-торов, Госзнергоиздат, 1962.

Лоханин А. К., Расчет перенапряжений в катушечных обмотках трансформаторов, «Электричество», 1967, № 4.
 Сапожников А. В., Защита автотрансформаторов от перенапряжений, «Электрические станции», 1965, № 7.
 Геллер Б., Веверко А., Волновые процессы в электрических машинах, Гоезнероватат. 1961

энергоиздат, 1961.

11. Каганов З. Г., Волновые явления

Катанов Б. Г., Волновые явления
 в электрических машннах, Изд-во Снбирско-го отделения АН СССР, 1964.
 Козырев Н. А., Изоляция электри-ческих машин и методы ее испытания, Гос-энергоиздат, 1962.

Литература к шестому разделу

1. Разевиг Д. В., Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи. Сосэнергоиздат, 1959.

энергоиздат, 1959. 2. Ослон А. Б., Заземляющие уствой-ства на линиях электропередачи и подстан-циях высокого напряжения, Изд-во АН СССР, ВИНИТИ, серия «Итоги науки и техники», вып. «Электрические станции, сети и системы», 1964.

3. Рябкова Е. Я., Импульсные косле-дования заземлителей на моделях, «Электри-ческие станции», 1963, № 12. 4. Вайнер А. Л., Импульсные харак-теристики сложных заземлителей, «Электриче-

ство», 1966, № 3.

5. Бронфман А. И., Кронга-уз Э. Б., Модернизированные магнитно-вен-тильные разрядники на напряжение 110-500 кв. «Электротехника», 1963, № 10.

6. Безруков Ф. В., Галкин Ю. П., Юриков П. А., Трубчатые разрядники, изд-во «Энергия», 1964.

7. Половой И. Ф., Грозозащита под-станций и вращающихся машин, Изд-во АН СССР, ВИНИТИ, серия «Итоги науки и техники», вып. «Электрические станции, сети и системы», 1964.

Литература к седьмому разделу

1. Внутренние перенапряжения в электрических стях высокого напряжения переменно-го тока. Изд-во АН СССР, ВИНИТИ, серия «Итоги науки и техники», 1964.

2. Фотин В. П., Повышения напряжения в длинных линиях при несимметричных коротких замыканиях на землю, Госэнергоиздат, 1928

3. Артемьев Д. Е., Тиходе-ев Н. Н., Шур С. С., Статистические основы выбора изоляции линий электропередачи, изд-во «Энергия», 1964.

4. Артемьев Д. Е., Тиходе-ев Н. Н., Шур С. С., Координация изоля-ции линий электропередачи, изд-во «Энергия», 1966.

5. Артемьев Д. Е., Беляков Н. Н., Бургсдорф В. В., Шур С. С., Уровни внутренних перенапряжений в сетях 110— 220 кв. «Электрические станции», 1962, № 11.

6. Акодис М. М., Бронников В. И., Защита от перенапряжений дальних электро-передач, Известия вузов, «Энергетика», 1963, N 8.

7. Лысков Ю. И., Ограничение вну-тренних перенапряжений, «Электричество», 1962, № 5.

8. Веников В. А., Анисимова Н. Д., Долгинов А. И., Федоров Д. А., Са-мовозбуждение и самораскачивание в электрических системах, изд-во «Высшая школа». 1964.