



**ОБЩАЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Н. В. БАРАШ, В. М. БЛАДЫКО, М. З. ЗГИРОВСКИЙ,
В. М. ИЛЬИН, Д. И. МИНКОВСКИЙ, И. А. ФЕДОРОВА

6213

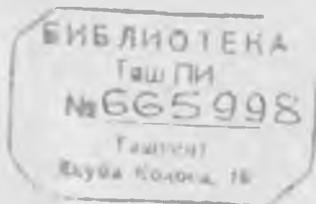
Д-28

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Под общей редакцией

канд. техн. наук, доц. И. А. Федоровой

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования БССР в качестве пособия для студентов заочных и вечерних отделений неэлектрнческих специальностей технических вузов



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫШЭЯШАЯ ШКОЛА»
МИНСК 1988

028 **Общая электротехника.** Под общей ред. И. А. Федоровой. Минск, «Вышэйш. школа», 1968.

448 с. с 348 илл.

Содержание книги соответствует программе Министерства высшего и среднего специального образования СССР по общей электротехнике.

Даны основные сведения по теории электрических цепей, электроизмерительным приборам, электрическим машинам, трансформаторам и электроприводу.

Теоретический материал разделен на логические части, после которых приведены задачи и вопросы для самопроверки.

Книга предназначена для студентов вузов неэлектрических специальностей дневных, вечерних и заочных отделений и будет полезной для инженеров неэлектриков, желающих восполнить свои знания по электротехнике.

3-3-8
37-67

6П2.1

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 7

Глава 1. Основные электротехнические характеристики материалов

§ 1.1. Электрические характеристики материалов 9
 § 1.2. Магнитные характеристики материалов 16

Глава 2. Электрические цепи постоянного тока и методы их расчета

§ 2.1. Основные определения и законы 22
 § 2.2. Определение эквивалентного сопротивления и преобразование электрических цепей 27
 § 2.3. Замена нескольких источников одним эквивалентным. Метод двух узлов 35
 § 2.4. Передача энергии от источников к приемникам. Сечение соединительных проводов. Предохранители 41
 § 2.5. Методы расчета сложных электрических цепей 42
 § 2.6. Расчет нелинейных электрических цепей 54

Глава 3. Магнитные цепи и электромагнетизм

§ 3.1. Магнитное поле электрического тока 58
 § 3.2. Основные характеристики магнитного поля 59
 § 3.3. Закон полного тока 61
 § 3.4. Закон магнитной цепи 63
 § 3.5. Расчет неразветвленных магнитных цепей 66
 § 3.6. Расчет разветвленных магнитных цепей 70
 § 3.7. Электромагнитная индукция 72
 § 3.8. Самоиндукция 75
 § 3.9. Индуктивность тороида 77
 § 3.10. Взаимоиндукция 79
 § 3.11. Энергия магнитного поля 80
 § 3.12. Электромагнитные силы 82
 § 3.13. Подъемная сила электромагнита 83

Глава 4. Электрические цепи однофазного переменного тока

§ 4.1. Понятие о переменном токе 88
 § 4.2. Основные характеристики синусоидально изменяющихся напряжений, токов и э. д. с. 91
 § 4.3. Законы Кирхгофа для цепей переменного тока. Применение векторов 96
 § 4.4. Электромагнитные процессы в цепях переменного тока 101
 § 4.5. Последовательное соединение активного, индуктивного

и емкостного сопротивлений. Треугольники напряжений и сопротивлений	108
§ 4.6. Параллельное соединение активной, индуктивной и емкостной проводимостей. Треугольники токов и проводимостей	113
§ 4.7. Преобразование последовательного соединения активного и реактивного сопротивлений в эквивалентное параллельное соединение	116
§ 4.8. Мгновенная мощность в цепи переменного тока	119
§ 4.9. Колебания энергии в цепи переменного тока	122
§ 4.10. Активная, реактивная и полная мощности	124
§ 4.11. Коэффициент мощности и пути его повышения	125
§ 4.12. Резонанс в электрических цепях	129
§ 4.13. Топографические диаграммы	137
§ 4.14. Символический метод расчета цепей переменного тока	139
§ 4.15. Индуктивно связанные цепи	143
Глава 5. Электрические цепи трехфазного тока	
§ 5.1. Получение э. д. с. и токов, сдвинутых по фазе	150
§ 5.2. Схема соединения звездой	153
§ 5.3. Схема соединения треугольником	160
§ 5.4. Мощность трехфазного тока	164
§ 5.5. Вращающееся магнитное поле	166
Глава 6. Электрические цепи с несинусоидальными э. д. с. и токами. Нелинейные электрические цепи переменного тока	
§ 6.1. Несинусоидальные переменные токи	169
§ 6.2. Активная мощность несинусоидального тока. Действующее значение несинусоидального тока	172
§ 6.3. Влияние электрической цепи на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении	173
§ 6.4. Нелинейные цепи переменного тока	179
§ 6.5. Катушка со стальным сердечником при синусоидальном напряжении сети	181
§ 6.6. Катушка со стальным сердечником при синусоидальном токе	183
§ 6.7. Магнитные усилители	184
§ 6.8. Последовательное соединение катушки со стальным сердечником и конденсатора	188
Глава 7. Переходные процессы в простейших электрических цепях	
§ 7.1. Возникновение переходных процессов и законы коммутации	191
§ 7.2. Общие принципы расчета переходных процессов	192
§ 7.3. Короткое замыкание цепи r, L	193
§ 7.4. Включение цепи r, L на постоянное напряжение	195
§ 7.5. Включение цепи r, L на синусоидальное напряжение	196
§ 7.6. Короткое замыкание цепи r, C	197
§ 7.7. Включение цепи r, C на постоянное напряжение	199
§ 7.8. Короткое замыкание цепи r, L, C	200
§ 7.9. Колебательный разряд конденсатора	201
Глава 8. Трансформаторы	
§ 8.1. Общие сведения	205
§ 8.2. Принцип действия трансформатора. Э. д. с., наводимые в трансформаторах, и коэффициент трансформации	206
§ 8.3. Холостой ход трансформатора	208
§ 8.4. Рабочий режим трансформатора	211
§ 8.5. Приведенный трансформатор	213
§ 8.6. Схема замещения трансформатора	215
§ 8.7. Векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой	215

§ 8.8.	Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке	217
§ 8.9.	Испытание трансформаторов	218
§ 8.10.	К. п. д. трансформаторов	219
§ 8.11.	Трехфазные трансформаторы	219
§ 8.12.	Автотрансформаторы	221
§ 8.13.	Многообмоточные трансформаторы	222
§ 8.14.	Параллельная работа трансформаторов	222
§ 8.15.	Охлаждение трансформатора	223
Глава 9. Электрические измерения		
§ 9.1.	Общие сведения	229
§ 9.2.	Основные определения	229
§ 9.3.	Погрешности	230
§ 9.4.	Приборы магнитоэлектрической системы	231
§ 9.5.	Общие детали устройства приборов с непосредственным отсчетом	233
§ 9.6.	Общие свойства приборов и предъявляемые к ним требования	236
§ 9.7.	Применение приборов магнитоэлектрической системы	237
§ 9.8.	Магнитоэлектрические приборы с преобразователями	240
§ 9.9.	Электромагнитные приборы	242
§ 9.10.	Электродинамические приборы	243
§ 9.11.	Ферродинамические приборы	245
§ 9.12.	Логометры	245
§ 9.13.	Электростатические приборы	246
§ 9.14.	Счетчики электрической энергии	248
§ 9.15.	Измерительные трансформаторы	250
§ 9.16.	Измерение токов и напряжений	253
§ 9.17.	Измерение мощности и расхода энергии	253
§ 9.18.	Измерение частоты	260
§ 9.19.	Регистрирующие приборы	260
§ 9.20.	Измерение сопротивлений	261
§ 9.21.	Электрические измерения неэлектрических величин	262
§ 9.22.	Условные обозначения измерительных приборов	264
Глава 10. Асинхронные машины		
§ 10.1.	Общие сведения	267
§ 10.2.	Устройство трехфазного асинхронного двигателя	267
§ 10.3.	Схемы соединений обмоток статора. Разметка выводов	274
§ 10.4.	Принцип действия асинхронного двигателя	276
§ 10.5.	Э. д. с. статора и ротора. Частота тока ротора	280
§ 10.6.	Уравнения электрического равновесия статора и ротора.	
Ток ротора		283
§ 10.7.	Уравнение намагничивающих сил и токов	287
§ 10.8.	Схема замещения и векторная диаграмма	289
§ 10.9.	Энергетическая диаграмма. Потери, к. п. д.	291
§ 10.10.	Вращающий момент	293
§ 10.11.	Пуск в ход асинхронных двигателей	299
§ 10.12.	Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами	302
§ 10.13.	Рабочие характеристики	305
§ 10.14.	Регулирование скорости вращения	306
§ 10.15.	Генераторный режим асинхронной машины	309
§ 10.16.	Электрическое торможение асинхронного двигателя	310
§ 10.17.	Некоторые другие режимы использования асинхронной машины	313
§ 10.18.	Однофазный двигатель	315
§ 10.19.	Асинхронные микромашины для систем автоматического управления	320
§ 10.20.	Типы и каталожные данные асинхронных двигателей	

отечественного производства	327
• Глава 11. Синхронные машины	
§ 11.1. Общие сведения	332
§ 11.2. Устройство синхронных машин	332
§ 11.3. Синхронный генератор. Принцип действия и характеристика холостого хода	336
§ 11.4. Реакция якоря	338
✓ § 11.5. Уравнение напряжений статора. Векторная диаграмма напряжений генератора	341
§ 11.6. Внешняя характеристика генератора	343
§ 11.7. Электромагнитный момент и угловая характеристика синхронного генератора	344
§ 11.8. Параллельная работа синхронной машины с сетью большой мощности	346
§ 11.9. Принцип действия синхронного двигателя	351
§ 11.10. Пуск в ход синхронного двигателя	353
✓ § 11.11. Уравнение напряжений статора синхронного двигателя, векторная диаграмма	355
§ 11.12. Угловая и механические характеристики синхронного двигателя	356
§ 11.13. Влияние тока возбуждения на коэффициент мощности синхронного двигателя	358
§ 11.14. Рабочие характеристики синхронного двигателя	360
§ 11.15. Сравнение синхронного двигателя с асинхронным. Область применения синхронных двигателей	361
§ 11.16. Типы и каталожные данные синхронных двигателей отечественного производства	362
✓ § 11.17. Синхронные микромашины	363
• Глава 12. Машины постоянного тока	
§ 12.1. Устройство машин постоянного тока	370
§ 12.2. Принцип действия генератора постоянного тока	372
§ 12.3. Реакция якоря и коммутация в машинах постоянного тока	374
§ 12.4. Типы генераторов постоянного тока и их характеристики	377
§ 12.5. Электромашинные усилители	384
* § 12.6. Принцип действия и основные уравнения двигателей постоянного тока	387
• § 12.7. Вращающий момент и скорость вращения двигателя	388
§ 12.8. Пуск двигателей постоянного тока	389
§ 12.9. Двигатель с параллельным возбуждением	390
§ 12.10. Двигатель с последовательным возбуждением	395
§ 12.11. Двигатель со смешанным возбуждением	397
§ 12.12. Потери мощности, к. п. д. и номинальные данные машин постоянного тока	398
§ 12.13. Основные типы машин постоянного тока	400
Глава 13. Электропривод	
§ 13.1. Общие сведения	405
§ 13.2. Уравнение движения электропривода	406
§ 13.3. Приведение моментов к одной оси	408
§ 13.4. Общие положения по выбору мощности двигателя	413
§ 13.5. Выбор мощности двигателя при длительном режиме нагрузки	414
§ 13.6. Выбор мощности двигателя для повторно-кратковременного и кратковременного режимов	418
§ 13.7. Аппаратура управления и защиты	422
§ 13.8. Изображение схем управления электроприводами	432
Приложения	437

ПРЕДИСЛОВИЕ

Формирование электротехники как науки следует отнести к XIX в. Первая половина этого же века знаменует собой открытие основных законов электромагнетизма, создание теории электротехники, а вторая — практическое использование электромагнитных явлений, создание первых электрических машин — генераторов, трансформаторов, двигателей.

Электротехника приобретает громадное практическое значение. Основатели научного коммунизма К. Маркс и Ф. Энгельс видели в электрификации революционизирующую силу, влияющую на развитие человеческого общества. В. И. Ленин подчеркивал исключительно большую роль и значение электрификации как материально-технической базы коммунизма: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

В 1920 г., когда молодое Советское государство только еще начинало создавать свое народное хозяйство, был разработан план ГОЭЛРО, который явился началом курса на электрификацию всей страны. Планы электрификации находят отражение на всех съездах Коммунистической партии. В решениях XXIII съезда КПСС записано: «Ленинская идея электрификации всей страны является определяющей и для нового пятилетнего плана». Планируется увеличение производства электрической энергии за пять лет примерно на 70%. Взят курс на строительство крупных тепловых электростанций и экономичных гидроэлектростанций. Предусматривается завершить создание единой энергетической системы европейской части СССР, увеличить отпуск электрической энергии для бытовых нужд населения, в еще большей степени электрифицировать сельское хозяйство.

Электротехника далеко не исчерпывается вопросами получения, передачи, распределения и преобразования больших количеств электрической энергии. При современном уровне развития производства чрезвычайно важными являются: си-

стемы электроавтоматики с применением электронных и магнитных усилителей, реле, датчиков и других многообразных электромагнитных приборов; электрические измерения электрических и неэлектрических величин, основанные на преобразовании сигналов; телеграф, радио, магнитная запись, связанные с передачей сигналов и хранением информации; телефон и телевидение, использующие преобразование сигналов и информации; производство и эксплуатация вычислительных машин, основными элементами которых служат электромагнитные и электронные устройства.

Настоящая книга написана в соответствии с программой курса «Общая электротехника» для неэлектротехнических специальностей высших технических учебных заведений. Текст книги допускает при ограниченном числе часов курса исключение некоторых глав или параграфов с сохранением целостности остального материала.

Изложение ведется с применением системы единиц СИ — международной системы единиц (The International System of Units). Основные положения ее и единицы системы СИ даны в приложении.

Главы 1, 2, 5 и приложения 3, 4 подготовил *В. М. Ильин*; главы 3, 6 и 7 — *В. М. Бладыко*; главу 4 — *И. А. Федорова*; главы 8, 9 и приложения 1, 2 — *Д. И. Минковский*; главы 10, 11 и 13 — *Н. В. Бараш*; главу 12 — *М. З. Згировский*.

Авторский коллектив выражает искреннюю благодарность рецензентам: коллективу кафедры теоретических основ электротехники Минского радиотехнического института, заслуженному деятелю науки и техники БССР, проф. А. И. Руцкому, заведующему кафедрой энергетики Белорусского технологического института им. С. М. Кирова доц. П. В. Ползнку, старшему преподавателю МВИРТУ А. Е. Остапову за помощь при подготовке рукописи к изданию.

Все замечания и пожелания по этой книге направлять по адресу: Минск, ул. Кирова, 24, изд-во «Вышэйшая школа».

ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

§ 1.1. Электрические характеристики материалов

Сущность электротехники состоит в практическом применении электромагнитных явлений. Наиболее полное и эффективное использование этих явлений достигается широким внедрением в электротехнические устройства разнообразных материалов, обладающих специфическими характеристиками. К важнейшим из них можно отнести электрические и магнитные характеристики.

Электротехнические свойства материалов оцениваются в первую очередь способностью проводить электрический ток, т. е. электропроводностью. В зависимости от степени электропроводности все материалы подразделены на три группы:

- а) проводниковые;
- б) полупроводниковые;
- в) диэлектрические.

Проводниковые материалы имеют в нормальном состоянии или при воздействии очень слабого электрического поля (приложенного напряжения) сравнительно большое количество заряженных частиц — электронов и ионов. Благодаря этому они хорошо проводят электрический ток.

Одной из основных характеристик проводниковых материалов является величина удельного сопротивления ρ . Под ним понимают сопротивление провода, имеющего площадь поперечного сечения один квадратный миллиметр, и длину, равную одному метру. Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью $\gamma = \frac{1}{\rho}$.

Для наиболее широко используемых проводниковых материалов величины удельных сопротивлений приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Материал	Удельное сопротивление, ом·мм ² /м
Медь	0,0175
Алюминий	0,026
Вольфрам	0,049
Сталь проводниковая	0,1
Чугун	0,5
Нихром	1,1
Манганин	0,42
Константан	0,49

Из материалов с малым удельным сопротивлением (медь, алюминий, сталь) выполняют токоведущие части электроустановок — обмотки машин и трансформаторов, провода линий электропередач и т. д. Проводниковые материалы со сравнительно большим удельным сопротивлением (нихром) применяют для изготовления нагревательных элементов промышленных электропечей и бытовых электроприборов, а также в измерительных приборах (манганин, константан).

От удельного сопротивления ρ , длины l и сечения s проводников зависит сопротивление и проводимость элементов электроустановок:

$$r = \rho \frac{l}{s}, \quad g = \frac{1}{r} = \frac{s}{\rho l} = \frac{\gamma s}{l}. \quad (1.1)$$

На величину сопротивления оказывает влияние и температура проводов. Зависимость сопротивления от температуры может быть выражена соотношением

$$r_t = r(1 + \alpha t), \quad (1.2)$$

где t — разность температур — заданной и исходной (за исходную принята температура 20°С; удельные сопротивления, приведенные в табл. 1.1, заданы для этой температуры);

r — сопротивление, соответствующее исходной температуре;
 α — температурный коэффициент сопротивления. Для чистых металлов температурный коэффициент примерно одинаков и положителен. Величина $\alpha \approx 0,004 \cdot 1/^\circ\text{C}$.

Разработаны специальные сплавы типа манганина и константана, имеющие значительно меньший температурный коэффициент. Такие сплавы применяются в электроприборостроении. Для электролитов и угля α имеет отрицательное значение, т. е. их сопротивление с ростом температуры уменьшается.

Во многих случаях температура проводников колеблется в небольших пределах (провода линий передач) и их сопротивление остается практически постоянным. При этом зависимость напряжения от тока проводника — вольт-амперная характеристика — представляет прямую линию (рис. 1.1). Сопротивления, имеющие линейную вольт-амперную характеристику, называются *линейными*.

Имеются также сопротивления, вольт-амперные характеристики которых в значительной степени нелинейны (рис. 1.2).

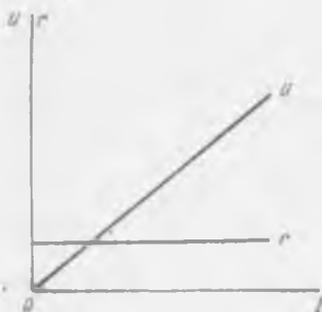


Рис. 1.1

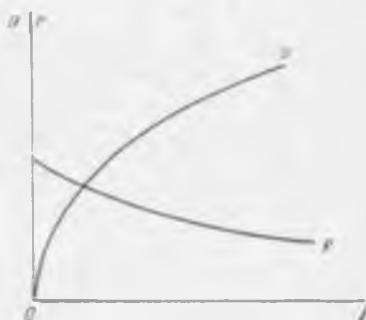


Рис. 1.2

Они получили название *нелинейных сопротивлений*. К нелинейным сопротивлениям относятся все виды выпрямителей, стабилизаторы напряжения и тока, лампы накаливания, электрическая дуга и т. д.

Полупроводниковые материалы при одинаковых условиях с проводниковыми имеют значительно большее удельное сопротивление (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Материал	Удельное сопротивление, ом·м ² /м
Германий	$68 \cdot 10^4$
Кремний	$2 \cdot 10^9$
Селен	$10^6 - 10^{17}$

К полупроводниковым материалам относятся следующие десять элементов: бор, германий, кремний, углерод, мышьяк, фосфор, селен, сера, теллур, иод. Полупроводниковыми свойствами обладают химические соединения — окислы, сульфиды, селениды, теллуриды, карбиды, а также сплавы некоторых

металлов и так называемые керамические полупроводники, к которым относят материалы с полупроводящей или проводящей фазой из карбида кремния, бора или углерода, скрепленной непроводящей керамической связкой.

Проводимость полупроводниковых материалов в сильной степени зависит от внешних энергетических воздействий (электрическое поле, нагрев, освещенность, радиация), а также от примесей. И энергетические воздействия и примеси увеличивают число носителей зарядов, причем каждый атом примесей увеличивает их обычно на единицу.

Поэтому в полупроводниковой технике чистыми материалами называют такие, в которых количество атомов примесей не превышает числа собственных носителей зарядов. Например, не более одного атома примеси должно приходиться на 10^9 — 10^{10} атомов германия и на 10^{12} — 10^{13} атомов кремния, чтобы их можно было считать чистыми. Степень чистоты материала контролируют путем сравнения его удельного сопротивления с удельным сопротивлением идеально чистого материала, так как никакими методами химических анализов выполнить это не удается.

В настоящее время получение чистых полупроводниковых материалов представляет собой очень сложный производственный процесс, обуславливающий сравнительно высокую стоимость изделий из них.

Концентрация примесей обуславливает вид основной проводимости полупроводникового материала — электронной или дырочной, в зависимости от которой материалы подразделяют на два типа: если основными носителями зарядов являются электроны, материал относят к *n*-типу*; если же ими являются дырки (орбиты атомов, лишённые части электронов), материал относят к *p*-типу**. Примеси и энергетические воздействия порождают управляемость свойств полупроводниковых приборов.

Наличие у полупроводниковых материалов электронной *n* и дырочной *p* проводимости дает возможность получить устройства с (*p*—*n*)-переходом, в которых возникает так называемый запирающий слой, обладающий односторонней проводимостью и создающий эффект выпрямления переменного тока аналогично электронным лампам. На этой основе разработаны маломощные и мощные выпрямители.

Комбинации из двух и большего числа взаимно связанных переходов позволяют получить управляемые устройства — транзисторы, которые, в частности, широко используются в качестве усилителей тока, напряжения и мощности.

* *n* — negative — отрицательный.

** *p* — positive — положительный.

На основе свойств полупроводниковых материалов разработаны новые типы преобразователей различных видов энергии в электрическую энергию, например «солнечные батареи» и термоэлектрические генераторы.

Полупроводниковые устройства нашли широкое применение и для многих других целей: в качестве нагревательных и холодильных элементов, индикаторов магнитного поля и радиоактивных излучений, датчиков температуры и давления и т. д.

Основные достоинства полупроводниковых устройств — это простота и надежность конструкции, малые габариты и вес, большой срок службы, устойчивость к тряске и ударам. Их недостатками являются небольшое рабочее напряжение и допустимая температура, сравнительно высокая стоимость.

Диэлектрические материалы имеют удельное сопротивление в 10^{10} — 10^{18} раз большее, чем проводники. Их электропроводность ничтожно мала. Поэтому применяются они для изоляции токоведущих частей машин, аппаратов и приборов.

Изоляционные свойства этих материалов характеризуют следующими основными величинами:

- 1) электрической прочностью;
- 2) диэлектрической проницаемостью;
- 3) нагревостойкостью.

Диэлектрическая проницаемость характеризует степень поляризации (смещения зарядов) материала под воздействием электрического поля. Различают относительную и абсолютную диэлектрическую проницаемость. Относительная проницаемость может быть определена как отношение емкости двух конденсаторов, имеющих одинаковые размеры, т. е.

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (1.3)$$

где C_0 — емкость конденсатора, диэлектриком которого является вакуум;

C — емкость конденсатора с диэлектриком, проницаемость которого определяется.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость равна произведению относительной проницаемости на проницаемость вакуума:

$$\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0. \quad (1.4)$$

Проницаемость вакуума $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ ф/м.

В табл. 1.3 приведены относительные диэлектрические проницаемости часто применяемых изоляционных материалов.

Таблица 13

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость
Масло трансформаторное	2,2
Хлорвинил	3—5
Резина	2,6—3
Фарфор	5,5—6
Слюда	5,5—7,5

Для изготовления изоляторов электротехнических устройств стремятся применять материалы с возможно меньшей диэлектрической проницаемостью, что приводит к улучшению электрических характеристик изоляции, например к увеличению электрической прочности.

Диэлектрики с большой проницаемостью применяются в электрических конденсаторах. Это дает возможность получить необходимую емкость при меньшем объеме конденсаторов.

Электрическая прочность диэлектрика характеризует его способность выдерживать приложенное напряжение. Под ней понимают величину напряжения, при котором наступает пробой диэлектрика толщиной в 1 см. Следовательно, чем выше электрическая прочность диэлектрика, тем больше может быть рабочее напряжение изготовленного из него изолятора. Для некоторых материалов электрическая прочность приведена в табл. 14.

Таблица 14

Материал	Электрическая прочность, кв/см
Дерево сухое (дуб)	25—52
Фарфор (толщина $d = 1,5—3$ мм)	150—200
Масло трансформаторное	70—120
Резина*	150—250
Картон электротехнический ($d = 2—3$ мм)	100
Слюда ($d = 0,025—0,055$ мм)	800—1450

* Более высокая прочность при меньшей толщине.

Нагревостойкость (тепlostойкость) диэлектриков характеризует их способность длительно выдерживать воздействие высоких температур без изменения свойств. ГОСТ 8865—58 «Материалы электроизоляционные для электрических»

ких машин, трансформаторов и аппаратов. Классификация нагревостойкости» предусматривает следующие семь классов (табл. 1.5):

Таблица 1.5

Условное обозначение класса нагревостойкости	У	А	Е	В	Р	Н	С
--	---	---	---	---	---	---	---

Максимально допустимая температура, соответствующая данному классу, °С

90 105 120 130 155 180 >180

Если температура диэлектрика превысит максимально допустимое значение, произойдет резкое ухудшение его изоляционных, механических и других свойств.

Задачи. 1.1. Длина вольфрамовой нити лампы накаливания $l=1$ м, ее сечение $s=0,0025$ мм². Определить сопротивление нити в холодном (20°С) и накаленном (3000°С) состояниях.

Решение. Удельное сопротивление вольфрама (см. табл. 1.1) $\rho = 0,049$ ом · мм²/м.

Сопротивление нити в холодном состоянии

$$r = \rho \frac{l}{s} = 0,049 \frac{1}{0,0025} \approx 20 \text{ ом.}$$

Сопротивление накаленной нити

$$r_t = r (1 + \alpha t) = 20 (1 + 0,004 \cdot 2980) = 260 \text{ ом,}$$

т. е. в 13 раз больше сопротивления холодной нити.

1.2. Определить максимальное напряжение, которое может выдержать резиновая изоляция толщиной $d=5$ мм.

Решение. Из табл. 1.4 берем среднюю электрическую прочность резины $E=200$ кВ/см.

Максимальное напряжение, которое можно приложить к изоляции,

$$U = dE = 0,5 \cdot 200 = 100 \text{ кВ.}$$

1.3. Сопротивление медного проводника в горячем состоянии (80°С) равно 14 ом. Определить его сопротивление при температуре -20°С.

Ответ: 10 ом.

1.4. Определить минимальную толщину изоляции из электротехнического картона, способной выдержать напряжение 500 кВ.

Ответ: 5 см.

Вопросы для самопроверки

Чем характерны проводниковые материалы?

Что такое удельное сопротивление и удельная проводимость?

Каковы области применения проводниковых материалов с малым и большим удельным сопротивлением?

От чего зависит сопротивление токоведущих частей электроустановок?

Какие сопротивления называются линейными и нелинейными?

Что наиболее характерно для полупроводниковых материалов? Каковы области их применения? Какие материалы входят в группу диэлектриков? Какими основными величинами характеризуют их электрические свойства?

§ 1.2. Магнитные характеристики материалов

По магнитным свойствам все материалы могут быть разделены на две группы: ферромагнитные (железо, кобальт, никель, гадолиний и некоторые другие металлы и их сплавы) и неферромагнитные (все материалы, за исключением ферромагнитных).

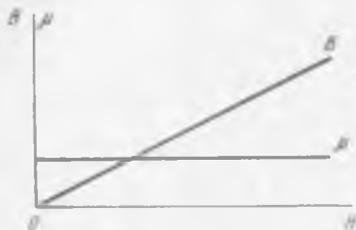


Рис. 1.3

Особенностью неферромагнитных материалов является то, что зависимость между индукцией B и напряженностью H магнитного поля в них является линейной (рис. 1.3). Их абсолютная (статическая) магнитная проницаемость

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad (1.5)$$

величина постоянная и равная практически магнитной проницаемости вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$, а их относительная проницаемость

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = 1. \quad (1.6)$$

Для ферромагнитных материалов характерно, во-первых, то, что их магнитная проницаемость может достигать очень больших значений по сравнению с проницаемостью неферромагнитных материалов. Это дает возможность получить интенсивные магнитные поля при небольших напряженностях, что приводит к уменьшению объема электротехнических устройств, увеличению их к. п. д. Во-вторых, величина магнитной проницаемости для них зависит от напряженности (индукции) магнитного поля. Поэтому зависимость индукции от напряженности ферромагнитных материалов получается нелинейной. Кроме того, зависимость B от H неоднозначна (рис. 1.4).

Значение магнитной индукции зависит не только от заданной напряженности поля, но и от предшествующего магнитного состояния материала.

Кривая oa может быть получена при плавном намагничивании предварительно размагниченного образца (первоначальная кривая). На ней принято различать три основных участка:

1 — начальный, характерный медленным нарастанием индукции. Ему соответствует начальная магнитная проницаемость μ_n .

2 — участок быстрого возрастания индукции. На нем магнитная проницаемость достигает максимального значения μ_m .

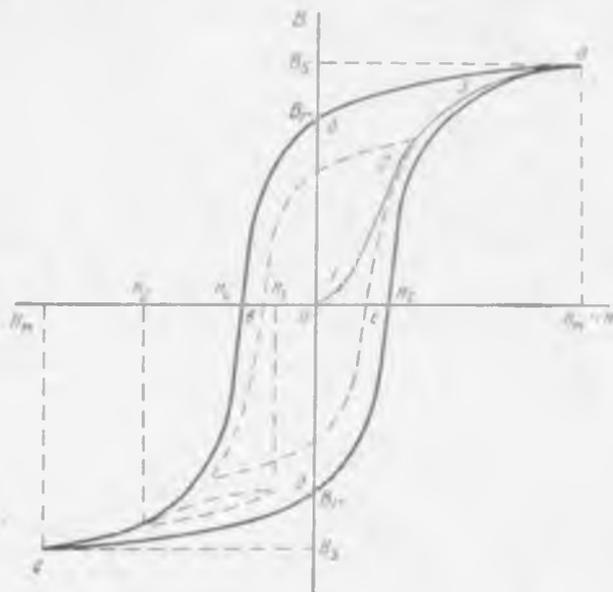


Рис. 1.4

3 — участок насыщения ферромагнитного материала, на котором индукция медленно возрастает, а магнитная проницаемость снижается (рис. 1.5).

Режим работы устройств, которые базируются на использовании ферромагнитных материалов, будет наиболее экономичным, если он соответствует второму участку, имеющему максимальную проницаемость. Однако в некоторых устройствах создаются индукции, соответствующие первому участку (трансформаторы тока), или третьему участку кривой намагничивания (ферромагнитные стабилизаторы, магнитные усилители и т. д.).

Замкнутая кривая *abvгдеа*, описывающая зависимость между индукцией и напряженностью поля при циклическом перемагничивании материала, носит название петли гистерезиса. Размер петли при росте напряженности увеличивается вначале от нуля до некоторого предельного значения, а затем остается неизменным. Наибольшая петля гистерезиса называется предельным гистерезисным циклом,

а все остальные петли — частными циклами. Если напряженность поля изменяется симметрично (от $+H$ до $-H$), гистерезисные циклы также будут симметричными, и, наоборот, несимметричное изменение напряженности (например, от $-H_1$ до $-H_2$, см. рис. 1.4) создает несимметричные циклы перемагничивания материала. Кривая, проходящая через вершины симметричных циклов, называется основной кривой намагничивания. Расчеты ферромагнитных устройств, работающих с переменными полями, чаще всего выполняют с учетом этой кривой. Она незначительно отличается от первоначальной кривой намагничивания.

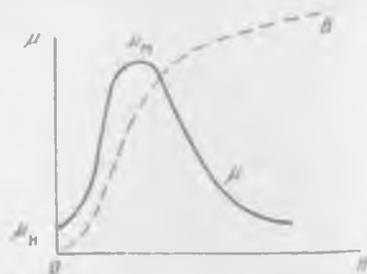


Рис. 1.5

Основными параметрами предельного гистерезисного цикла являются:

B_s — индукция насыщения — это такое значение индукции, при котором верхняя и нижняя ветви петли гистерезиса практически сливаются;

B_r — остаточная индукция, получающаяся при изменении напряженности от максимального значения до нуля;

$k = \frac{B_r}{B_s}$ — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса (для обычных материалов $k=0,6—0,8$, а для специальных материалов с так называемой прямоугольной петлей гистерезиса $k=0,94—0,96$);

H_c — коэрцитивная сила, представляющая собой напряженность поля, необходимую для снижения индукции от B_r до нуля.

В зависимости от величины коэрцитивной силы ферромагнитные материалы подразделяются на магнитномягкие и магнитотвердые.

Магнитномягкие материалы имеют небольшую коэрцитивную силу ($H_{смин} = 0,4 \text{ а/м}$), т. е. узкую петлю гистерезиса. К магнитномягким материалам относятся технически чистое железо, электротехнические стали, пермаллон, некоторые типы ферритов. Такие материалы используют в устройствах с изменяющимися магнитными полями. Благодаря этому снижаются потери энергии на перемагничивание ферромагнитных элементов (сердечников), так как потери пропорциональны площади петли гистерезиса.

Магнитотвердые материалы (мартенситные стали, сплавы железа, никеля, алюминия, кобальта и некоторые типы фер-

ритов) имеют значительно большую коэрцитивную силу, достигающую до $3,2 \cdot 10^5$ а/м. Они характерны широкой петлей гистерезиса.

Основной магнитный материал, используемый в электротехнике,— это электротехническая сталь различных марок, представляющая собой сплав железа с 0,5—5,0% кремния. Она имеет хорошие электромагнитные свойства: благодаря добавке кремния в 5—7 раз увеличивается ее удельное сопротивление, что приводит к снижению вихревых токов и потерь от них; уменьшается также коэрцитивная сила и, следовательно, потери от перемагничивания; возрастает максимальная магнитная проницаемость. К тому же электротехническая сталь не содержит дефицитных компонент, в то время как в состав пермаллоя, ферритов наряду с железом входят никель, марганец, кобальт, цинк и другие дорогостоящие металлы.

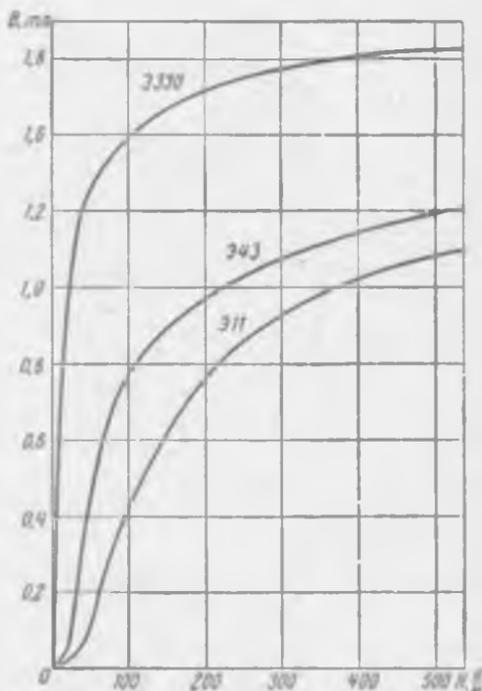


Рис. 1.6

Основные характеристики наиболее распространенных ферромагнитных материалов даны в табл. 1.6, а кривые намагничивания электротехнической стали приведены на рис. 1.6.

Задачи. 1.5. Определить индукцию магнитного поля в воздухе и в стали Э43, если в обоих случаях напряженность $H=100$ а/м.

Решение. Индукция магнитного поля в воздухе

$$B = \mu_0 H = 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ тл} = 1,25 \text{ гс.}$$

По кривой намагничивания стали Э43 определяем индукцию в ней

$$B_{ст} = 0,76 \text{ тл} = 7600 \text{ гс,}$$

т. е. в 6000 раз больше, чем в воздухе.

1.6. Определить относительную магнитную проницаемость стали Э11 при напряженности магнитного поля $H_1=50$ а/м, $H_2=150$ а/м, $H_3=400$ а/м.

Таблица 1.6

Материал	Начальная прочность $R_{0.2}$	Максимальная прочность $R_{0.2}$	Коэффициентная сила H_V , н/мм	Индукция насыщения B_s , тл	Удельное сопротивление ρ , ом·мм ² /м	Ориентировочная стоимость 100 кг материала, руб.
Технически чистое железо	250	3 500—4 500	40—100	2,18	0,1	1
Электротехническая сталь	200—600	3 000—8 000	10—65	1,95—2,0	0,6—0,25	1,35—2,5
Пермаллой:						
низконикелевый (40—50%)	2 000—4 000	15 000—60 000	5,6—32	1,3—1,6	0,45—0,9	25
высоконикелевый (79%)	15 000—35 000	70 000—200 000	0,8—4	0,7—0,75	0,5—0,65	50
Ферриты:						
никель-цинковые	10—2 000**	15—3 500	1 000—8	0,13—0,38	10^{12} — 10^7	40*
марганец-цинковые	1 000—5 000**	3 000—10 000	28—12	0,35—0,4	10^6 — $0,5 \cdot 10^9$	2 000*

Примечания.

* Для ферритов стоимость 100 кг изделий средней степени сложности.

** При частоте 100 кГц (А. А. Преображенский. Магнитные материалы. М., «Высшая школа», 1965).

Решение. По кривой намагничивания стали Э11 (см. рис. 1.6) определяем значения индукции, соответствующие заданным значениям напряженности:

$$B_1 = 0,1 \text{ тл}, B_2 = 0,6 \text{ тл}, B_3 = 1,02 \text{ тл}.$$

Относительная магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0 H}$$

откуда

$$\mu_1 = \frac{B_1}{\mu_0 H_1} = \frac{0,1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50} = 1600,$$

$$\mu_2 = \frac{B_2}{\mu_0 H_2} = \frac{0,6}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 150} = 3200,$$

$$\mu_3 = \frac{B_3}{\mu_0 H_3} = \frac{1,02}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 400} = 2000.$$

1.7. Индукция магнитного поля в стали имеет значения $B_1 = 0,3 \text{ тл}$, $B_2 = 0,6 \text{ тл}$, $B_3 = 0,9 \text{ тл}$. Им соответствуют относительные магнитные проницаемости $\mu_1 = 3000$, $\mu_2 = 3200$, $\mu_3 = 2570$.

Определить значения напряженности магнитного поля, соответствующие заданным значениям индукции и магнитной проницаемости.

$$\text{Ответ: } H_1 = 80 \text{ а/м}, \\ H_2 = 150 \text{ а/м}, \\ H_3 = 280 \text{ а/м}.$$

1.8. При каких значениях напряженности магнитного поля в воздухе (H_1) и в стали Э11 (H_2) индукция будет иметь одно и то же значение $B = 0,25 \text{ тл}$.

$$\text{Ответ: } H_1 = 2000 \text{ а/м}, \\ H_2 = 70 \text{ а/м}.$$

Вопросы для самопроверки

Чем отличаются магнитные свойства ферромагнитных и неферромагнитных материалов?

Какова зависимость магнитной проницаемости неферромагнитных и ферромагнитных материалов от напряженности магнитного поля?

Что такое предельный и частные гистерезисные циклы, остаточная индукция, индукция насыщения и коэрцитивная сила материала?

Какие материалы относятся к магнитномягким и магнитнотвердым и в каких устройствах они применяются?

С какой целью в сталь добавляют до 5% кремния?

Чем объяснить широкое применение ферромагнитных материалов в электротехнических устройствах?

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

§ 2.1. Основные определения и законы

Основу электрической цепи составляет совокупность источников и приемников электрической энергии и соединительных проводов. Кроме того, цепь содержит устройства для управления и защиты (например, выключатели, предохранители).

Источниками постоянного тока могут быть генераторы, аккумуляторы, гальванические элементы. Характеризуют источники чаще всего следующими величинами:

электродвижущей силой (э. д. с.) E , которая равна напряжению на разомкнутых зажимах источника; \longrightarrow

номинальным током I_n , т. е. таким максимальным током, при котором источник может длительно работать, не перегреваясь сверх допустимой температуры;

номинальным напряжением U_n , действующим на зажимах источника при номинальном токе;

номинальной мощностью P_n , соответствующей номинальному току и напряжению;

внутренним сопротивлением r_0 .

Диапазон этих величин в зависимости от назначения источников может иметь очень широкие пределы. Так, номинальные напряжения могут составлять вольты и сотни тысяч вольт, номинальные токи — доли ампера и десятки тысяч ампер, внутренние сопротивления — доли ома и десятки ом.

Приемниками постоянного тока могут быть электрические двигатели, электролизные установки, аккумуляторы во время зарядки, электромагниты, осветительные лампы и другие устройства. Основными величинами, характеризующими приемники, являются:

номинальное напряжение U_n — напряжение, при котором приемник развивает расчетную, номинальную мощность P_n ;

номинальный ток I_n , т. е. наибольший длительно допустимый ток;

номинальное сопротивление r_n .

Диапазон этих величин такой же широкий, как и для источников электрической энергии.

В простейшем случае электрическая цепь состоит из одного источника E , одного приемника r_1 и двух соединительных проводов (рис. 2.1).

Электрическая цепь, в которой содержатся только линейные сопротивления, носит название линейной цепи. Если же цепь содержит хотя бы одно нелинейное сопротивление, она является нелинейной электрической цепью.

В замкнутой цепи под действием э. д. с. источника протекает ток I . Цепь, по которой протекает неизменяющийся во времени ток, представляет собой цепь постоянного то-

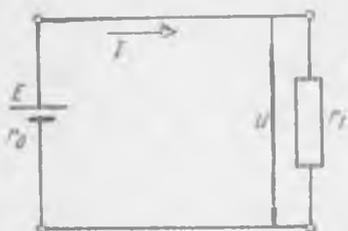


Рис. 2.1

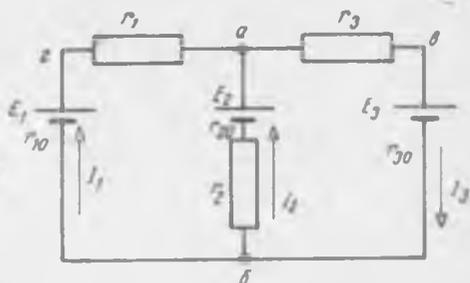


Рис. 2.2

ка. Если по всем участкам цепи протекает один и тот же ток, она называется неразветвленной электрической цепью.

При прохождении тока на сопротивлениях участков цепи возникает разность потенциалов — падение напряжения.

Соотношение между током, напряжением и сопротивлением участка цепи выражается при этом законом Ома для участка цепи. Например, для участка цепи, содержащего сопротивление r_1 , закон Ома можно записать в виде

$$I = \frac{U}{r_1} = Ug_1, \quad (2.1)$$

где g_1 — проводимость рассматриваемого участка цепи.

Зависимость между э. д. с. цепи E , током I в ней и ее общим сопротивлением r выражается законом Ома для цепи в целом

$$I = \frac{E}{r} = Eg. \quad (2.2)$$

На рис. 2.2 представлена разветвленная цепь, содержащая участки с различными токами (I_1, I_2, I_3). При расчете разветвленных цепей с несколькими источниками питания используют понятия: узел, ветвь, контур цепи.

Узлом цепи называют такую ее точку, в которой сходятся не менее трех токов. В схеме рис. 2.2 только точки *a* и *b* являются узлами цепи.

Ветвь — это участок цепи, заключенный между двумя узлами, на всем протяжении которого протекает один и тот же ток. Схема рис. 2.2 содержит три ветви: *аб*, *авб*, *агб*.

Контур — замкнутая часть схемы, которая будет представлять собой неразветвленную цепь, если отключить все не входящие в нее ветви. Обычно выделяют простейшие контуры. В цепи рис. 2.2 можно выделить контуры *абга* и *авба*.

Если разветвленная цепь содержит источники в нескольких ветвях, режим ее работы не может быть описан только законом Ома. Но это можно выполнить на основании первого и второго законов Кирхгофа, являющихся следствием закона сохранения энергии.

Первый закон справедлив для узлов цепи. Его формулировка следующая: *в любом узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю, т. е.*

$$\sum I = 0. \quad (2.3)$$

В уравнение (2.3) токи, притекающие к узлу, принято подставлять со знаком плюс, а оттекающие — со знаком минус.

Второй закон Кирхгофа имеет силу для замкнутых контуров цепи. Он может быть сформулирован так: *в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма э. д. с. равна алгебраической сумме падений напряжения на всех его участках или*

$$\sum E = \sum U = \sum I r. \quad (2.4)$$

В это уравнение э. д. с., напряжения или токи, совпадающие по направлению с выбранным направлением обхода контуров, подставляют с плюсом, а противоположно направленные — с минусом.

В действующей цепи электрическая энергия источника питания преобразуется в другие виды энергии: механическую, тепловую, химическую и т. д. Когда через участок цепи с сопротивлением *r* в течение времени *t* протекает ток *I*, на этом участке расходуется электрическая энергия, равная

$$W = I^2 r t = U I t. \quad (2.5)$$

Энергия, расходуемая источником на всех участках цепи, равна

$$\sum W = \sum I^2 r t. \quad (2.6)$$

Скорость преобразования электрической энергии в другие виды энергии представляет электрическую мощность

ность. Для участка цепи мощность может быть определена как

$$P = \frac{W}{t} = I^2 r = UI, \quad (2.7)$$

а для цепи в целом

$$P = \frac{\Sigma W}{t}. \quad (2.8)$$

Непосредственно в сопротивлениях цепи электрическая энергия преобразуется в тепло. Количество тепла может быть определено на основании закона Ленца — Джоуля. В соответствии с этим законом количество тепла, выделяющегося на участке цепи, равно

$$Q = 0,24 W = 0,24 I^2 r t, \quad (2.9)$$

а во всей цепи

$$\Sigma Q = 0,24 \Sigma W. \quad (2.10)$$

Из закона сохранения энергии следует, что мощность источников в любой момент времени равна сумме мощностей всех участков цепи, т. е.

$$\Sigma EI = \Sigma I^2 r. \quad (2.11)$$

Последнее соотношение носит название уравнения баланса мощности.

Задачи. 2.1. Общее сопротивление цепи $r = 10$ ом. В цепи действует э. д. с. $E = 100$ в. Определить ток цепи, выделяющуюся в ней за время $t = 10$ ч электрическую энергию и ее стоимость при тарифе $T = 4$ коп. за 1 квт · ч, количество выделяющегося тепла и составить уравнение баланса мощности.

Решение. На основании закона Ома для цепи ток

$$I = \frac{E}{r} = \frac{100}{10} = 10 \text{ а.}$$

Затрачиваемая источником энергия

$$W = I^2 r t = 10^2 \cdot 10 \cdot 10 = 10 \text{ квт} \cdot \text{ч.}$$

Стоимость энергии'

$$C = W \cdot T = 10 \cdot 4 = 40 \text{ коп.}$$

Количество выделяющегося тепла

$$Q = 0,24 W = 0,24 \cdot 36 \cdot 10^6 = 8,64 \cdot 10^6 \text{ кал.}$$

Баланс мощности:

а) мощность, развиваемая источником,

$$P_1 = EI = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ вт;}$$

б) мощность, выделяющаяся в сопротивлении цепи,

$$P_2 = I^2 r = 10^2 \cdot 10 = 1000 \text{ вт.}$$

Таким образом, $P_1 = P_2$.

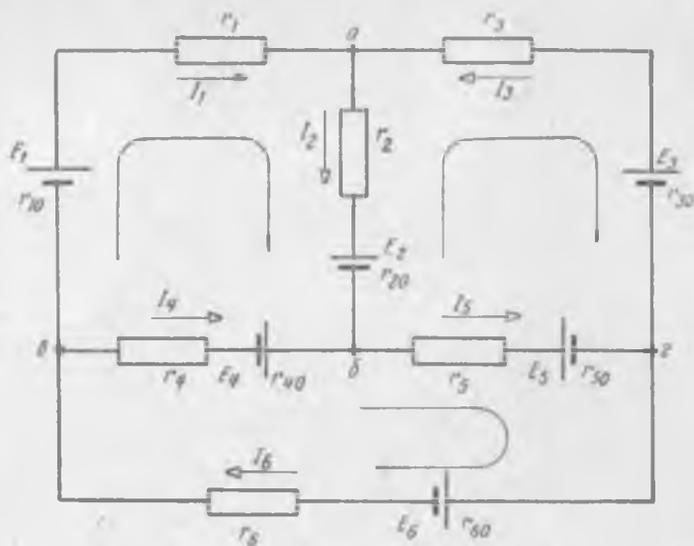


Рис. 23

2.2. Записать уравнения по первому и второму законам Кирхгофа соответственно для узлов a , b , c и контуров $abca$, $abca$, $cbcc$ цепи рис. 2.3.

Решение. Выбираем произвольные направления токов (на рис. 2.3. указаны прямыми стрелками) и произвольные направления обхода контуров (указаны изогнутыми стрелками).

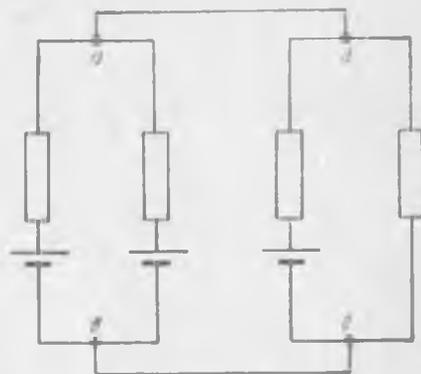


Рис. 24

Записываем уравнения по первому закону Кирхгофа:

$$\text{для узла } a \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0;$$

$$\text{для узла } b \quad I_3 + I_4 - I_5 = 0;$$

$$\text{для узла } c \quad I_5 - I_6 - I_4 = 0.$$

Записываем уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\text{для контура } abca \quad E_1 - E_2 - E_4 = I_1(r_{10} + r_1) + I_2(r_{20} + r_2) - I_4(r_{40} + r_4);$$

для контура $abga$ $E_2 - E_3 + E_5 = -I_3(r_3 + r_{30}) - I_5(r_{50} + r_5) - I_2(r_{20} + r_2)$;

для контура $abgv$ $E_4 - E_5 - E_6 = I_4(r_4 + r_{40}) + I_5(r_5 + r_{50}) + I_6(r_{60} + r_6)$.

2.3. Номинальное напряжение электрического чайника $U_{\text{н}} = 220$ в, его номинальное сопротивление $r_{\text{н}} = 88$ ом. Емкость чайника 2,5 л, к. п. д. 80%. За какое время после включения наполненный чайник закипит и сколько будет стоить израсходованная при этом электроэнергия, если стоимость 1 *квт·ч* равна 4 коп., а начальная температура воды 20° С?

Ответ: 31,25 мин; 1,16 коп.

2.4. Сколько независимых уравнений можно составить по первому и второму законам Кирхгофа для цепи рис. 2.4?

Ответ: одно по первому и три по второму закону (можно объединить узлы a и b , v и g).

Вопросы для самопроверки

Из каких устройств состоит цепь постоянного тока?

Каковы источники энергии постоянного тока?

Что такое номинальное напряжение, номинальный ток, номинальная мощность источника и приемника?

Какие устройства являются приемниками постоянного тока?

Какие цепи называются линейными и нелинейными?

Как сформулировать и записать закон Ома для участка цепи, содержащего сопротивление, и для цепи в целом?

Какие цепи называются разветвленными?

Что такое узел, ветвь и контур разветвленной цепи?

Как сформулировать и математически записать первый и второй законы Кирхгофа?

От чего зависит мощность электрического тока?

Чем определяется количество тепла, выделяющегося в цепи?

Как составить уравнение баланса мощности?

§ 2.2. Определение эквивалентного сопротивления и преобразование электрических цепей

Сопротивления в электрических цепях могут быть включены последовательно, параллельно, смешанно или по более сложным схемам. Расчет цепей во многих случаях упрощается при замене нескольких сопротивлений одним эквивалентным сопротивлением и при других преобразованиях. Рассмотрим свойства различных способов соединения сопротивлений.

Последовательное соединение. Последовательным называется такое соединение, при котором через все включенные сопротивления протекает один и тот же ток (рис. 2.5).

На основании второго закона Кирхгофа можно записать, что общее напряжение цепи равно сумме напряжений на отдельных участках:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2.12)$$

или

$$I r = I r_1 + I r_2 + I r_3,$$

откуда

$$r = r_1 + r_2 + r_3. \quad (2.13)$$

Таким образом, общее сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков.

Если последовательно включено n одинаковых сопротивлений, общее сопротивление равно одному из них, умноженному на n .



Рис. 2.5

Ток неразветвленной цепи можно определить как

$$I = \frac{U}{r} = \frac{U_1}{r_1} = \frac{U_2}{r_2} = \frac{U_3}{r_3},$$

откуда следует, например, что

$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{r_1}{r_3}, \quad (2.14)$$

т. е. напряжения участков цепи пропорциональны величинам их сопротивлений.

Приемники электрической энергии, включенные последовательно, будут работать нормально, т. е. находиться под номинальным напряжением U_n , только в том случае, когда все они имеют один и тот же номинальный ток I_n , а напряжение источника питания равно сумме их номинальных напряжений. В этом случае приемники, имеющие большую номинальную мощность, будут находиться под большим напряжением, так как они будут иметь большее сопротивление.

Последовательно можно включать, в частности, одинаковые приемники, если напряжение источника равно произведению числа приемников на их номинальное напряжение.

Достоинство этой схемы — простота, наглядность, а ее недостаток в том, что она может быть использована лишь при соблюдении отмеченных условий и что при выходе из строя одного приемника прекращается работа всех приемников. Поэтому применяется она сравнительно редко.

Параллельное соединение. Параллельным называется такое соединение, при котором все включенные в цепь сопротивления находятся под одним и тем же напряжением (рис. 2.6).

Сопротивления в этом случае присоединены к двум узлам

цепи, и на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что общий ток цепи равен сумме токов отдельных ветвей, т. е.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или

$$\frac{U}{r} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3},$$

откуда

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}. \quad (2.15)$$

Таким образом, три сопротивления цепи можно заменить одним эквивалентным

$$r = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3}, \quad (2.16)$$

а в случае, когда параллельно включены два сопротивления,

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (2.17)$$

Из соотношения (2.15) следует, что общая проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g = g_1 + g_2 + g_3. \quad (2.18)$$

По мере роста числа включенных сопротивлений проводимость цепи будет возрастать, а ее общее сопротивление — уменьшаться. Если параллельно включено n одинаковых сопротивлений, то общее сопротивление будет равно одному из них, деленному на n .

Напряжение цепи можно представить как

$$U = Ir = I_1 r_1 = I_2 r_2 = I_3 r_3.$$

Отсюда, например, следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1}, \quad (2.19)$$

т. е. ток цепи распределяется между ветвями обратно пропорционально их сопротивлениям.

Нормально работают по этой схеме приемники любой мощности, рассчитанные на одно и то же номинальное напряжение. Причем включение или отключение одного, а также нескольких приемников не отражается на работе остальных приемников. Это обуславливает высокую надежность и гибкость схемы параллельного соединения. Поэтому в электротехнике она является основной схемой.

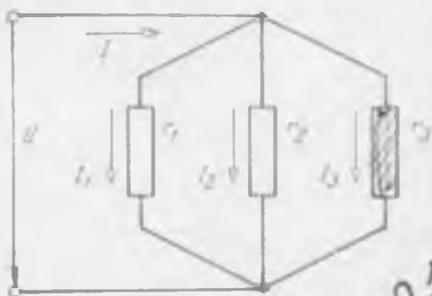


Рис. 26

217

Смешанное соединение. Смешанным называется такое соединение, при котором в цепи имеются параллельно и последовательно включенные сопротивления (рис. 2.7).

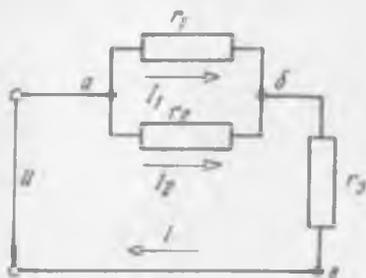


Рис. 2.7

Эквивалентное сопротивление равно в этом случае сумме сопротивлений отдельных последовательно включенных участков цепи. Для цепи рис. 2.7

$$r = r_{a\delta} + r_{\delta e} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} + r_3. \quad (2.20)$$

Напряжения и токи сопротивлений определяются на основании соотношений для последовательного и параллельного соединений.

Включение приемников по этой схеме осуществляют крайне редко, лишь тогда, когда ни параллельное, ни последовательное соединения не дают возможности обеспечить нормальное питание приемников от источника, которым располагают.

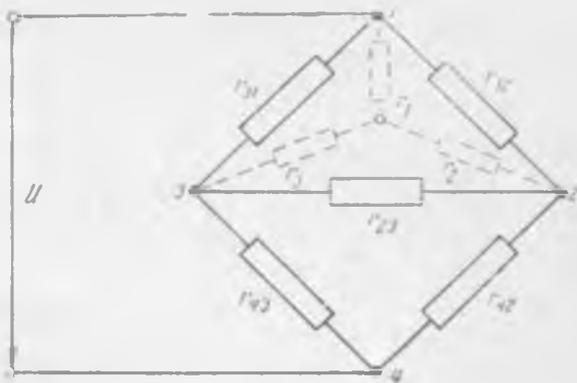


Рис. 2.8

Соединения сопротивлений по схемам треугольника и звезды. Во многих случаях сопротивления оказываются соединенными по более сложным схемам, чем последовательное, параллельное или смешанное соединения. Определить общее сопротивление в них можно после их соответствующего преобразования. Изображенная на рис. 2.8 так называемая мостовая схема является простейшим примером таких цепей. В ней сопротивления r_{12} , r_{23} , r_{42} , присоединенные одними концами к узлу 2, составляют трехлуче-

вую звезду или, как говорят, соединены звездой. То же самое можно сказать и о сопротивлениях r_{31} , r_{23} , r_{43} , присоединенных к узлу 3.

Сопротивления r_{12} , r_{23} , r_{31} или r_{23} , r_{42} , r_{43} составляют треугольники — соединены треугольником.

Общее сопротивление этой схемы можно определить только после замены одного из треугольников, например треугольника r_{12} , r_{23} , r_{31} , звездой r_1 , r_2 , r_3 (рис. 2.9), что приводит к схеме смешанного соединения сопротивлений. Такая замена будет эквивалентной, если она не вызывает изменения токов всех остальных элементов цепи. Это имеет место при условии, что сопротивления (проводимости) между двумя любыми вершинами треугольника и звезды одинаковы, т. е.

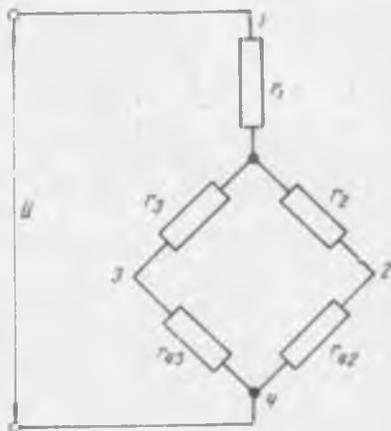


Рис. 2.9

$$\begin{aligned} \frac{r_{12}(r_{23} + r_{31})}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} &= r_1 + r_2, \\ \frac{r_{23}(r_{31} + r_{12})}{r_{23} + r_{31} + r_{12}} &= r_2 + r_3, \\ \frac{r_{31}(r_{12} + r_{23})}{r_{31} + r_{12} + r_{23}} &= r_3 + r_1. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Решая эти уравнения относительно сопротивлений звезды, получим:

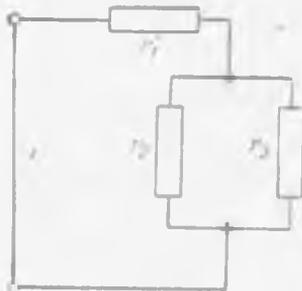
$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{r_{12} \cdot r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}, \\ r_2 &= \frac{r_{12} \cdot r_{23}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}, \\ r_3 &= \frac{r_{23} \cdot r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Для замены звезды эквивалентным треугольником уравнения (2.21) следует решить относительно сопротивлений треугольника, что даст соотношения:

$$\begin{aligned} r_{12} &= r_1 + r_2 + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_3}, \\ r_{23} &= r_2 + r_3 + \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1}, \\ r_{31} &= r_3 + r_1 + \frac{r_3 \cdot r_1}{r_2}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Из соотношений (2.22) и (2.23) следует, что в случае равенства сопротивлений исходной схемы сопротивления эквивалентной схемы также будут одинаковыми, причем сопротивления звезды будут в три раза меньше сопротивлений треугольника.

Задачи. 2.5. В цепь включены три сопротивления по 30 ом каждое. К цепи приложено напряжение 45 в. Определить эквивалентное сопротивление цепи, ее ток и токи каждого сопротивления при их последовательном, параллельном и смешанном соединении по схемам рис. 2.10, а и б.



Решение. Последовательное соединение: эквивалентное сопротивление

$$r = 3r_1 = 3 \cdot 30 = 90 \text{ ом};$$

ток цепи и сопротивлений

$$I = \frac{U}{r} = \frac{45}{90} = 0,5 \text{ а.}$$

Параллельное соединение: эквивалентное сопротивление цепи

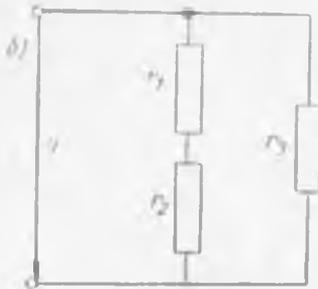
$$r = \frac{r_1}{3} = \frac{30}{3} = 10 \text{ ом},$$

ток цепи

$$I = \frac{U}{r} = \frac{45}{10} = 4,5 \text{ а};$$

ток сопротивлений

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{45}{30} = 1,5 \text{ а.}$$



Смешанное соединение по схеме рис. 2.10, а:
эквивалентное сопротивление

Рис. 2.10

$$r = r_1 + \frac{r_2 \cdot r_3}{r_2 + r_3} = 30 + \frac{30 \cdot 30}{30 + 30} = 45 \text{ ом};$$

ток цепи и сопротивления r_1

$$I = \frac{U}{r} = \frac{45}{45} = 1 \text{ а.}$$

токи сопротивлений r_2 и r_3

$$I_2 = \frac{I}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ а.}$$

Смешанное соединение по схеме рис. 2.10, б:
эквивалентное сопротивление

$$r = \frac{(r_1 + r_2) r_3}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{(30 + 30) 30}{30 + 30 + 30} = 20 \text{ ом};$$

ток цепи

$$I = \frac{U}{r} = \frac{45}{20} = 2,25 \text{ а;}$$

ток сопротивлений r_1 и r_2

$$I_1 = \frac{U}{r_1 + r_2} = \frac{45}{30 + 30} = 0,75 \text{ а;}$$

ток сопротивления r_3

$$I_3 = \frac{U}{r_3} = \frac{45}{30} = 1,5 \text{ а.}$$

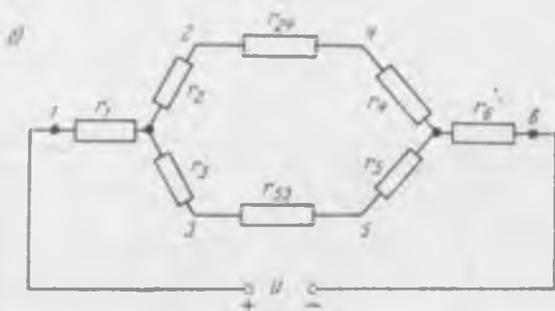
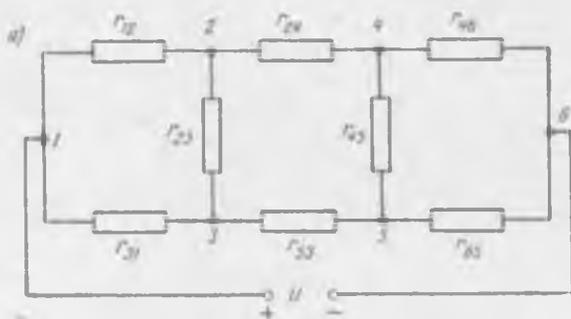


Рис. 211

2.6. Определить эквивалентное сопротивление и общий ток цепи рис. 2.11, а, если $U=128$ в, $r_{12}=30$ ом, $r_{23}=r_{31}=10$ ом, $r_{24}=5$ ом, $r_{32}=4$ ом, $r_{45}=r_{35}=r_{56}=12$ ом.

Решение. Для определения эквивалентного сопротивления цепи треугольники сопротивлений $r_{12}r_{23}r_{31}$ и $r_{45}r_{46}r_{56}$ заменяем эквивалентными звездами. Сопротивления звезды, эквивалентной первому треугольнику,

$$r_1 = \frac{r_{12} \cdot r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} = \frac{30 \cdot 10}{30 + 10 + 10} = 6 \text{ ом,}$$

$$r_2 = \frac{r_{12} \cdot r_{23}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} = \frac{30 \cdot 10}{50} = 6 \text{ ом, } r_3 = \frac{r_{31} \cdot r_{23}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} = \frac{10 \cdot 10}{50} = 2 \text{ ом.}$$

Сопrotивления звезды, эквивалентной второму треугольнику, будут равны $1/3$ одного сопротивления второго треугольника

$$r_4 = r_5 = r_6 = \frac{1}{3} \cdot 12 = 4 \text{ ом.}$$

Замена треугольников эквивалентными звездами позволяет перейти от схемы рис. 2.11, а к схеме рис. 2.11, б со смешанным соединением сопротивлений. Общее сопротивление этой схемы

$$r = r_1 + \frac{(r_2 + r_{24} + r_4)(r_3 + r_{33} + r_5)}{r_2 + r_{24} + r_4 + r_3 + r_{33} + r_5} + r_6 = 6 + \frac{(6 + 5 + 4)(2 + 4 + 4)}{25} + 4 = 16 \text{ ом.}$$

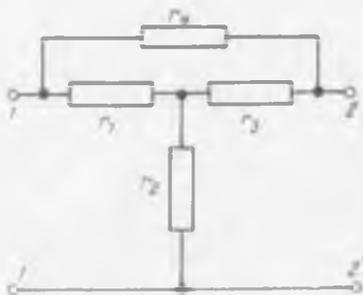


Рис. 2.12

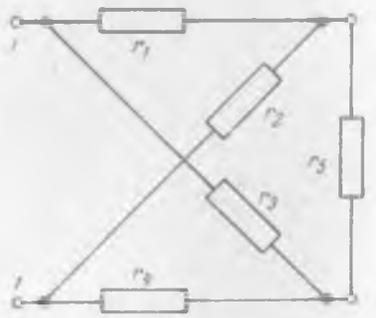


Рис. 2.13

Ток цепи

$$I = \frac{U}{r} = \frac{128}{16} = 8 \text{ а.}$$

2.7. Определить эквивалентное сопротивление цепи рис. 2.12 по отношению к зажимам 1—1' при разомкнутых и замкнутых зажимах 2—2', если $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 4 \text{ ом.}$

Ответ: 6,66 и 2,4 ом.

2.8. Определить эквивалентное сопротивление цепи рис. 2.13 для случаев, когда $r_1 = r_3 = 15 \text{ ом; } r_2 = r_4 = 5 \text{ ом; } r_5 = \infty, 0 \text{ и } 15 \text{ ом.}$

Ответ: 10; 10 и 10 ом.

2.9. По данным задачи 2.6 определить токи всех сопротивлений схемы рис. 2.11, а.

Ответ: 2,24; 5,76; 0,96; 3,2; 4,8; 0,53; 3,73; 4,27 а.

Вопросы для самопроверки

Какое соединение сопротивлений называется последовательным?

Чему равно эквивалентное сопротивление цепи с последовательно включенными сопротивлениями?

Как распределяется общее напряжение между отдельными сопротивлениями в этой схеме?

При каких условиях применяется последовательное включение сопротивлений (приемников)?

- Какое соединение сопротивлений называется параллельным?
 Как определить для него эквивалентное сопротивление и эквивалентную проводимость?
 Как распределяется общий ток между параллельно включенными сопротивлениями?
 При каких условиях можно включать параллельно приемники электрической энергии?
 Почему схема параллельного включения приемников является основной?
 Какое соединение сопротивлений называется смешанным?
 Как определить для него эквивалентное сопротивление?
 Как определить напряжения и токи отдельных сопротивлений при их смешанном включении?
 Когда применяется эта схема включения сопротивлений?
 Какие соединения сопротивлений представляют треугольник и звезду сопротивлений?
 Как осуществить замену треугольника эквивалентной звездой и обратную замену?

§ 2.3. Замена нескольких источников одним эквивалентным. Метод двух узлов

Источники электрической энергии, так же как и приемники, могут быть включены последовательно, параллельно и смешанно.

Первый способ включения применяется тогда, когда требуется создать напряжение, большее номинального напряжения одного источника, а рабочий ток цепи — меньше номинального тока источника или равен ему.

Во втором способу соединения прибегают, если номинальный ток одного источника меньше рабочего тока цепи и номинальное напряжение источника равно требуемому напряжению (или больше его).

По третьему способу соединяют источники, номинальное напряжение и номинальный ток которых меньше рабочего напряжения и тока приемников. Например, любым из этих способов могут быть включены аккумуляторы.

Расчет цепей, содержащих последовательно, параллельно или смешанно включенные источники, можно во многих случаях упростить, определив э. д. с. и внутреннее сопротивление эквивалентного источника. Рассмотрим, как это можно выполнить.

На рис. 2.14, *a* показана цепь, питание которой осуществляется тремя источниками, соединенными последовательно. На основании второго закона Кирхгофа для нее можно записать

$$E_1 + E_2 + E_3 = I(r_{10} + r_{20} + r_{30} + r),$$

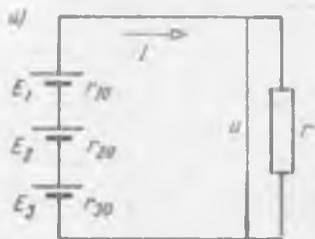
откуда

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{10} + r_{20} + r_{30} + r} = \frac{E_3}{r_3 + r}. \quad (2.24)$$

Таким образом, э. д. с. E_3 и внутреннее сопротивление r_3 эквивалентного источника равны соответственно сумме э. д. с. и внутренних сопротивлений последовательно включенных источников. На основании этого схему рис. 2.14, а можно заменить эквивалентной схемой 2.14, б.

Из второго закона Кирхгофа следует, что напряжение на зажимах источников будет равно

$$U = E_1 + E_2 + E_3 - I(r_{10} + r_{20} + r_{30}) \quad \text{или} \quad U = E_3 - Ir_3. \quad (2.25)$$



Если последовательно включены n одинаковых источников, то

$$E_3 = nE, \quad r_3 = nr_0. \quad (2.26)$$

Источники включают, как правило, согласно, т. е. так, что их э. д. с. действует в одном направлении. Но в некоторых случаях э. д. с. цепи оказываются направленными встречно (рис. 2.15). Это имеет место при зарядке ак-

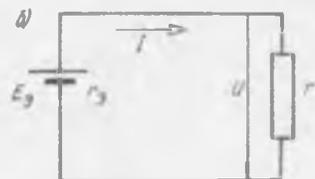


Рис. 2.14

Рис. 2.15

кумуляторов, при работе электродвигателей, а также в случае, когда от параллельно включенных источников отсоединена нагрузка. Для цепи рис. 2.15 можно записать

$$E_1 - E_2 = Ir_{10} + Ir_{20} \quad (2.27)$$

или

$$E_1 - Ir_{10} = E_2 + Ir_{20} = U, \quad (2.28)$$

т. е. напряжение U , одинаковое для обоих аккумуляторов, меньше э. д. с. E_1 первого аккумулятора на величину потери напряжения внутри него и больше э. д. с. E_2 второго аккумулятора также на величину потери напряжения в нем. Из уравнения (2.27) следует, что ток в цепи будет протекать только при неравенстве э. д. с. E_1 и E_2 . Этот уравнительный ток (уравнивает напряжения на зажимах аккумуляторов) протекает в направлении большей э. д. с. При этом будут иметь место соотношения:

$$\begin{aligned} UI &= E_1 I - I^2 r_{10}; \\ UI &= E_2 I + I^2 r_{20}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Смысл их состоит в том, что мощность (UI), которую отдает первый аккумулятор, поступает полностью во второй аккумулятор. Причем равна она разности между мощностью (E_1I), развиваемой первым аккумулятором, и мощностью тепловых потерь в нем (I^2r_{10}). Во втором аккумуляторе сообщаемая ему мощность частично расходуется в виде мощности тепловых потерь (I^2r_{20}) и частично преобразуется в мощность химического процесса (E_2I), приводящего к накоплению энергии

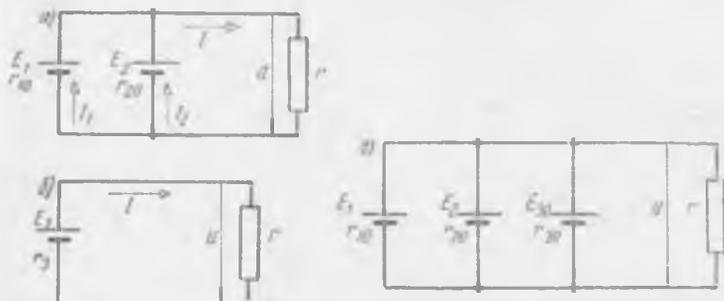


Рис. 2.16

в аккумуляторе. Следовательно, первый аккумулятор работает в режиме источника (разряжается), а второй — является приемником энергии (заряжается).

На рис. 2.16, а приведена схема параллельного включения источников. Для получения этой схемы необходимо, чтобы все положительные зажимы источников были присоединены к одному, а все их отрицательные зажимы — к другому узлу цепи. Э. д. с. и сопротивление эквивалентного источника (рис. 2.16, б) могут быть определены исходя из следующего: на основании первого закона Кирхгофа для цепи рис. 2.16, а будем иметь соотношение $I = I_1 + I_2$, а из второго закона Кирхгофа следует, что

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 - U}{r_{10}} = (E_1 - U) g_1; \\ I_2 &= \frac{E_2 - U}{r_{20}} = (E_2 - U) g_2; \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

и вообще

$$I_k = (E_k - U) g_k. \quad (2.31)$$

Следовательно,

$$I = \sum_{k=1}^n E_k g_k - U \sum_{k=1}^n g_k, \quad (2.32)$$

где n — число ветвей, содержащих э. д. с.

Для схемы рис. 2.16, б

$$I = E_a g_a - U g_a, \quad (2.33)$$

здесь

$$g_a = \frac{1}{r_a}.$$

Токи выражений (2.32) и (2.33) будут в любом случае равны, если имеют место тождества:

$$\left. \begin{aligned} U \sum_{k=1}^n g_k &= U g_a; \\ \sum_{k=1}^n E_k g_k &= E_a g_a, \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} g_a &= \sum_{k=1}^n g_k, \\ E_a &= \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Из этих соотношений следует, что проводимость g_a эквивалентного источника зависит только от проводимостей в ветвях отдельных источников, причем определяется g_a , как и при параллельном соединении одних сопротивлений. В то же время эквивалентная э.д.с. E_a зависит от значения э.д.с. ветвей и их проводимостей.

Цепи рис. 2.16, а и б эквивалентны только по току и напряжению нагрузки (сопротивления r), но не эквивалентны в отношении мощности, выделяющейся в источниках. В частности, в источниках схемы рис. 2.16, а могут протекать токи и выделяться мощности и тогда, когда нагрузка отключена, что невозможно в схеме рис. 2.16, б.

Ранее отмечалось, что при параллельном включении источников их э.д.с. направлены к одному узлу. Если же какая-нибудь э.д.с. будет иметь противоположное направление, то ее нужно подставить в формулу (2.35) со знаком минус.

Выражение (2.32) можно записать в виде

$$U g = \sum_{k=1}^n E_k g_k - U \sum_{k=1}^n g_k, \quad (2.36)$$

где g — проводимость нагрузки. В общем случае g представляет проводимость всех ветвей, не имеющих э.д.с.

Таким образом, напряжение на параллельно включенных ветвях цепи

$$U = \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k + g}. \quad (2.37)$$

Напряжение это равно э.д.с. источника, эквивалентного всем параллельно включенным ветвям цепи, содержащим и не содержащим э.д.с. Проводимость такого источника равна сумме проводимостей всех ветвей.

Подсчитав по формуле (2.37) напряжение ветвей схемы рис. 2.16, а, можно далее на основании соотношений (2.30) и (2.31) определить токи ветвей. Такой метод расчета цепей носит название метода двух узлов. Он является частным случаем более общего метода узловых потенциалов.

Из второго закона Кирхгофа для цепи рис. 2.16, а следует, что

$$E_1 - E_2 = I_1 r_{10} - I_2 r_{20} = I_1 r_{10} - (I - I_1) r_{20}$$

или

$$I_1 = \frac{E_1 - E_2}{r_{10} + r_{20}} + I \frac{r_{20}}{r_{10} + r_{20}}. \quad (2.38)$$

Аналогично

$$I_2 = \frac{E_2 - E_1}{r_{10} + r_{20}} + I \frac{r_{10}}{r_{10} + r_{20}}. \quad (2.39)$$

Соотношения (2.38) и (2.39) указывают на то, что при отсутствии нагрузки ($I=0$) через источники будет протекать уравнивающий ток

$$\frac{E_1 - E_2}{r_{10} + r_{20}}.$$

Этот ток будет равен нулю, если равны между собой э. д. с. источников. В этом случае ток нагрузки распределяется между источниками обратно пропорционально их внутренним сопротивлениям.

При смешанном соединении источников (например, в аккумуляторных батареях) э.д.с. и внутреннее сопротивление эквивалентного источника можно определить на основании соотношений, полученных для последовательного и параллельного соединений источников.

Задачи. 2.10. Определить э. д. с. и внутреннее сопротивление эквивалентного источника цепи рис. 2.14 а, а также ток цепи, напряжения на зажимах отдельных источников и эквивалентного источника. Э. д. с. источников $E_1=30$ в, $E_2=12$ в, $E_3=8$ в, а их внутренние сопротивления $r_{10}=0,25$ ом, $r_{20}=0,25$ ом, $r_{30}=0,5$ ом; сопротивление $r=24$ ом.

Решение. Э. д. с. эквивалентного источника

$$E_0 = E_1 + E_2 + E_3 = 30 + 12 + 8 = 50 \text{ в.}$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного источника

$$r_0 = r_{10} + r_{20} + r_{30} = 0,25 + 0,25 + 0,5 = 1 \text{ ом.}$$

Общее сопротивление цепи

$$r_1 = r_0 + r = 1 + 24 = 25 \text{ ом}$$

Ток цепи

$$I = \frac{E_0}{r_1} = \frac{50}{25} = 2 \text{ а.}$$

Напряжения на зажимах источников:

$$U_1 = E_1 - I r_{10} = 30 - 2 \cdot 0,25 = 29,5 \text{ в;}$$

$$U_2 = E_2 - I r_{20} = 12 - 2 \cdot 0,25 = 11,5 \text{ в;}$$

$$U_3 = E_3 - I r_{30} = 8 - 2 \cdot 0,5 = 7 \text{ в.}$$

Напряжение на зажимах эквивалентного источника (на сопротивлении r)

$$U = E_0 - I r_0 = 50 - 2 \cdot 1 = 48 \text{ в.}$$

2.11. Определить э. д. с. и внутреннее сопротивление эквивалентного источника цепи рис. 2.16, в, а также ток цепи, токи отдельных источников и напряжение U цепи, если $E_1=25$ в, $E_2=35$ в, $E_3=30$ в, $r_{10}=0,5$ ом, $r_{20}=0,25$ ом, $r_{30}=0,5$ ом, $r=3$ ом.

Решение. Э. д. с. эквивалентного источника

$$E_0 = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{25 \cdot 2 + 35 \cdot 4 + 30 \cdot 2}{2 + 4 + 2} = 31,25 \text{ в.}$$

Проводимость эквивалентного источника

$$g_0 = g_1 + g_2 + g_3 = 2 + 4 + 2 = 8 \text{ сим}$$

и его сопротивление

$$r_0 = \frac{1}{g_0} = \frac{1}{8} = 0,125 \text{ ом.}$$

Сопротивление цепи

$$r_1 = r_0 + r = 0,125 + 3 = 3,125 \text{ ом.}$$

Ток цепи

$$I = \frac{E_0}{r_1} = \frac{31,25}{3,125} = 10 \text{ а.}$$

Напряжение на элементах цепи

$$U = E_0 - I r_0 = 31,25 - 10 \cdot 0,125 = 30 \text{ в.}$$

Токи источников:

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{r_{10}} = \frac{25 - 30}{0,5} = -10 \text{ а,}$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{r_{20}} = \frac{35 - 30}{0,25} = 20 \text{ а,}$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U}{r_{30}} = \frac{30 - 30}{0,5} = 0.$$

Как как I_1 имеет отрицательное значение, то это говорит о том, что ток протекает навстречу э. д. с. E_1 .

2.12. Определить эквивалентную э. д. с. E_0 и э. д. с. E_3 цепи рис. 2.14, а, если $r=20$ ом, $U=40$ в, $E_1=15$ в, $E_2=10$ в, а суммарное внутреннее сопротивление источников $r_0=1$ ом.

Ответ: $E_3=42$ в, $E_3=17$ в.

2.13. Задачу 2.11 решить методом двух узлов.

2.14. Определить уравнивающие токи источников задачи 2.11 при отключенном сопротивлении r .

Ответ: $I_1=-12,5$ а, $I_2=15$ а, $I_3=-2,5$ а.

Вопросы для самопроверки

Как определить э. д. с. и внутреннее сопротивление эквивалентного источника при последовательном соединении нескольких источников?

Чему равна э. д. с. и внутреннее сопротивление эквивалентного источника при параллельном включении нескольких источников?

В чем заключается сущность метода двух узлов?

В каком случае через параллельно включенные источники будет протекать уравнивающий ток?

Как распределяется ток нагрузки между отдельными параллельно включенными источниками при равенстве их э. д. с.?

Как определить эквивалентную э. д. с. и сопротивление при смешанном соединении нескольких источников?

§ 2.4. Передача энергии от источников к приемникам.

Сечение соединительных проводов. Предохранители

Связующим звеном между источниками и приемниками электрической энергии являются соединительные провода. Соединительные провода большой длины — линии электропередач — оказывают на работу приемников существенное влияние, которое приходится учитывать на практике при эксплуатации электроустановок.

На рис. 2.17 показана схема электроснабжения:

E_0 — эквивалентная э. д. с. источников;

r_2 — эквивалентное сопротивление приемников;

r_1 — сопротивление линии передачи.

Будем считать, что сопротивление линии r_1 и напряжение в начале ее U_1 величины постоянные, а сопротивление приемников r_2 изменяется от ∞ до 0. Выясним, как будет изменяться при этом ток цепи I , потеря напряжения в линии ΔU , напряжение U_2 на приемниках (в конце линии), мощность P_1

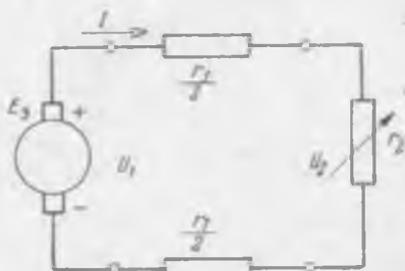


Рис. 2.17

в начале линии, потеря мощности ΔP в линии, мощность P_2 приемников и коэффициент полезного действия линии η .

Общее сопротивление цепи рис. 2.17

$$r = r_1 + r_2,$$

и для нее справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U_1}{r_1 + r_2}; \\ \Delta U &= Ir_1 = U_1 - U_2; \\ U_2 &= U_1 - \Delta U = Ir_2; \\ P_1 &= U_1 I = I^2 r; \\ \Delta P &= \Delta U \cdot I = I^2 r_1; \\ P_2 &= U_2 I = I^2 r_2 = P_1 - \Delta P; \\ \eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{r_2}{r_2 + r_1}. \end{aligned} \quad (2.40)$$

При $r_2 = \infty$ (конец линии разомкнут) имеет место холостой ход линии. В этом режиме $r = \infty$; $I = 0$; $\Delta U = 0$;

$$U_2 = U_1; P_1 = \Delta P = P_2 = 0; \eta = 1.$$

При $r_2 = 0$ (конец линии замкнут накоротко) наступает короткое замыкание линии, для которого

$$\begin{aligned} r &= r_1; I = \frac{U_1}{r_1} = I_{\text{макс}}; \\ \Delta U &= U_1; U_2 = 0; P_1 = U_1 I_{\text{макс}} = P_{1\text{макс}}; \\ \Delta P &= P_{1\text{макс}}; P_2 = 0; \eta = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, и в случае холостого хода и при коротком замыкании мощность приемников P_2 равна нулю, так как в первом режиме $I = 0$, а во втором — $U_2 = 0$.

Очевидно, что мощность будет поступать в приемники, когда U_2 и I не равны нулю. При некоторых их значениях она будет максимальной. Установим условие получения этой максимальной мощности приемников. Мощность

$$P_2 = I^2 r_2 = \left(\frac{U_1}{r_1 + r_2} \right)^2 r_2. \quad (2.41)$$

В правую часть выражения (2.41) входит только одна переменная — r_2 . Взяв производную $\frac{dP_2}{dr_2}$ и приравняв ее к нулю, получим, что условием возникновения $P_{2\text{макс}}$ является равенство сопротивлений приемников и линии, т. е.

$$r_2 = r_1. \quad (2.42)$$

Для такого режима характерны следующие соотношения:

$$\begin{aligned} r &= 2r_1 = 2r_2; I = \frac{U_1}{2r_1} = \frac{I_{\text{макс}}}{2}; \Delta U = U_2 = \frac{U_1}{2}; \\ \Delta P &= P_{2\text{макс}} = \frac{P_{1\text{макс}}}{4}; P_1 = \frac{P_{1\text{макс}}}{2}; \eta = 0,5. \end{aligned}$$

Выбор сопротивления нагрузки r_2 , равного сопротивлению линии r_1 , называется согласованием нагрузки. К.п.д. передачи составляет при этом только 50%, поэтому такой режим допустим лишь для линий небольшой мощности (линии связи), когда потери мощности не имеют существенного значения. В таком режиме работают также устройства, подключаемые к различным датчикам (например, терморезисторам).

Максимальный к.п.д. ($\eta=1$) соответствует холостому ходу линии электропередач, когда

$$r_2 \gg r_1. \quad (2.43)$$

Это означает, что при заданном напряжении и сопротивлении нагрузки к.п.д. линии будет тем больше, чем меньше ее сопротивление.

Одна и та же мощность нагрузки $P_2=U_2I$ может быть получена при большем напряжении и меньшем токе и, наоборот, при меньшем напряжении и большем токе. Причем большему напряжению будет соответствовать более высокий к.п.д. линии. Это видно из следующего: напряжению U_2 соответствует ток I и потеря мощности в линии $\Delta P=I^2r_1$; в два раза большему напряжению $2U_2$ будет соответствовать ток $\frac{I}{2}$ и потеря мощности $\frac{I^2r_1}{4}$, т. е. при двукратном увеличении напряжения она уменьшается в четыре раза. Следовательно, увеличение напряжения линии при одной и той же передаваемой мощности приводит к росту ее к.п.д. Устройство линий сравнительно небольшого сопротивления и передача энергии по ним под высоким напряжением обеспечивает к.п.д. линий в пределах 0,94—0,97.

Для нормальной работы соединительных проводов (линий передач) большое значение имеет правильный выбор их сечения. К сечению предъявляются следующие основные требования: оно не должно быть завышенным, т. е. не должен иметь место перерасход проводникового материала, и в то же время сечение проводов не должно быть заниженным, ибо это может привести, во-первых, к перегреву проводов, их изоляции и, во-вторых, к большим потерям напряжения и мощности — к снижению к.п.д. передачи. В связи с этим сечение проводов выбирают таким, чтобы оно обеспечивало потерю напряжения в пределах допустимых норм и не приводило бы к тепловому повреждению проводов.

Потеря напряжения в двухпроводной линии (см. рис. 2.17) может быть представлена так:

$$\Delta U = Ir_1 = I\varrho \frac{2l}{a}, \quad (2.44)$$

где ρ — удельное сопротивление проводов;
 l — длина одного провода;
 s — сечение провода;
 I — ток линии.
 Таким образом,

$$s = \frac{2\rho l I}{\Delta U}. \quad (2.45)$$

Из формулы (2.45) видно, что сечение проводов обратно пропорционально величине потери напряжения ΔU .

При расчетах и анализах работы линий различных напряжений используют понятие относительной потери напряжения

$$e = \frac{\Delta U}{U_1} 100 (\%). \quad (2.46)$$

Допустимая относительная потеря напряжения задается в пределах (3—7) %, причем меньшее значение ее соответствует линиям высокого напряжения.

Принимая во внимание соотношение (2.46), можно записать, что

$$s = \frac{200\rho l I}{e U_1} = \frac{200\rho l P_1}{e U_1^2}. \quad (2.47)$$

Откуда следует, что при заданной мощности P_1 сечение проводов линий обратно пропорционально допустимой потере напряжения e и квадрату напряжения U_1 . Это обуславливает выгодность передачи электрической энергии высокого напряжения.

Подсчитанное по формуле (2.47) сечение проводов проверяется затем на их нагрев в соответствии с допустимым для каждого типа проводов током (приложения 3 и 4).

С определением оптимального сечения проводов тесно связан выбор плавких предохранителей, предназначенных для защиты источников и приемников электрической энергии от теплового действия токов короткого замыкания.

Плавкий предохранитель представляет собой элемент цепи с искусственно пониженной термостойкостью в сравнении со всеми остальными ее звеньями. Пониженную термостойкость имеет токоведущая часть предохранителя — плавкая вставка. Это одна или несколько проволок (например, медных) или же пластинка из материала с сравнительно большим удельным сопротивлением и небольшой температурой плавления (чаще всего сплав олова и свинца). В первом случае пониженная термостойкость вставки обеспечивается за счет ее малого сечения, во втором — за счет относительно большого удельного сопротивления и низкой температуры плавления.

При появлении токов короткого замыкания плавкая вставка расплавляется (перегорает), что приводит к отключению поврежденного устройства от источника питания. Для того чтобы при перегорании предохранителя не разбрызгивался расплавленный металл вставки, она помещается в защитный кожух, выполненный из изоляционных материалов (фарфор, стекло, пластмассы). Кроме того, на кожухе закрепляются контакты, посредством которых плавкая вставка включается в цепь. По конструкции защитного кожуха предохранители бывают типа пробок, широко применяемых в бытовых электросетях, и трубчатые, используемые в бытовых и промышленных электроустановках.

Трубчатые кожухи некоторых типов предохранителей изготавливаются из материалов (пластмассы), которые разлагаются под действием электрической дуги с выделением большого количества газов. Это способствует быстрому гашению дуги. Для этой же цели трубки предохранителей иногда заполняют кварцевым песком.

Предохранители характеризуют двумя основными величинами — номинальным напряжением U_n и номинальным током I_n . Номинальное напряжение предохранителя должно быть не меньше рабочего напряжения электроустановки, т. е.

$$U_n \geq U_p. \quad (2.48)$$

При несоблюдении этого условия после перегорания плавкой вставки может произойти перекрытие изоляции между ее контактами.

Предохранитель должен быть выбран так, чтобы его номинальный ток соответствовал величине и характеру изменений тока защищаемого устройства. Если ток электроустановки не превышает величину длительно допустимого значения при всех возможных режимах ее работы, номинальный ток предохранителя должен быть равен номинальному току установки

$$I_n = I_{н. \text{ уст.}} \quad (2.49)$$

Для защиты устройств, в которых возможны кратковременные токи, превышающие номинальное значение (например, пусковые токи электродвигателей), номинальный ток предохранителя выбирается исходя из максимального тока. Опытным путем установлено, что электродвигатели надежно защищаются предохранителями с номинальным током, составляющим 40% от их пускового тока, т. е.

$$I_n = 0,4 I_{\text{пуск.}} \quad (2.50)$$

Шкала номинальных токов плавких вставок предохранителей приведена в приложении 5.

Задачи. 2.15. К. п. д. линии передач составляет 95%. К ней подклюе- ны приемники, общее сопротивление которых $r_2=19$ ом, а их напряжение $U_2=190$ в. Определить I , ΔU , U_1 , P_2 , ΔP , P_1 , r_1 .

Решение. Ток линии

$$I = \frac{U_2}{r_2} = \frac{190}{19} = 10 \text{ а}$$

Мощность приемников

$$P_2 = U_2 I = 190 \cdot 10 = 1900 \text{ вт.}$$

К. п. д. линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{r_2}{r_2 + r_1},$$

откуда

$$r_1 = \frac{1 - \eta}{\eta} r_2 = \frac{1 - 0,95}{0,95} \cdot 19 = 1 \text{ ом.}$$

Потеря напряжения

$$\Delta U = I r_1 = 10 \cdot 1 = 10 \text{ в.}$$

Потеря мощности

$$\Delta P = I^2 r_1 = 10^2 \cdot 1 = 100 \text{ вт.}$$

Напряжение в начале линии

$$U_1 = \Delta U + U_2 = 10 + 190 = 200 \text{ в.}$$

Подводимая к линии мощность

$$P_1 = U_1 I = 200 \cdot 10 = 2000 \text{ вт.}$$

2.16. Определить сечение медных проводов кабельной линии протяжен- ностью $l=70$ м, если мощность подключенных к ней приемников $P_2=2500$ вт, их напряжение $U_2=100$ в и потеря напряжения в линии должна составить $\Delta U=7$ в. Подобрать предохранители с учетом того, что ток нагрузки не превышает номинальное значение.

Решение. Ток линии

$$I = \frac{P_2}{U_2} = \frac{2500}{100} = 25 \text{ а.}$$

Сечение проводов

$$s = \frac{2\rho l I}{\Delta U} = \frac{2 \cdot 0,0175 \cdot 70 \cdot 25}{7} = 8,75 \text{ мм}^2.$$

Этому соответствует ближайшее большее стандартное сечение 10 мм^2 с допустимым током 25 а (приложение 4).

Току 25 а соответствует предохранитель с номинальным током 25 а (приложение 5).

2.17. К линии подводится напряжение $U_1=240$ в, ее сопротивление $r_1=$ $=6$ ом. Для значений сопротивления приемников $r_2=\infty, 34, 14, 6, 4, 2, 0$ ом определить I , U_2 , ΔU , P_2 , ΔP , P_1 , η . Построить графики зависимости всех величин от тока I .

2.18. По условиям задачи 2.16 определить относительную потерю на- пряжения в линии.

Ответ: 6,5%.

Каковы режимы работы линий электропередач?

При каком условии по линии передается максимальная мощность, каков при этом к. п. д. линии?

Как показать, что с ростом напряжения линии увеличивается ее к. п. д.?

Каков к. п. д. линий электропередач высокого напряжения?

Как определить необходимое сечение проводов линии?

Что представляет собой относительная допустимая потеря напряжения и каков диапазон ее значений?

Для чего предназначены плавкие предохранители?

Как выбрать плавкий предохранитель для защиты электроустановок с токами, непревосходящими и кратковременно превосходящими длительно допустимое значение?

§ 2.5. Методы расчета сложных электрических цепей

Ранее рассматривались электрические цепи, для которых характерно то, что их можно было заменить эквивалентной неразветвленной цепью, содержащей одну э.д.с. и одно сопротивление. Такие цепи условно будем называть простыми электрическими цепями. Их расчет выполняется на основании закона Ома и методов преобразования схем.

Однако могут иметь место такие электрические цепи, которые не поддаются замене эквивалентной простейшей цепью рассмотренными выше методами. Такие цепи можно назвать сложными электрическими цепями. Их расчет осуществляют специальными методами. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Расчет цепей на основании законов Кирхгофа. При расчете цепей по этому методу используют первый и второй законы Кирхгофа (см. § 2.1). Чаще всего расчет сводится к отысканию токов по известным э.д.с. и сопротивлениям схемы и его выполняют в такой последовательности:

а) намечают произвольные направления токов ветвей и, если цепь имеет n узлов, по первому закону Кирхгофа записывают $n-1$ уравнений, так как n -е уравнение является следствием предыдущих уравнений;

б) намечают произвольные направления обхода контуров и, если схема содержит m неизвестных токов, по второму закону Кирхгофа составляют $m-n+1$ уравнений. Контур при этом выбирают так, чтобы каждый из них содержал хотя бы одну ветвь, не учтенную в других контурах;

в) решают полученную систему m уравнений. Если значения некоторых токов получаются со знаком минус, то это значит, что их действительные направления противоположны первоначально намеченным.

Для схемы рис. 2.18 можно записать три уравнения по первому и три по второму закону Кирхгофа, например:

$$I_1 + I_3 - I_2 = 0;$$

$$I_2 + I_6 - I_5 = 0;$$

$$I_5 - I_3 - I_4 = 0;$$

$$E_1 - E_2 = I_1(r_{10} + r_1) + I_2(r_{20} + r_2) - I_6 r_6;$$

$$E_3 - E_2 = I_3(r_{30} + r_3) + I_2(r_{20} + r_2) + I_5 r_5;$$

$$E_4 = -I_4(r_{40} + r_4) - I_5 r_5 - I_6 r_6.$$

Рассмотренный метод расчета универсален, применим к схемам любой конфигурации. В этом его достоинство. Но ему присущ недостаток — необходимость решать систему уравнений, которая может быть очень громоздкой.

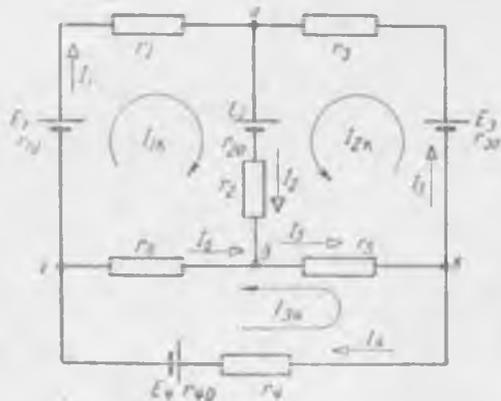


Рис. 2.18

Поэтому применяют другие методы расчета, позволяющие уменьшить или же вообще обойти эту трудность, в частности метод контурных токов, который также базируется на законах Кирхгофа.

Метод контурных токов. При расчете цепей по этому методу используют так называемые контурные токи. Это условные, расчетные токи. Считают, что они замыкаются через все элементы соответствующих контуров. Например, цепь рис. 2.18 имеет три контура: *абга*, *абва*, *бвгб*. И в ней можно наметить три контурных тока: $I_{1к}$, $I_{2к}$, $I_{3к}$, которые охватывают все участки цепи.

Расчет цепей по методу контурных токов выполняют в такой последовательности:

а) намечают произвольные направления контурных токов во всех контурах цепи;

б) намечают произвольные направления обхода контуров и для каждого из них составляют уравнение по второму закону Кирхгофа; при этом учитывают все э. д. с. и контурные токи, встречающиеся на участках каждого контура;

в) решают полученную систему уравнений, определяют контурные токи и по ним действительные токи ветвей I_1, \dots, I_6 . Для ветвей, по которым протекает только один какой-нибудь контурный ток (ветви ab, ag, bg), действительные токи равны соответствующим контурным токам. Для тех же ветвей, через которые замыкается несколько контурных токов (ветви ab, bg, ag), действительные токи равны в соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраической сумме контурных токов. Для цепи рис. 2.18 по методу контурных токов можно записать следующие три уравнения:

$$\begin{aligned} E_1 - E_2 &= I_{1к}(r_{10} + r_1 + r_{20} + r_2 + r_6) + I_{2к}(r_{20} + r_2) + I_{3к}r_6; \\ E_3 - E_2 &= I_{2к}(r_{30} + r_3 + r_{20} + r_2 + r_5) + I_{1к}(r_{20} + r_2) - I_{3к}r_5; \\ E_4 &= I_{3к}(r_{40} + r_4 + r_5 + r_6) + I_{1к}r_6 - I_{2к}r_5. \end{aligned}$$

Решение этой системы трех уравнений позволяет в конечном счете определить шесть действительных токов. При расчете той же цепи на основании законов Кирхгофа пришлось бы составлять и решать систему шести уравнений (три по первому и три по второму законам). Следовательно, в данном случае использование метода контурных токов позволяет сократить систему уравнений в два раза. Для других схем можно получить еще большее сокращение числа уравнений. Вообще метод контурных токов эффективен для расчета цепей, имеющих большое число узлов и сравнительно небольшое число контуров.

Метод наложения. Расчет по методу наложения основывается на принципе наложения. Сущность его в отношении электрических цепей заключается в том, что при наличии в линейной электрической цепи нескольких источников питания (рис. 2.19, а) действительные токи ветвей рассматривают как алгебраическую сумму токов, порождаемых в этих ветвях действием каждой э. д. с. в отдельности, т. е. считают, что действительные токи являются результатом наложения токов отдельных источников. Этот принцип имеет силу не только для линейных электрических цепей, но и вообще для всех линейных систем. Например, в механике он известен как принцип независимости сил.

Расчет цепи по методу наложения производят в следующем порядке:

а) в цепи поочередно оставляют только по одному источнику питания. При этом внутренние сопротивления исключаемых источников оставляют в цепи. Таким образом, полу-

чают расчетные схемы соответственно каждому источнику (рис. 2.19, б, в);

б) используя методы преобразования цепей, определяют общие сопротивления расчетных схем (см. § 2.2) и рассчитывают на основании закона Ома токи всех их ветвей;

в) определяют действительные токи ветвей суммированием (наложением) соответствующих токов расчетных схем с уче-

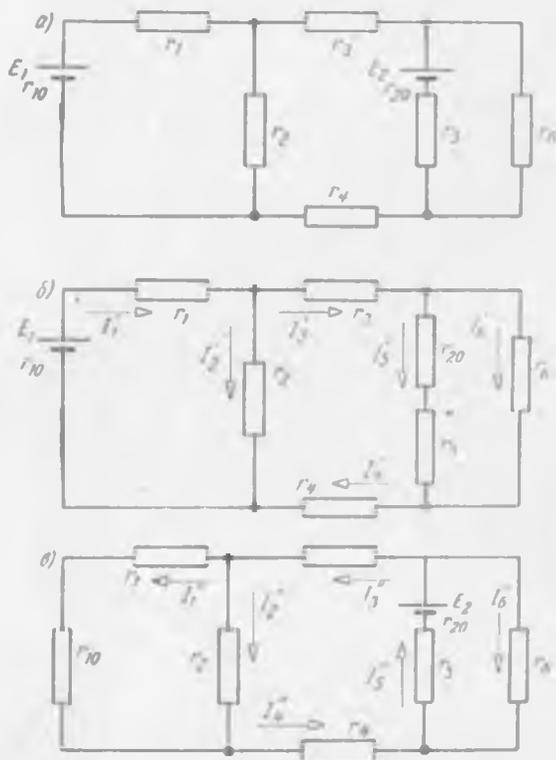


Рис. 2.19

том их направлений. Эти направления могут быть легко определены по направлениям э. д. с.

Сопоставляя схемы рис. 2.19, б и в, можно условно записать, что

$$\begin{aligned} I_1 &= I_1' - I_1''; & I_4 &= I_4' - I_4''; \\ I_2 &= I_2' + I_2''; & I_5 &= I_5' - I_5''; \\ I_3 &= I_3' - I_3''; & I_6 &= I_6' + I_6''. \end{aligned}$$

Направления действительных токов такие же, как у больших частных токов.

Достоинство этого метода в том, что он не требует решения системы уравнений, а его недостаток — непригодность для расчета нелинейных цепей. Эффективен этот метод для расчета цепей, содержащих небольшое число источников, и в особенности при анализе работы схем, в которых одна э. д. с. может принимать несколько значений.

Задачи. 2.19. Определить токи ветвей схемы рис. 2.20, если $E_1=24$ в, $E_2=42$ в, $r_{10}=r_{20}=1$ ом, $r_1=11$ ом, $r_2=17$ ом, $r_3=r_4=12$ ом, $r_5=r_6=6$ ом.

Задачу решить на основании законов Кирхгофа, методом контурных токов и методом наложения.

Решение. А. На основании законов Кирхгофа.

Намечаем указанные на схеме направления токов. По первому закону Кирхгофа для узлов a , b , v записываем уравнения:

$$\begin{aligned} I_2 - I_1 - I_4 &= 0; \\ I_1 - I_6 - I_5 &= 0; \\ I_4 + I_3 - I_5 &= 0. \end{aligned}$$

Выбираем указанные на схеме изогнутыми стрелками направления обхода контуров $abva$, $avga$, $бвб$ и для них записываем по второму закону Кирхгофа уравнения:

$$\begin{aligned} E_1 &= I_1(r_{10} + r_1) + I_3 r_3 - I_4 r_4; \\ E_2 &= I_2(r_{20} + r_2) + I_4 r_4 + I_5 r_5; \\ 0 &= I_6 r_6 - I_5 r_5 - I_3 r_3. \end{aligned}$$

Решаем полученную систему шести уравнений. Если токи I_3 , I_4 и I_5 выразить через I_1 , I_2 и I_6 , получим систему трех уравнений:

$$\begin{aligned} E_1 &= I_1(r_{10} + r_1 + r_4 + r_3) - I_2 r_4 - I_5 r_5; \\ E_2 &= -I_1 r_4 + I_2(r_{20} + r_2 + r_4 + r_6) - I_5 r_5; \\ 0 &= -I_1 r_3 - I_2 r_6 + I_6(r_3 + r_5 + r_6). \end{aligned}$$

Подставляя численные значения э. д. с. и сопротивлений и сокращая уравнения на общие множители, получим:

$$\begin{aligned} 2 &= 3 I_1 - I_2 - I_6; \\ 7 &= -2 I_1 + 6 I_2 - I_6; \\ 0 &= -2 I_1 - I_2 + 4 I_6. \end{aligned}$$

откуда

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 7 & 6 & -1 \\ 0 & -1 & 4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -2 & 6 & -1 \\ -2 & -1 & 4 \end{vmatrix}} = \frac{-81}{-45} = 1,8 \text{ а}; \quad I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 3 & 2 & -1 \\ -2 & 7 & -1 \\ -2 & 0 & 4 \end{vmatrix}}{\Delta} = 2 \text{ а};$$

$$I_6 = \frac{\begin{vmatrix} 3 & -1 & 2 \\ -2 & 6 & 7 \\ -2 & -1 & 0 \end{vmatrix}}{\Delta} = 1,4 \text{ а};$$

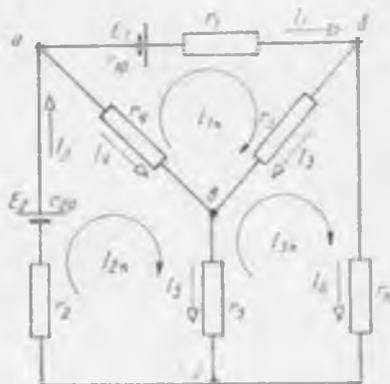


Рис. 2.20

$$I_3 = I_1 - I_4 = 1,8 - 1,4 = 0,4 \text{ а,}$$

$$I_4 = I_3 - I_1 = 2 - 1,8 = 0,2 \text{ а;}$$

$$I_5 = I_3 + I_4 = 0,4 + 0,2 = 0,6 \text{ а.}$$

Правильность решения можно проверить, используя уравнения, составленные по первому или второму законам Кирхгофа.

Б. Решение по методу контурных токов.

Намечаем три контурных тока $I_{1к}$, $I_{2к}$, $I_{3к}$, направлениями которых будем считать указанные на схеме направления обхода контуров. На основании второго закона Кирхгофа составляем три уравнения:

$$E_1 = I_{1к}(r_{10} + r_1 + r_4 + r_3) - I_{2к}r_4 - I_{3к}r_3;$$

$$E_2 = -I_{1к}r_4 + I_{2к}(r_{20} + r_2 + r_4 + r_5) - I_{3к}r_5;$$

$$0 = -I_{1к}r_3 - I_{2к}r_5 + I_{3к}(r_3 + r_5 + r_6).$$

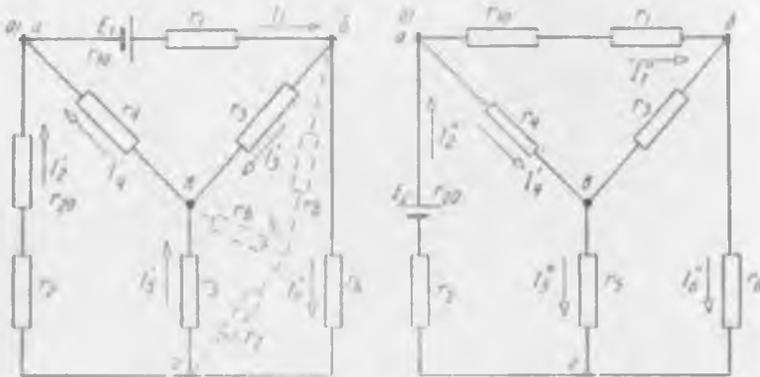


Рис. 221

Сопоставляя эту систему с тремя уравнениями, полученными в общем виде при решении задачи по законам Кирхгофа, можно видеть их тождественность. Поэтому контурные токи будут иметь соответственно значения:

$$I_{1к} = 1,8 \text{ а; } I_{2к} = 2 \text{ а; } I_{3к} = 1,4 \text{ а.}$$

Определяем действительные токи ветвей:

$$I_1 = I_{1к} = 1,8 \text{ а; } I_2 = I_{2к} = 2 \text{ а; } I_3 = I_{1к} - I_{3к} = 1,8 - 1,4 = 0,4 \text{ а;}$$

$$I_4 = I_{2к} - I_{1к} = 2 - 1,8 = 0,2 \text{ а; } I_5 = I_{2к} - I_{3к} = 2 - 1,4 = 0,6 \text{ а;}$$

$$I_6 = I_{3к} = 1,4 \text{ а.}$$

В. Решение по методу наложения.

Исключаем из цепи поочередно э. д. с. E_2 и E_1 . В результате получим расчетные схемы рис. 221 а, б.

Определяем сопротивления расчетных схем. В схеме рис. 221, а заменим треугольник сопротивлений эквивалентной звездой с сопротивлениями:

$$r_0 = r_{10} = \frac{r_2 \cdot r_6}{r_2 + r_5 + r_6} = \frac{12 \cdot 6}{12 + 6 + 6} = 3 \text{ ом;}$$

$$r_r = \frac{r_4 \cdot r_3}{r_2 + r_5 + r_6} = \frac{6 \cdot 6}{24} = 1,5 \text{ ом.}$$

Общее сопротивление схемы

$$r' = r_{10} + r_1 + r_6 + \frac{(r_B + r_4)(r_{\Gamma} + r_{20} + r_2)}{r_B + r_4 + r_{\Gamma} + r_{20} + r_2} =$$

$$= 1 + 11 + 3 + \frac{15 \cdot 19,5}{15 + 19,5} = 23,45 \text{ ом.}$$

Так как $r_1 + r_{10} = r_4$, $r_5 = r_6$, то общее сопротивление схемы рис. 2.21, б будет

$$r'' = r_{20} + r_2 + \frac{r_4 + r_5}{2} = 1 + 17 + \frac{12 + 6}{2} = 27 \text{ ом.}$$

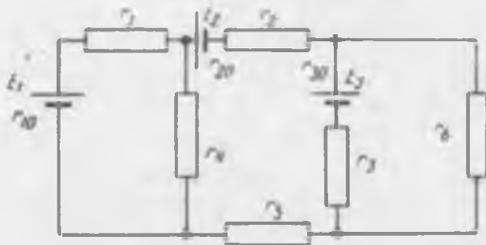


Рис. 2.22

Токи ветвей от первого источника:

$$I'_1 = \frac{E_1}{r'} = \frac{24}{23,45} = 1,02 \text{ а;}$$

$$I'_2 = \frac{I'_1 (r_B + r_4)}{r_B + r_4 + r_{\Gamma} + r_{20} + r_2} = \frac{1,02 \cdot 15}{34,5} = 0,443 \text{ а;}$$

$$I'_4 = I'_1 - I'_2 = 1,02 - 0,443 = 0,577 \text{ а;}$$

$$U_{6B} = I'_1 r_6 + I'_4 r_5 = 1,02 \cdot 3 + 0,577 \cdot 3 = 4,791 \text{ а;}$$

$$I'_3 = \frac{U_{6B}}{r_3} = \frac{4,791}{12} = 0,4 \text{ а;}$$

$$I'_6 = I'_1 - I'_3 = 1,02 - 0,4 = 0,62 \text{ а;}$$

$$I'_5 = I'_6 - I'_2 = 0,62 - 0,443 = 0,177 \text{ а.}$$

Токи ветвей от второго источника:

$$I''_2 = \frac{E_2}{r''} = \frac{42}{27} = 1,55 \text{ а;}$$

$$I''_1 = I''_4 = I''_5 = I''_6 = \frac{I''_2}{2} = 0,775 \text{ а, } I''_3 = 0.$$

Учитывая направления токов схем рис. 2.21, а и б, находим действительные значения токов ветвей:

$$I_1 = I'_1 + I''_1 = 1,02 + 0,775 \cong 1,8 \text{ а;}$$

$$I_2 = I'_2 + I''_2 = 0,443 + 1,55 \cong 2 \text{ а;}$$

$$I_3 = I'_3 = 0,4 \text{ а;}$$

$$I_4 = I_4'' - I_4' = 0,775 - 0,577 \cong 0,2 \text{ а;}$$

$$I_5 = I_5'' - I_5' = 0,775 - 0,177 \cong 0,6 \text{ а;}$$

$$I_6 = I_6'' + I_6' = 0,62 + 0,775 \cong 1,4 \text{ а.}$$

2.20. Определить токи ветвей схемы рис. 2.22 по законам Кирхгофа, методом контурных токов и методом наложения, если

$$E_1 = E_2 = 40 \text{ в, } E_3 = 60 \text{ в, } r_{10} = r_{20} = r_{30} = 1 \text{ ом, } r_1 = r_3 = 9 \text{ ом, } r_4 = 20 \text{ ом, } r_5 = 5 \text{ ом, } r_6 = 10 \text{ ом.}$$

Проверку решения выполнить на основании законов Кирхгофа.

Вопросы для самопроверки

В чем заключается сущность расчета электрических цепей по законам Кирхгофа?

Сколько при этом составляется уравнений по первому и по второму закону?

В чем достоинство и недостаток этого метода расчета?

Как рассчитать электрическую цепь по методу контурных токов? В чем преимущество метода контурных токов в сравнении с расчетом по законам Кирхгофа?

Как осуществляется расчет электрических цепей по методу наложения?

Каковы достоинства и недостатки этого метода в сравнении с двумя предыдущими методами?

§ 2.6. Расчет нелинейных электрических цепей

В нелинейных электрических цепях, так же как и в линейных, сопротивления могут быть включены последовательно, параллельно, смешанно и другими более сложными способами. Расчет этих цепей из-за нелинейной зависимости между напряжением и током, т. е. из-за непостоянства сопротивлений,

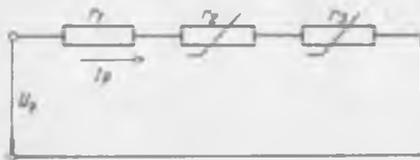


Рис. 2.23

значительно сложнее, чем расчет линейных цепей аналогичной конфигурации. В некоторых случаях строгий аналитический расчет вообще нельзя выполнить или же он очень громоздок и трудоемок. Поэтому для расчета нелинейных цепей

широко применяют графо-аналитический метод.

Сущность этого метода можно свести к следующему: опытным или расчетным путем определяют вольт-амперные характеристики отдельных элементов нелинейной цепи, строят их графики и график суммарной вольт-амперной характеристики цепи, по ней определяют ток цепи, если задано напряжение, или напряжение, если известен ток. Далее по характеристикам отдельных элементов определяют их напряжения и токи.

Рассмотрим применение этого метода для расчета простейших нелинейных цепей с одним источником питания.

На рис. 2.23 приведена схема последовательного включения одного линейного и двух нелинейных сопротивлений. Их вольт-амперные характеристики (1, 2, 3) показаны на рис. 2.24. При последовательном соединении сопротивлений напряжение цепи равно сумме напряжений участков. Поэтому для построения суммарной вольт-амперной характеристики — кривая 4 — необходимо сложить ординаты характеристик (напряжения) отдельных сопротивлений.

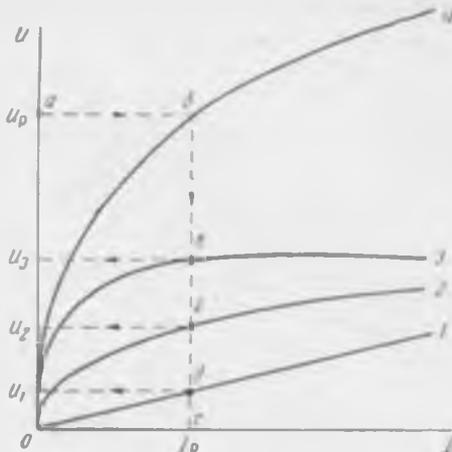


Рис. 2.24

Если из точки *a*, соответствующей заданному напряжению цепи U_p , провести прямую *ab* до пересечения с кривой 4, то точка *b* будет соответствовать режиму работы цепи. Опустив из этой точки перпендикуляр на ось тока, получим отрезок *oe*, равный в некотором масштабе рабочему току цепи I_p . Одновременно пересечение перпендикуляра *be* с характеристиками сопротивлений дает точки (*в*, *г*, *д*), соответствующие режиму работы каждого сопротивления. Ординаты этих точек равны напряжениям соответствующих сопротивлений.

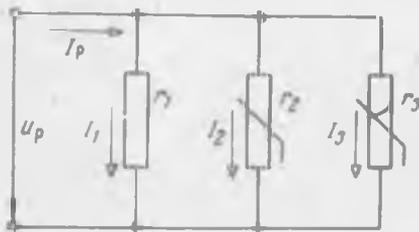


Рис. 2.25

Если задан рабочий ток, то для получения напряжения цепи и ее участков необходимо восстановить перпендикуляр из точки *e* до пересечения с суммарной вольт-амперной характеристикой.

На рис. 2.25 изображена схема параллельного включения сопротивлений, а на рис. 2.26 — их вольт-амперные характеристики (1, 2, 3). Для построения вольт-амперной характеристики цепи (4) в данном случае необходимо сложить абсциссы характеристик (токи) отдельных сопротивлений, так как ток цепи равен сумме токов ветвей

На рис. 2.25 изображена схема параллельного включения сопротивлений, а на рис. 2.26 — их вольт-амперные характеристики (1, 2, 3). Для построения вольт-амперной характеристики цепи (4) в данном случае необходимо сложить абсциссы характеристик (токи) отдельных сопротивлений, так как ток цепи равен сумме токов ветвей

$$I_p = I_1 + I_2 + I_3.$$

Если задано рабочее напряжение U_p , проводится прямая ab на уровне, соответствующем U_p . Из точки b опускается перпендикуляр на ось абсцисс и тем самым определяется значе-

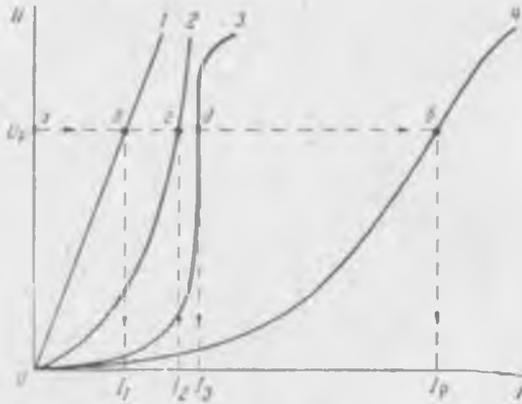


Рис. 2.26

ние рабочего тока I_p . Пересечение прямой ab с характеристиками сопротивлений происходит в точках a, g, d , соответствующих режиму работы сопротивлений. Абсциссы точек a, g, d равны токам сопротивлений.

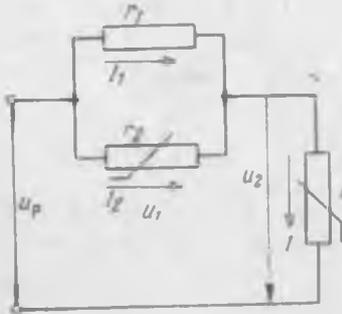


Рис. 2.27

На рис. 2.27 представлена схема смешанного соединения сопротивлений. Их вольт-амперные характеристики показаны на рис. 2.28.

Для построения вольт-амперной характеристики цепи в целом необходимо вначале построить суммарную характеристику сопротивлений r_1 и r_2 , включенных параллельно. Для этого складываются абсциссы их характеристик (1, 2),

что дает кривую 4. Далее суммируются ординаты кривых 3 и 4 и строится кривая 5, являющаяся вольт-амперной характеристикой цепи.

Если провести прямую ab и опустить перпендикуляр из точки b на ось абсцисс, то отрезок od будет соответствовать рабочему току, а ординаты точек пересечения перпендикуля-

ра bd с кривыми 3 и 4 — напряжениям U_1 и U_2 сопротивлений. В свою очередь абсциссы точек пересечения прямой ge с характеристиками 1 и 2 равны токам сопротивлений r_1 и r_2 .

Таким образом, при использовании графо-аналитического метода для расчета рассмотренных схем осуществляется

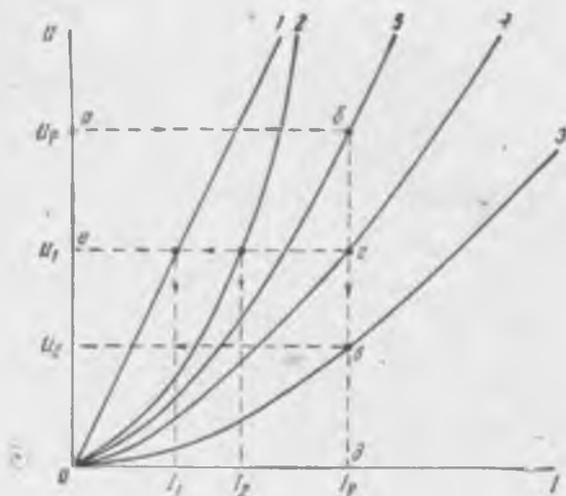


Рис. 2.28

в сущности замена нескольких сопротивлений цепи одним эквивалентным, как и при аналитическом расчете аналогичных линейных схем.

Вопросы для самопроверки

- Какая цепь называется нелинейной?
- Как можно графически рассчитать нелинейную цепь при последовательном, параллельном и смешанном соединении сопротивлений в ней?
- Какие устройства характеризуются нелинейными сопротивлениями?

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 3.1. Магнитное поле электрического тока

Если в пространство, окружающее проводник с током, поместить магнитную стрелку, то она определенным образом ориентируется по отношению к проводнику. Пространство, в котором проявляется действие сил на магнитную стрелку, является носителем особой формы материи, называемой магнитным полем.

Магнитное поле характеризуется интенсивностью и направлением. Направление поля определяется магнитными силовыми линиями. Магнитная силовая линия — это замкнутая

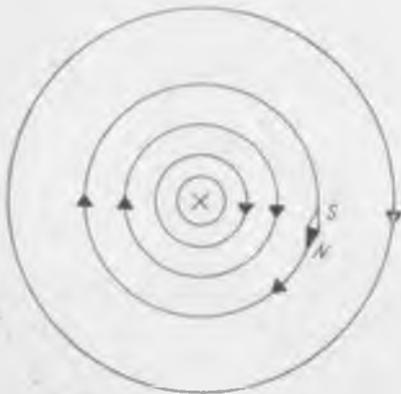


Рис. 3.1

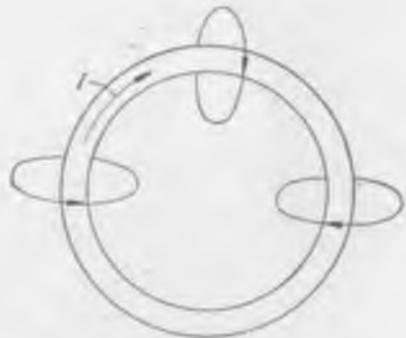


Рис. 3.2

кривая, касательная в каждой точке которой совпадает с направлением северного конца магнитной стрелки. Для прямого проводника с током силовые линии представляют собой окружности с центром на оси проводника (рис. 3.1). Направление силовых линий определяется правилом винта.

Магнитное поле проводника с током можно усилить, если проводнику придать форму витка (рис. 3.2). Несколько витков,

свернутых спиралью, образуют соленоид (рис. 3.3). Магнитное поле соленоида можно в свою очередь усилить, если выполнить соленоид в виде кольцевой катушки (тороида) (рис. 3.4).

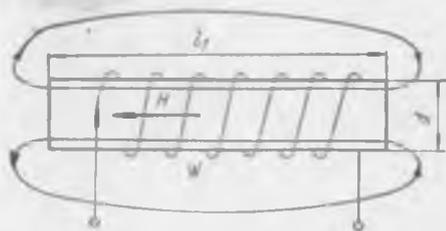


Рис. 3.3

Если обмотку с током разместить на сердечнике из ферромагнитного материала, то последний создает собственное магнитное поле, которое, складываясь с магнитным полем катушки, усиливает поле в 10^3 — 10^6 раз (см. § 1.2). Вот почему сердечники трансформа-

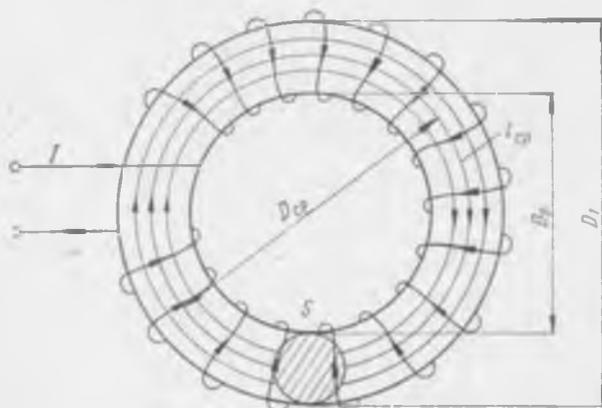


Рис. 3.4

торов, электрических машин, подъемных электромагнитов, измерительных приборов и других электромагнитных аппаратов выполняются из ферромагнитных материалов.

§ 3.2. Основные характеристики магнитного поля

Основной величиной, характеризующей «силу», интенсивность магнитного поля, является магнитная индукция B . Величина магнитной индукции численно равна силе, с которой магнитное поле действует на проводник длиной в 1 м, расположенный перпендикулярно магнитным линиям, по которому протекает ток в 1 а:

$$B = \frac{F}{l}. \quad (3.1)$$

Единица измерения магнитной индукции в системе СИ — 1 тесла ($тл$) = $1 \text{ в} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$, или $1 \text{ вб}/\text{м}^2$, а в электромагнитной системе СГСМ — 1 гаусс ($гс$). При этом $1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс}$.

Магнитная индукция — векторная величина. Направление ее в каждой точке магнитного поля совпадает с направлением касательной к магнитной линии.

Магнитная индукция является «точечной» характеристикой магнитного поля, так как определяет интенсивность магнитного поля в любой точке пространства. При расчетах наряду с «точечной» характеристикой магнитного поля широко пользуются «объемной» характеристикой магнитного поля — магнитным потоком Φ .

Магнитный поток Φ , пронизывающий данную площадку, расположенную перпендикулярно магнитным силовым линиям, равен

$$\Phi = B \cdot S. \quad (3.2)$$

Единица измерения магнитного потока в системе СИ — 1 вебер ($вб$) = $1 \text{ в} \cdot \text{сек}$, в системе СГСМ — 1 максвелл ($мкс$); $1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс}$.

Если через каждую единицу площади проводить столько силовых линий, чтобы их количество было численно равно магнитной индукции, тогда магнитный поток будет равен общему числу силовых линий, пронизывающих данную площадь. Магнитная индукция в этом случае будет численно равна количеству магнитных силовых линий, пронизывающих единицу площади.

В случае, когда поток распределяется по сечению неравномерно,

$$B = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (3.3)$$

Магнитная индукция, создаваемая проводниками с током в любой точке пространства, зависит от величины протекающего тока, геометрических размеров проводников, выбора точки и свойств среды, в которой размещается магнитное поле,

$$B = \mu_a H. \quad (3.4)$$

где H — напряженность магнитного поля — величина, которая зависит от тока и «геометрии» проводников;

μ_a — магнитная проницаемость — величина, характеризующая магнитные свойства среды, в которой существует магнитное поле.

Единица измерения напряженности магнитного поля в системе СИ — $1 \text{ а}/\text{м}$, а в электромагнитной системе СГСМ — 1 эрстед ($э$), при этом $1 \text{ э} = 80 \text{ а}/\text{м}$.

Единица измерения магнитной проницаемости — $1 \text{ гн/м} = 1 \text{ ом} \cdot \text{сек/м}$. Для вакуума магнитная проницаемость равна

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ гн/м}.$$

В системе СГСМ магнитная проницаемость пустоты принята за единицу. Магнитная проницаемость воздуха при практических расчетах принимается равной μ_0 .

Отношение магнитной проницаемости вещества к магнитной проницаемости вакуума называют относительной магнитной проницаемостью:

$$\mu = \frac{\mu_s}{\mu_0} \quad (3.5)$$

Вопросы для самопроверки

Что называется магнитным полем?

Что такое магнитная силовая линия?

Как усилить магнитное поле проводника с током?

Почему сердечники различных электромагнитных аппаратов выполняются из ферромагнитных материалов?

Что такое магнитная индукция? Единица измерения магнитной индукции.

Как определяется магнитный поток? Единица измерения магнитного потока.

От чего зависит величина магнитной индукции? Что такое магнитная проницаемость? Единица измерения магнитной проницаемости.

§ 3.3. Закон полного тока

Закон полного тока является одним из основных законов, устанавливающих связь между током и создаваемым им магнитным полем.

Рассмотрим несколько проводников с токами (рис. 3.5).

Проведем через точку A магнитную силовую линию. Тогда вектор магнитной индукции B будет направлен по касательной к магнитной силовой линии. Напряженность магнитного поля — также векторная величина. Направление ее совпадает с вектором B . Выделим около точки A элементарный отрезок магнитной силовой линии dl . Запишем произведение Hdl . Возьмем следующую точку магнитной силовой линии, снова найдем произведение Hdl . Просуммировав это произведение по длине контура магнитной силовой линии, получим интеграл по замкнутому контуру от напряженности магнитного поля $\oint Hdl$. Экспериментально доказано, что этот интеграл равен сумме токов $\sum I$, охватываемых контуром. Итак, математическая формула закона полного тока имеет вид

$$\oint Hdl = \sum I, \quad (3.6)$$

родную магнитную цепь, изображенную на рис. 3.8. Здесь магнитная цепь неоднородна по материалу (содержит воздушный зазор) и по сечению. Однако в пределах каждого из участков l_1, l_2, l_3 магнитная цепь является однородной, т. е. имеет один и тот же материал и одно и то же сечение. Следовательно, напряженность магнитного поля в пределах каждого участка будет величиной постоянной.

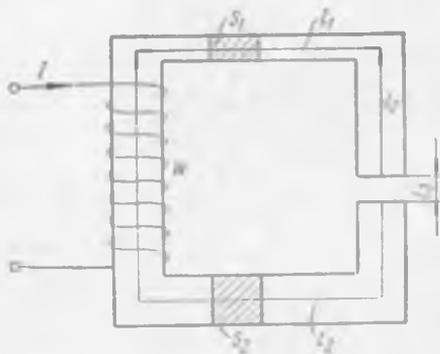


Рис. 3.8

По закону полного тока намагничивающая сила катушки равна $Iw = \oint Hdl$, причем интегрирование производится по контуру средней магнитной силовой линии. Интеграл по замкнутому контуру можно заменить суммой интегралов по отдельным участкам

$$Iw = \int_{l_1} H_1 dl + \int_{l_2} H_2 dl + \int_{l_3} H_3 dl.$$

Так как в пределах каждого участка напряженность является величиной постоянной, то ее можно вынести за знак интеграла

$$Iw = H_1 \int_{l_1} dl + H_2 \int_{l_2} dl + H_3 \int_{l_3} dl.$$

После интегрирования получаем выражение для закона магнитной цепи

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = \sum H_k l_k. \quad (3.13)$$

Так как $H_1 = \frac{\Phi}{\mu_1 S_1}$ и $H_2 = \frac{\Phi}{\mu_2 S_2}$, то, решив (3.13) относительно потока Φ , получим закон Ома для магнитной цепи

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3}} = \frac{Iw}{R_m}.$$

Задачи. 3.1. Определить напряженность магнитного поля, создаваемую прямым проводником с током $I=100$ а в точке, отстоящей от оси проводника на расстоянии $a=1,6$ м.

Ответ: $H=10$ а/м.

3.2. При каком значении тока в проводнике напряженность магнитного поля в точке, удаленной на 50 см от осч проводника, будет равна 16 а/м.

Ответ: $I=50$ а.

3.3. На кольцевом каркасе круглого сечения (см. рис. 3.4) из немагнитного материала размещена обмотка, содержащая 200 витков. Размеры каркаса: наружный диаметр $D_1=70$ мм, внутренний диаметр $D_2=58$ мм, ток

$l=1$ а. Рассчитать напряженность магнитного поля в средней силовой линии.

Ответ: $H=1000$ а/м.

3.4. Для условия предыдущей задачи определить магнитную индукцию вдоль средней силовой линии.

Ответ: $B=1,25 \cdot 10^{-3}$ тл.

3.5. Для условия задачи (3.3) определить магнитный поток тороида.

Ответ: $\Phi=3,5 \cdot 10^{-8}$ вб.

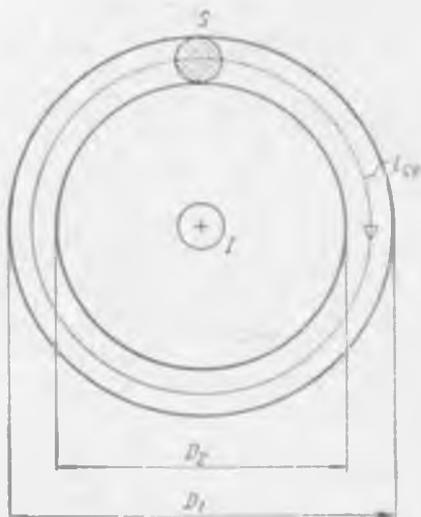


Рис. 3.9

3.6. Цилиндрическая катушка длиной $l=25$ см со средним диаметром $D_{cp}=2$ см имеет 200 витков, по которым протекает ток $I=1,5$ а. Определить напряженность магнитного поля внутри катушки.

Ответ: $H=1200$ а/м.

3.7. Через центр тороида круглого сечения проходит прямой проводник с током $I=60$ а (рис. 3.9). Наружный диаметр тороида $D_1=70$ мм, внутренний диаметр $D_2=58$ мм. Определить магнитный поток, замыкающийся по тороиду, в двух случаях: а) сердечник тороида сделан из немагнитного материала; б) сердечник тороида сделан из электротехнической стали Э42.

Решение. Средний диаметр тороида

$$D_{cp} = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{70 + 58}{2} = 64 \text{ мм.}$$

Длина средней силовой линии

$$l_{cp} = \pi D_{cp} = \pi \cdot 64 = 200 \text{ мм.}$$

Напряженность магнитного поля тороида

$$H = \frac{Iw}{l_{cp}} = \frac{60 \cdot 1}{0,2} = 300 \text{ а/м.}$$

Магнитная индукция тороида

$$B = \mu_0 H = 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 300 = 3,76 \cdot 10^{-4} \text{ тл.}$$

По кривой намагничивания для стали Э42 при $H=300$ а/м находим, что $B=1$ тл.

Диаметр сечения тороида

$$d = \frac{D_1 - D_2}{2} = \frac{70 - 58}{2} = 6 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения тороида

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,3 \text{ мм}^2 = 28,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Магнитный поток тороида

$$\Phi = B \cdot S = 3,76 \cdot 10^{-4} \cdot 28,3 \cdot 10^{-6} = 1,06 \cdot 10^{-8} \text{ вб};$$

$$\Phi = B \cdot S = 1 \cdot 28,3 \cdot 10^{-6} = 28,3 \cdot 10^{-6} \text{ вб.}$$

Таким образом, магнитный поток тороида с ферромагнитным сердечником будет больше в 2650 раз.

Вопросы для самопроверки

Какова формулировка закона полного тока?

Чему равна напряженность магнитного поля прямого проводника с током?

Как подсчитать напряженность магнитного поля тороида?

Чему равна напряженность магнитного поля соленоида?

Что представляет собой магнитная цепь?

Какая магнитная цепь называется неоднородной?

Запишите выражение для закона магнитной цепи.

§ 3.5. Расчет неразветвленных магнитных цепей

При расчете магнитных цепей различают прямую и обратную задачи. При решении прямой задачи обычно задан магнитный поток или магнитная индукция. Требуется определить намагничивающую силу, необходимую для создания заданного магнитного потока. При решении обратной задачи неизвестным является магнитный поток или магнитная индукция, а намагничивающая сила — задана.

Рассмотрим расчет магнитной цепи электромагнита с якорем (рис. 3.10). Геометрические размеры и материал магнитной цепи известны. Требуется определить намагничивающую силу, необходимую для создания в зазоре заданной величины магнитной индукции B_δ .

Находим магнитный поток

$$\Phi = B_\delta \cdot S_\delta.$$

Вычисляем магнитную индукцию в сердечнике электромагнита и якоря:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}.$$

По кривой намагничивания для сердечника и якоря определяем напряженность магнитного поля H_1 и H_2 .

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре находим по формуле

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0}$$

Искомая намагничивающая сила будет равна

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_3 \delta. \quad (3.14)$$

При решении обратной задачи, когда задана величина намагничивающей силы, а требуется найти магнитную индук-

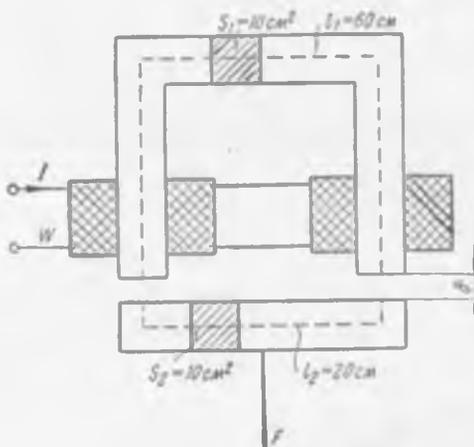


Рис. 3.10

цию в зазоре и, следовательно, подъемную силу электромагнита, можно поступить следующим образом. Уравнение (3.14) переписываем в виде

$$H_3 = \frac{Iw - (H_1 l_1 + H_2 l_2)}{2\delta}. \quad (3.15)$$

В первом приближении величиной $(H_1 l_1 + H_2 l_2)$ пренебрегаем, тогда

$$H_3 = \frac{Iw}{2\delta} \text{ и } B_3 = \mu_0 H_3. \quad (3.16)$$

Затем, как и в случае прямой задачи, находим последовательно Φ , B_1 , B_2 , H_1 , H_2 .

На этом расчет можно закончить. Таким образом, $B_0 = 0,525 \text{ тл}$. Мы видим, что уже третье приближение дает достаточную точность. Подъемная сила электромагнита

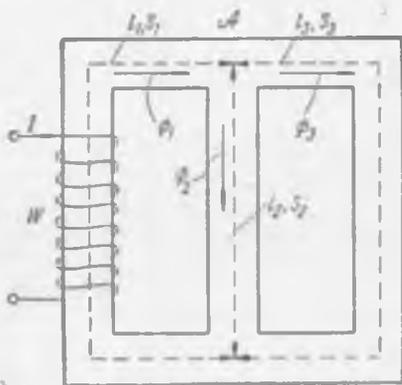
$$F = 8B^2S \cdot 10^4 = 8 \cdot 0,525^2 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4 = 22 \text{ кг.}$$

§ 3.6. Расчет разветвленных магнитных цепей

При расчете разветвленных магнитных цепей применяются первый и второй законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа относится к узловой точке магнитной цепи. Он гласит, что *алгебраическая сумма магнитных потоков в узловой точке равна нулю*

$$\Sigma \Phi = 0. \quad (3.17)$$



Второй закон Кирхгофа представляет собой ни что иное, как закон магнитной цепи. Он гласит, что *алгебраическая сумма магнитных напряжений NI по замкнутому контуру равна алгебраической сумме намагничивающих сил вдоль этого же контура*

Рис. 3.12

$$\Sigma NI = \Sigma Iw. \quad (3.18)$$

Составим уравнения по законам Кирхгофа для магнитной цепи, изображенной на рис. 3.12.

Согласно первому закону Кирхгофа, для узловой точки А получим

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0. \quad (3.19)$$

Согласно второму закону Кирхгофа, для первого и второго контура имеем:

$$N_1 l_1 + H_2 l_2 = Iw; \quad (3.20)$$

$$-H_2 l_2 + H_3 l_3 = 0. \quad (3.21)$$

Приведенным уравнениям соответствует эквивалентная электрическая схема (рис. 3.13).

При расчете разветвленных магнитных цепей также различают прямую и обратную задачи.

Рассмотрим пример решения прямой задачи.

Задачи. 3.12. Пусть задан магнитный ток $\Phi_3 = 10 \cdot 10^{-4}$ вб. Требуется найти намагничивающую силу Iw .

Данные сердечника (см. рис. 3.12):

$$l_1 = 60 \text{ см}, l_2 = 20 \text{ см}, l_3 = 60 \text{ см}, \\ S_2 = S_3 = 10 \text{ см}^2, S_1 = 20 \text{ см}^2.$$

Материалы сердечника — электротехническая сталь Э42.

Решение. Определяем магнитную индукцию в третьем стержне

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = \frac{10 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ тл}.$$

По кривой намагничивания стали Э42 для $B_3 = 1$ тл находим, что $H_3 = 3$ а/см = 300 а/м.

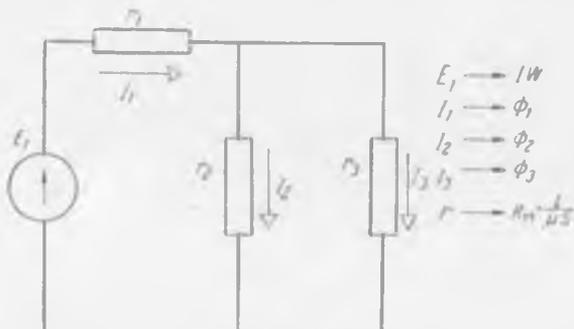


Рис. 3.13

Из уравнения (3.21) имеем

$$H_2 = \frac{H_3 l_3}{l_2} = \frac{300 \cdot 0,6}{0,2} = 900 \text{ а/м} = 9 \text{ а/см}.$$

По кривой намагничивания для $H_2 = 9$ а/см находим, что $B_2 = 1,22$ тл. Магнитный поток

$$\Phi_2 = B_2 S_2 = 1,22 \cdot 10 \cdot 10^{-4} = 12,2 \cdot 10^{-4} \text{ вб}.$$

Из уравнения (3.19) находим, что

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 = 10 \cdot 10^{-4} + 12,2 \cdot 10^{-4} = 22,2 \cdot 10^{-4} \text{ вб}.$$

Магнитная индукция

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{22,2 \cdot 10^{-4}}{20 \cdot 10^{-4}} = 1,11 \text{ тл}.$$

По кривой намагничивания для B_1 находим

$$H_1 = 4 \text{ а/см} = 400 \text{ а/м}.$$

Намагничивающая сила

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 = 400 \cdot 0,6 + 900 \cdot 0,2 = 420 \text{ а}.$$

§ 3.7. Электромагнитная индукция

При движении проводника в магнитном поле (рис. 3.14) на его концах возникает э. д. с. электромагнитной индукции. Величина индуцированной э. д. с. выражается формулой

$$e = Blv \sin \alpha, \quad (3.22)$$

где e — э. д. с. электромагнитной индукции;

B — магнитная индукция;

l — длина проводника;

v — скорость перемещения проводника;

α — угол между направлением перемещения проводника и направлением вектора магнитной индукции.

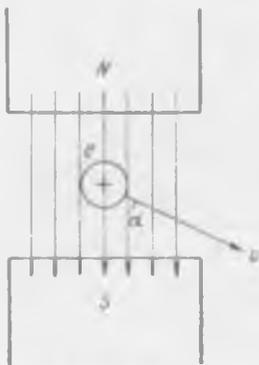


Рис. 3.14

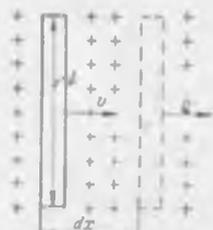


Рис. 3.15

Направление э. д. с. определяется правилом правой руки: если ладонь правой руки расположить таким образом, чтобы магнитные силовые линии входили в нее, а направление отогнутого большого пальца указывало направление перемещения проводника, тогда вытянутые четыре пальца укажут направление э. д. с.

Если проводник движется перпендикулярно магнитным силовым линиям, тогда $e = Blv$.

Пусть проводник за время dt переместился на расстояние dx (рис. 3.15), тогда $v = \frac{dx}{dt}$ и, следовательно,

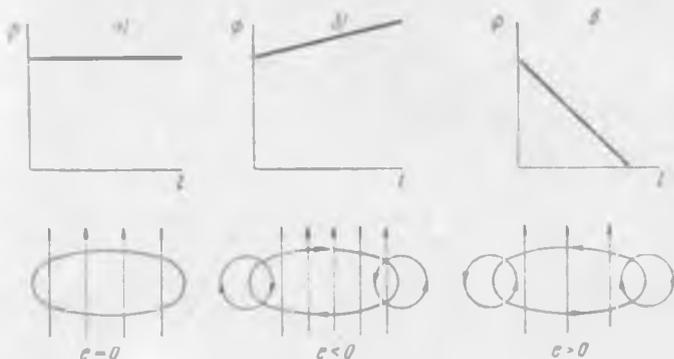
$$e = Bl \frac{dx}{dt} = B \frac{ds}{dt} = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|.$$

Таким образом, величина индуцируемой э. д. с. численно равна магнитному потоку, пересекаемому проводником в единицу времени:

$$e = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|. \quad (3.23)$$

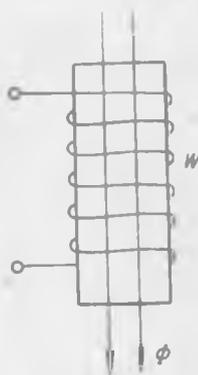
Э. д. с. электромагнитной индукции может возникать и в неподвижном проводнике, если замкнутый контур проводника пронизывается меняющимся магнитным потоком. В этом случае величина и направление э. д. с. определяется формулой

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.24)$$



Р и с. 3.16

Следовательно, величина э. д. с. пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Знак (—) указывает на направление э. д. с., которое определяется правилом Ленца: *при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, в последнем возникают «электрические силы», препятствующие изменению магнитного потока.* Проиллюстрируем правило Ленца рядом примеров. Пусть магнитный поток со временем не меняется (рис. 3.16, а), тогда $e = 0$. Если магнитный поток возрастает (рис. 3.16, б), то $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ и, следовательно, $e < 0$, т. е. направление э. д. с. будет таким, чтобы ток, протекающий по замкнутому контуру, создал свой магнитный поток, препятствующий росту основного потока. (Направления основного и дополнительного потока противоположны.) Если магнитный поток уменьшается (рис. 3.16, в), то $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ и, следовательно, $e > 0$, т. е. направление э. д. с. будет таким, чтобы ток, протекающий по замкнутому контуру, создал свой магнитный поток, препятствующий исчезновению



Р и с. 3.17

основного магнитного потока. (Направления основного и дополнительного потока совпадают.)

Если магнитный поток пронизывает не один виток, а катушку из ω витков (рис. 3.17), тогда

$$e_k = -\omega \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(\omega\Phi)}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (3.25)$$

Произведение магнитного потока на число витков, с которыми он сцеплен, называется потокоцеплением Ψ

$$\Psi = \omega\Phi. \quad (3.26)$$

Таким образом, э. д. с. катушки пропорциональна скорости изменения потокоцепления.

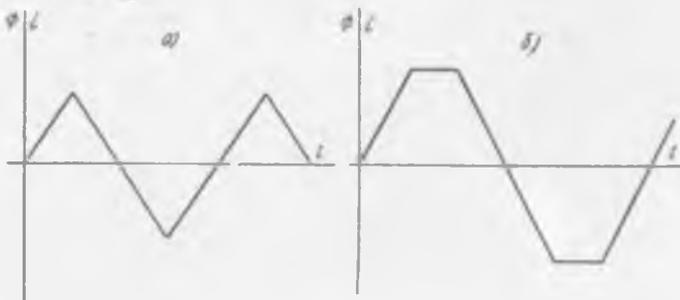


Рис. 3.18

Явление электромагнитной индукции используется в генераторах электрического тока, где осуществляется преобразование механической энергии в электрическую.

Задачи. 3.13. Магнитный поток, пронизывающий катушку, состоящую из 200 витков, возрастает по линейному закону в течение $\Delta t = 0,1$ сек от $\Phi_1 = 0$ до $\Phi_2 = 0,02$ вб. Чему равна э. д. с. самоиндукции, возникающая в катушке?

Ответ: $e = -40$ в.

3.14. Магнитный поток, пронизывающий катушку, состоящую из 200 витков, убывает по линейному закону от $\Phi_1 = 0,02$ вб до $\Phi_2 = 0$ за время $\Delta t = 0,01$ сек. Чему равна э. д. с. самоиндукции, возникающая в катушке?

Ответ: $e = 400$ в.

3.15. Магнитный поток, пронизывающий 500 витков катушки, изменяется по закону $\Phi = 0,012e^{-100t}$ вб. Определить закон изменения э. д. с.

Ответ: $e = 600e^{-100t}$ в.

3.16. Определить наибольшее значение э. д. с. в задаче 3.15.

Ответ: $E_m = 600$ в.

3.17. Катушку, содержащую 200 витков, пронизывает магнитный поток, изменяющийся по закону $\Phi = 0,002 \sin 100t$ вб. Найти закон изменения э. д. с.

Ответ: $e = -40 \cos 100t$ в.

3.18. Определить максимальное значение э. д. с. в задаче 3.17.

Ответ: $E_m = 40$ в.

3.19. Магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется со временем, как показано на рис. 3.18, а. Нарисуйте график изменения э. д. с.

3.20 Магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется по закону трапеции (рис. 3.18, б). Изобразите закон изменения э. д. с.

§ 3.8. Самоиндукция

При замыкании или размыкании цепи катушки (рис. 3.19) происходит изменение тока в цепи. Изменяющийся ток создает изменяющееся магнитное поле, которое характеризуется величиной потокоцепления самоиндукции Ψ . Последнее, пронизывая витки катушки, наводит в ней э. д. с. самоиндукции e_L :

$$e_L = - \frac{d\Psi}{dt} = - \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (3.27)$$

т. е. э. д. с. самоиндукции пропорциональна скорости измене-

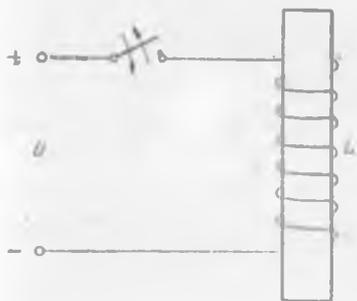


Рис. 3.19

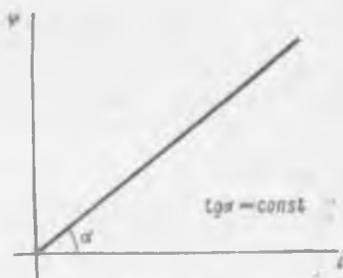


Рис. 3.20

ния тока. Здесь L — коэффициент самоиндукции, или индуктивность.

Единицей измерения индуктивности является 1 генри (гн) = 1 ом · сек.

Если между потокоцеплением Ψ и током i катушки существует прямо пропорциональная зависимость (рис. 3.20), в этом случае

$$L = \frac{d\Psi}{di} = \frac{\Psi}{i} = \text{const.}$$

Индуктивность является параметром, который характеризует катушку с точки зрения создания э. д. с. самоиндукции. При одной и той же скорости изменения тока $\frac{di}{dt}$ э. д. с. самоиндукции будет выше у той катушки, индуктивность которой больше.

При периодическом изменении тока э. д. с. самоиндукции будет также изменяться периодически. Поэтому в цепях пере-

менного тока, где ток периодически меняется, э. д. с. самоиндукции будет непрерывно влиять на работу цепи. В цепях постоянного тока э. д. с. самоиндукции возникает лишь при включении или отключении цепи. При отключении цепей, обладающих большой индуктивностью (обмотка электромагнита, обмотка возбуждения машины постоянного тока), за счет высокой скорости изменения тока э. д. с. самоиндукции может значительно превышать напряжение сети. Под действием э. д. с. самоиндукции в месте разрыва цепи возникает электрическая дуга, которая вызывает оплавление контактов. Поэтому выключатели таких устройств должны быть сконструированы так, чтобы время гашения дуги было минимальным.

Задачи. 3.21. Индуктивность обмотки возбуждения генератора постоянного тока $L=2$ гн. Чему равна э. д. с. самоиндукции, возникающая в обмотке, при увеличении тока от $I_1=0$ до $I_2=1$ а за время $\Delta t=0,1$ сек.

Ответ: $e=20$ в.

3.22. Чему равна э. д. с. самоиндукции, возникающая при отключении цепи задачи (3.21), если $\Delta t=0,01$ сек.

Ответ: $e=200$ в.

3.23. Определить закон изменения э. д. с. в катушке с индуктивностью $L=0,1$ гн при протекании по ней тока, изменяющегося по закону $i=10 e^{-100t}$ а.

Ответ: $e=100 e^{-100t}$ в

3.24. По катушке, обладающей индуктивностью $L=0,2$ гн, пропускается ток $i=3\cos 100t$ а. Определить закон изменения э. д. с. самоиндукции.

Ответ: $e=60 \sin 100t$ в.

3.25. Для определения индуктивности катушки через нее пропускался ток $i=2\cos 314t$ а. Э. д. с. самоиндукции оказалась равной $e=63\sin 314t$ в. Определить индуктивность катушки.

Ответ: $L=0,1$ гн.

3.26. По катушке пропускается ток, изменяющийся по закону, изображенному на рис. 3.18, а. Изобразите закон изменения э. д. с. катушки.

3.27. Нарисуйте закон изменения э. д. с. катушки, если по катушке идет ток трапецидальной формы (рис. 3.18, б).

Вопросы для самопроверки

Какого рода задачи различают при расчете магнитных цепей?

Порядок решения прямой задачи.

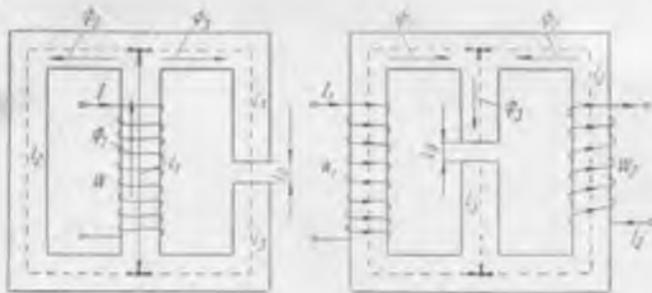
Порядок решения обратной задачи.

Как формулируется первый закон Кирхгофа для магнитной цепи?

Как формулируется второй закон Кирхгофа для магнитной цепи? Составьте уравнения по законам Кирхгофа для магнитных цепей (рис. 3.21).

В чем заключается явление электромагнитной индукции? От чего зависит э. д. с., возникающая в проводнике, при его движении в магнитном поле? Как определяется направление э. д. с. в этом случае?

Чему равна э. д. с., возникающая в замкнутом проводнике, если контур проводника пронизывает меняющееся магнитное поле? Как определяется направление э. д. с. в этом случае?



Р и с. 3.21

В чем заключается явление самоиндукции? От чего зависит э. д. с. самоиндукции? Чему равен коэффициент самоиндукции? Что характеризует коэффициент самоиндукции? В каких единицах измеряется индуктивность?

§ 3.9. Индуктивность тороида

Различают статическую и динамическую индуктивность. Статическая индуктивность есть отношение потокосцепления к току

$$L = \frac{\Psi}{I}. \quad (3.28)$$

Динамическая индуктивность есть производная от потокосцепления по току

$$L_{\text{д}} = \frac{d\Psi}{di}. \quad (3.29)$$

Для определения статической индуктивности тороида (см. рис. 3.4) подставим в формулу (3.28) значение потокосцепления Ψ

$$\Psi = \Phi \omega = B S \omega,$$

а ток выразим через напряженность магнитного поля

$$I = \frac{H l_{\text{ср}}}{\omega}.$$

Тогда окончательно получим

$$L = \frac{\omega^2 S}{l_{\text{ср}}} \cdot \frac{B}{H} = \frac{\omega^2 S}{l_{\text{ср}}} \cdot \mu \cdot \mu_0. \quad (3.30)$$

В случае тороида с неферромагнитным сердечником

$$L = \frac{\omega^2 S}{l_{\text{ср}}} \mu_0. \quad (3.31)$$

Для определения динамической индуктивности возьмем приращение потокосцепления

$$d\Psi = \omega S dB.$$

Далее, выразив приращение тока как $di = \frac{l_{cp}}{w} dH$, подставим полученные значения $d\psi$ и di в формулу для динамической индуктивности (3.29)

$$L_d = \frac{w^2 S}{l_{cp}} \cdot \frac{dB}{dH} = \frac{w^2 S}{l_{cp}} \mu_r \cdot \mu_0. \quad (3.32)$$

В случае тороида с неферромагнитным сердечником

$$B = \mu_0 H; \quad \frac{dB}{dH} = \mu_0$$

и, следовательно,

$$L_d = \frac{w^2 S}{l_{cp}} \mu_0. \quad (3.33)$$

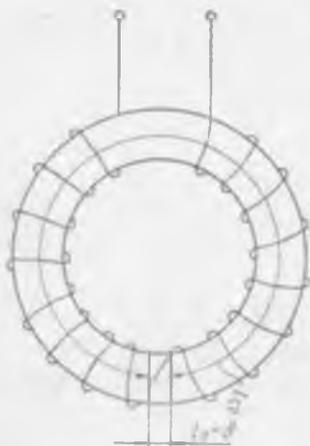


Рис. 3.22

Таким образом, для тороида, имеющего неферромагнитный сердечник, динамическая и статическая индуктивность равны. Вернемся сейчас к формулам (3.30) и (3.32). В случае тороида, имеющего ферромагнитный сердечник, магнитная проницаемость которого является функцией на-

пряженности поля (тока), получим, что индуктивность будет функцией тока.

Представляет интерес получить выражение для индуктивности тороида, имеющего воздушный зазор (рис. 3.22). Запишем закон магнитной цепи для тороида с зазором

$$l\omega = Hl + H_0\delta. \quad (3.34)$$

Разделим правую и левую часть на l и подставим вместо H и H_0 соответственно $\frac{B}{\mu\mu_0}$ и $\frac{B}{\mu_0}$, тогда

$$\frac{l\omega}{l} = \frac{B}{\mu\mu_0} + \frac{B}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{l}. \quad (3.35)$$

Выражение, стоящее слева, есть напряженность поля эквивалентного тороида без зазора, у которого те же геометрические размеры и та же магнитная индукция, что и у реального тороида:

$$H_s = B \left(\frac{1}{\mu\mu_0} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{l} \right) \quad (3.36)$$

или

$$\frac{H_s}{B} = \frac{1}{\mu\mu_0} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{l}. \quad (3.37)$$

Величина $\frac{H_0}{B}$ представляет собой величину, обратную магнитной проницаемости эквивалентного тороида

$$\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_0} = \frac{1}{\mu \mu_0} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{l}. \quad (3.38)$$

Сократив на μ_0 , получим $\frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu} + \frac{\delta}{l}$

или

$$\mu_0 = \frac{\mu}{1 + \mu \frac{\delta}{l}}. \quad (3.39)$$

Формула (3.39) дает возможность вычислить относительную магнитную проницаемость сердечника эквивалентного тороида по известной магнитной проницаемости стального сердечника тороида с зазором.

Как видно из формулы (3.39), при [постоянном значении μ с ростом относительной величины воздушного зазора $\frac{\delta}{l}$ эквивалентная магнитная проницаемость уменьшается. Весьма интересный результат получается, когда $\mu \frac{\delta}{l} \gg 1$. В этом случае

$$\mu_0 = \frac{l}{\delta}. \quad (3.40)$$

В заключение следует отметить, что полученные формулы пригодны не только для катушки, имеющей кольцевой сердечник, но и для катушки, имеющей сердечник прямоугольной формы.

§ 3.10. Взаимоиндукция

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 3.23. При изменении тока в первой катушке (например, в результате замыкания или размыкания ключа) происходит изменение магнитного поля. Часть магнитных силовых линий этого поля, пересекая витки второй катушки, наводит в ней э. д. с. взаимной индукции

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -\frac{d(\omega_2 \Phi_{12})}{dt} = -\frac{d\Psi_{12}}{dt},$$

где Ψ_{12} — потокосцепление взаимной индукции, которое пропорционально току первой катушки,

$$\Psi_{12} = M i_1, \quad (3.41)$$

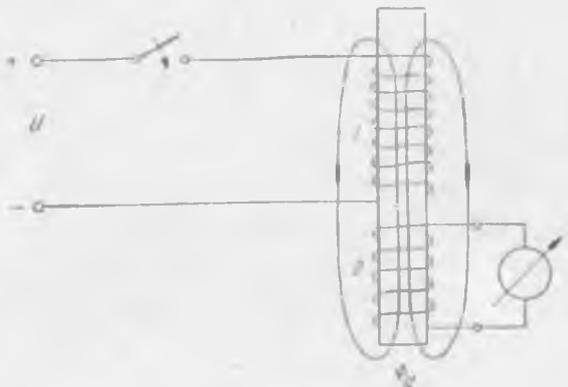
M — коэффициент пропорциональности, называемый статической взаимной индуктивностью.

Кроме статической взаимной индуктивности, различают еще динамическую взаимную индуктивность

$$M_{\mu} = \frac{d\Psi_{12}}{di_1}. \quad (3.42)$$

С учетом соотношения (3.42) выражение для э. д. с. взаимной индукции запишется в виде

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt}. \quad (3.43)$$



Р и с. 3.23

Таким образом, э. д. с. взаимной индукции второй катушки пропорциональна скорости изменения тока в первой. Явление взаимной индукции лежит в принципе действия трансформатора, служащего для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

§ 3.11. Энергия магнитного поля

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую индуктивную катушку и сопротивление r , включенную под напряжение U (рис. 3.24). При замыкании ключа в цепи, кроме э. д. с. источника, будет действовать э. д. с. электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Согласно второму закону Кирхгофа,

$$U + e = ir$$

или

$$U = ir - e = ir + \frac{d\Psi}{dt}. \quad (3.44)$$

Умножим правую и левую часть на idt :

$$Uidt = i^2 r dt + i \cdot d\Psi,$$

где $Uidt$ — энергия, которую отдает источник за время dt ;
 $i^2 r dt$ — элементарная энергия, выделяемая в сопротивлении r ;

$i \cdot d\Psi$ — элементарная энергия, запасаемая в магнитном поле катушки

Таким образом, энергия, поступающая в магнитное поле за бесконечно малый отрезок времени dt , будет равна

$$dW_m = i \cdot d\Psi. \quad (3.45)$$

Полная энергия магнитного поля при изменении потокосцепления от 0 до Ψ выразится формулой

$$W_m = \int_0^{\Psi} i d\Psi. \quad (3.46)$$

В случае, когда потокосцепление пропорционально току

$$\Psi = Li \text{ и } d\Psi = L di,$$

получим, что $W_m = \int_0^i L i di = \frac{Li^2}{2}$. (3.47)

Учитывая, что $\Psi = Li$, энергию магнитного поля можно записать в следующем виде:

$$W_m = \frac{\Psi i}{2}. \quad (3.48)$$

Выразив потокосцепление через магнитную индукцию $\Psi = \omega SB$, а ток через напряженность поля $i = \frac{Hl}{w}$, получим, что

$$W_m = \frac{BH}{2} Sl = \frac{BH}{2} V \quad (3.49)$$

и

$$\frac{W_m}{V} = w_m = \frac{BH}{2}, \quad (3.50)$$

где $V = Sl$ — объем, занятый магнитным потоком. В ферромагнитной среде формула дает приближенный результат в пределах прямолинейного участка кривой намагничивания.

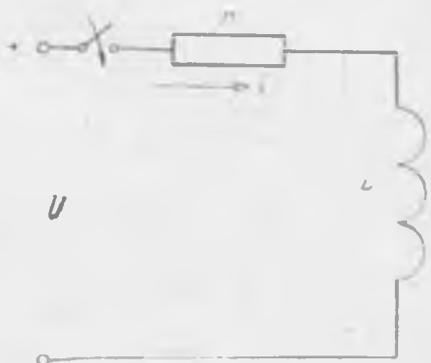


Рис. 3.24

§ 3.12. Электромагнитные силы

Электромагнитными силами называют механические силы взаимодействия двух обтекаемых токами контуров, двух магнитов, магнитного поля и обтекаемого током контура, магнитного поля и ферромагнитного тела. Электромагнитные силы могут возникать при протекании как постоянных, так и переменных токов.

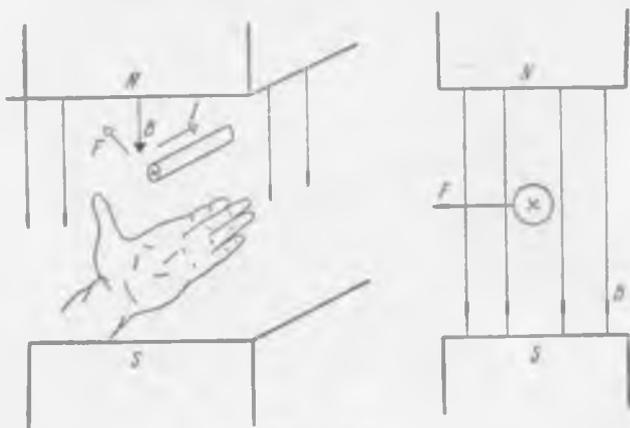


Рис. 3.25

Если в однородном магнитном поле с индукцией B (рис. 3.25) поместить перпендикулярно магнитным силовым линиям проводник с током I , то на него будет действовать электромагнитная сила, равная

$$F = BI l, \quad (3.51)$$

где l — длина проводника, м;

B — магнитная индукция, тл;

I — ток, а;

F — электромагнитная сила, н.

Направление действия силы определяют по правилу левой руки (см. рис. 3.25): если ладонь левой руки расположить таким образом, чтобы магнитные силовые линии входили в нее, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, тогда отогнутый большой палец укажет направление действия электромагнитной силы.

Закон Био — Савара — Лапласа (3.51) устанавливает возможность преобразования электрической энергии в механическую, которое осуществляется в электрических двигателях.

Рассматривая взаимодействие двух проводников, обтекаемых токами, можно воспользоваться той же зависимостью

(3.51). Пусть по двум параллельно расположенным проводникам протекают токи I_1 и I_2 (рис. 3.26). Магнитная индукция в месте расположения первого провода может быть рассчитана по закону полного тока

$$B_2 = \mu_0 H_2 = \mu_0 \cdot \frac{I_2}{2\pi a}.$$

Тогда электромагнитная сила будет равна

$$F = B_2 I_1 = \mu_0 I_1 I_2 \cdot \frac{l}{2\pi a}. \quad (3.52)$$

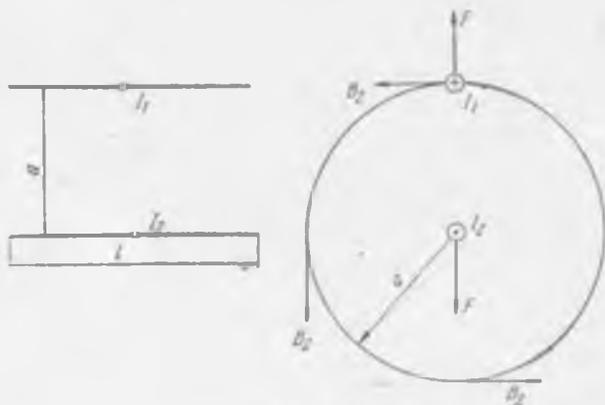


Рис. 3.26

При протекании по проводам переменного тока мгновенное значение электромагнитной силы представится выражением

$$F = \mu_0 i^2 \cdot \frac{l}{2\pi a}. \quad (3.53)$$

§ 3.13. Подъемная сила электромагнита

Пусть якорь электромагнита (рис. 3.27) под действием силы F переместился на расстояние dx . Найдем связь между силой F и изменением энергии магнитного поля dW_m .

Для электрической цепи электромагнита составим уравнение, аналогичное уравнению (3.44),

$$U = ir + \frac{d\psi}{dt}. \quad (3.54)$$

Умножим правую и левую часть уравнения на idt :

$$U idt = i^2 r dt + id\psi$$

или

$$id\Psi = Uidt - i^2 rdt, \quad (3.55)$$

где $id\Psi$ — энергия, получаемая от источника, за вычетом тепловых потерь.

Часть этой энергии идет на покрытие механической работы и на приращение энергии магнитного поля

$$id\Psi = Fdx + dW_M,$$

откуда

$$F = i \frac{d\Psi}{dx} - \frac{dW_M}{dx}. \quad (3.56)$$

При неизменном магнитном потоке, когда $\Psi = \text{const}$ и $\frac{d\Psi}{dx} = 0$, получим

$$F = - \frac{dW_M}{dx}. \quad (3.57)$$

Так как подавляющая часть энергии магнитного поля сосредоточена в объеме воздушного зазора, если он не очень мал, то

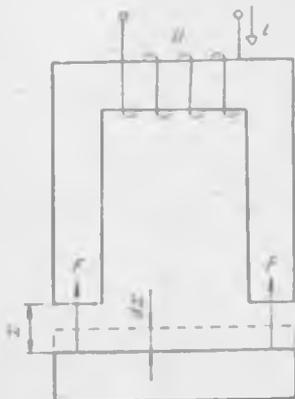


Рис. 3.27

$$W_M = \frac{B H_0}{2} S \cdot x = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot Sx. \quad (3.58)$$

Подъемная сила электромагнита окончательно запишется

$$F = \left| \frac{dW_M}{dx} \right| = \frac{B^2}{2\mu_0} S. \quad (3.59)$$

Выражая силу в килограммах, магнитную индукцию в теслах, площадь поверхности в квадратных сантиметрах, получим

$$F = \frac{1}{9,81} \cdot \frac{B^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-7}} \approx 4B^2 S \cdot 10^4 \text{ кг}. \quad (3.60)$$

Если индукция выражена в гауссах, а площадь поверхности в квадратных сантиметрах, то

$$F = 4 \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \cdot S \text{ кг}. \quad (3.61)$$

Задачи. 3.28. Определить индуктивность тороида, имеющего неферромагнитный сердечник.

Данные тороида: число витков $w=1000$, длина средней силовой линии $l=63$ см, площадь поперечного сечения $S=10$ см².

Ответ: $L=2 \cdot 10^{-3}$ гн.

3.29. Определить статическую индуктивность тороида задачи (3.28), имеющего ферромагнитный сердечник из стали Э42, если по обмотке тороида протекает ток $I=0,63$ а.

Решение. Напряженность магнитного поля тороида

$$H = \frac{Iw}{l} = \frac{0,63 \cdot 1000}{0,63} = 1000 \text{ а/м} = 10 \text{ а/см.}$$

По кривой намагничивания для заданного значения H находим, что $B = 1,35 \text{ тл.}$

Магнитная проницаемость

$$\mu_n = \frac{B}{H} = \frac{1,35}{1000} = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ гн/м.}$$

Относительная магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{\mu_n}{\mu_0} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1070.$$

Статическая индуктивность тороида

$$L = \frac{w^2 S}{l} \mu_n = \frac{w^2 S}{l} \mu_0 \mu = \frac{1000^2 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{0,63} \cdot 1,35 \cdot 10^{-3} = 2,14 \text{ гн.}$$

3.30. Определить индуктивность тороида задачи (3.29) при увеличении тока в два раза.

Ответ: $L = 1,16 \text{ гн.}$

3.31. Определить динамическую индуктивность тороида задачи (3.29).

Решение. Напряженность магнитного поля

$$H_1 = \frac{Iw}{l} = \frac{0,63 \cdot 1000}{0,63} = 1000 \text{ а/м} = 10 \text{ а/см.}$$

По кривой намагничивания стали Э42 находим, что $B_1 = 1,35 \text{ тл.}$ Задаемся несколько большим значением напряженности поля $H_2 = 1200 \text{ а/м}$ и по кривой намагничивания находим, что $B_2 = 1,39 \text{ тл.}$

Динамическая магнитная проницаемость

$$\mu_{дн} = \frac{dB}{dH} \approx \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1} = \frac{1,39 - 1,35}{1200 - 1000} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ гн/м.}$$

Относительная магнитная проницаемость

$$\mu_{д} = \frac{\mu_{дн}}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 160.$$

Динамическая индуктивность

$$L_{д} = \frac{w^2 S}{l} \mu_{дн} = \frac{w^2 S}{l} \mu_0 \mu_{д} = \frac{1000^2 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{63 \cdot 10^{-2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 160 = 0,32 \text{ гн.}$$

3.32. Определить динамическую индуктивность тороида при уменьшении тока в 2 раза.

Ответ: $L_{д} = 0,8 \text{ гн.}$

3.33. Определить статическую индуктивность тороида задачи (3.29) при наличии зазора $\delta = 6,3 \text{ мм.}$

Решение. Магнитная проницаемость сердечника эквивалентного тороида в первом приближении

$$\mu_0 = \frac{l}{\delta} = \frac{63}{0,63} = 100.$$

Напряженность магнитного поля эквивалентного тороида

$$H_0 = \frac{Iw}{l} = \frac{0,63 \cdot 1000}{0,63} = 1000 \text{ а/м.}$$

Магнитная индукция тороида

$$B = \mu_0 \mu_s H_s = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 1000 = 0,1256 \text{ тл.}$$

По кривой намагничивания для данного значения B находим, что

$$H = 0,42 \text{ а/см} = 42 \text{ а/м.}$$

Магнитная проницаемость стали сердечника

$$\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{0,1256}{42} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ гн/м.}$$

Относительная магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 2400.$$

Магнитная проницаемость сердечника эквивалентного тороида во втором приближении (формула 3.39)

$$\mu_s^{(2)} = \frac{\mu}{1 + \frac{\mu}{l}} = \frac{2400}{1 + 2400 \cdot 0,1} = 96,3.$$

Индуктивность тороида с зазором

$$L = \frac{w^2 S}{l} \mu_0 \mu_s = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 96,3 = 0,193 \text{ гн.}$$

3.34. Магнитный поток, сцепленный с одним из двух магнитносвязанных контуров, убывает в течение $\Delta t = 0,1$ сек от $\Phi_1 = 0,001$ вб до $\Phi_2 = 0$. Чему равна э. д. с. взаимной индукции во втором контуре, если число витков в нем $w_2 = 200$.

Ответ: $e_2 = 2$ в.

3.35. Определить коэффициент взаимной индукции M двух магнитносвязанных цепей, когда в одной индуктируется э. д. с. $e = 2$ в при равномерном изменении тока в другой со скоростью $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0,5$ а/сек.

Ответ: $M = 4$ гн.

3.36. Определить э. д. с., наводимую во втором контуре, если ток в первом контуре изменяется по закону $i_1 = 1,6 \sin 314t$ а. Коэффициент взаимной индукции равен $M = 0,2$ гн.

Ответ: $e = -100 \cos 314t$.

3.37. Определить энергию, запасаемую в магнитном поле катушки, обладающей индуктивностью $L = 0,2$ гн при изменении тока от 0 до $I = 1$ а.

Ответ: $W_M = 0,1$ дж.

3.38. По катушке, состоящей из w витков, протекает ток I (рис. 3.28). Определить энергию магнитного поля в стальном сердечнике и воздушном зазоре, если магнитный поток равен $\Phi = 10^{-3}$ вб. Марка стали сердечника Э42.

Ответ: $W = 0,09$ дж, $W_0 = 2,4$ дж.

3.39. Прямолинейный проводник длиной $l = 2$ м помещен в однородное магнитное поле, магнитная индукция которого $B = 0,5$ тл (см. рис. 3.25). По проводнику протекает ток $I = 5$ а. Какой величины механическая сила действует на проводник?

Ответ: $F = 5$ н.

3.40. Какая электромагнитная сила возникает между двумя параллельно расположенными проводниками длиной $l=6$ м, находящимися друг от друга на расстоянии $a=0,4$ м, если по проводникам протекает ток $I=1000$ а (см. рис. 3.26).

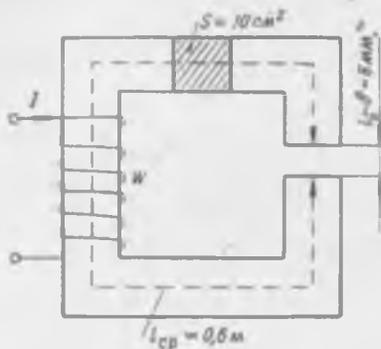


Рис. 3.28

друга на расстоянии $a=0,4$ м, если по проводникам протекает ток $I=1000$ а (см. рис. 3.26).

Ответ: $F=3$ н.

Вопросы для самопроверки

Как определяется статическая индуктивность? Как определяется динамическая индуктивность?

Какая связь существует между индуктивностью и магнитной проницаемостью? Какое соотношение существует между статической и динамической индуктивностью для тороида, имеющего неферромагнитный сердечник? Зависит ли индуктивность такого тороида от величины протекающего тока? Зависит ли индуктивность тороида со стальным сердечником от величины протекающего тока?

Чему равна эквивалентная магнитная проницаемость сердечника тороида с зазором?

В чем заключается явление взаимоиндукции? Чему равна э. д. с. взаимоиндукции? Где используется явление взаимоиндукции?

Чему равна энергия магнитного поля катушки в общем случае при изменении потокоцепления от 0 до Ψ ?

Чему равна энергия магнитного поля катушки, имеющей неферромагнитный сердечник?

Что такое электромагнитная сила, в каких единицах она измеряется?

Как определить направление действия электромагнитной силы?

Какая связь существует между подъемной силой электромагнита и изменением энергии поля? От чего зависит подъемная сила электромагнита. Как изменится подъемная сила, если зазор увеличить в 2 раза? Как изменится подъемная сила, если ток увеличить в 2 раза?

ГЛАВА 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 4.1. Понятие о переменном токе

Начало практического применения электромагнитных явлений связано с постоянным током. Переменный ток был впервые использован П. Н. Яблочковым в 1876 г. в дуговом источнике света — электрической свече. Это изобретение послужило толчком к борьбе между учеными — сторонниками переменного и сторонниками постоянного тока, обострившейся ожесточенной конкуренцией капиталистических фирм, выпускавших электротехническую продукцию либо для установок постоянного, либо для переменного тока. Датой победы переменного тока над постоянным и начала широкого практического его использования в промышленности следует считать 1891 г. — год демонстрации на Международной электротехнической выставке М. О. Доливо-Добровольским электропередачи переменного тока со всеми ее звеньями — генератором переменного тока, повышающим трансформатором, асинхронным двигателем.

Переменный ток имеет целый ряд преимуществ перед постоянным током:

- а) легкость и экономичность получения больших количеств энергии посредством генератора переменного тока;
- б) возможность с помощью трансформаторов экономичного и простого увеличения и уменьшения напряжения и соответственно уменьшения и увеличения тока (это чрезвычайно важно для передачи электрической энергии на расстояния);
- в) экономичность и простота распределения и преобразования электрической энергии в механическую (применение асинхронных двигателей).

Электромагнитные волны распространяются со скоростью порядка $300\,000$ км/сек (скорость света). С такой же скоростью распространяется электромагнитная энергия. Передача электрической энергии на расстояния производится практичес-

ки мгновенно. Электрическая энергия из всех видов энергии самая удобная для передачи, распределения и преобразования.

Указанные преимущества переменного тока привели к широкому применению его в различных отраслях промышленности и в быту. Наибольшее количество электротехнических устройств рассчитывается на электрический ток стандартной частоты 50 гц — генераторы переменного тока (машинные генераторы), трансформаторы, асинхронные и синхронные двигатели, осветительные цепи, различные электронагревательные приборы и т. д.

Переменные токи высокой частоты широко применяются в технике связи (10^2 — 10^3 гц), телевидении, телеуправлении, радиотехнике (10^4 — 10^{12} гц). Переменные токи повышенной частоты от нескольких сотен до нескольких тысяч гц используются в металлургии, металлообработке. Токи пониженной частоты (25 — $16\frac{2}{3}$ гц) применяют при электрификации железных дорог.

Ввиду указанных преимуществ электрификация страны осуществляется в основном на переменном токе. Электрификация играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, осуществлении всего современного технического прогресса, она является стержнем строительства экономики коммунистического общества.

Изменяющиеся во времени токи в электрических цепях могут быть как при установившихся режимах, так и при переходе от одного установившегося режима к другому (переходные токи). Переходные токи появляются при включении, отключении электрических цепей, изменении конфигурации цепей или изменении величины сопротивлений их, а также при подаче кратковременных импульсов напряжений. Своим существованием переходные токи обязаны наличию индуктивностей и емкостей в электрических цепях. Индуктивность — это своеобразная мера инерции электрической цепи, задерживающая во времени всякое изменение тока. Емкость — мера упругости электрической цепи, напряжение на емкости не может меняться скачкообразно.

При установившихся режимах закон изменения во времени токов повторяется периодически в течение сколь угодно длительного времени. Установившиеся периодические токи могут изменяться во времени по любому закону. В технике под переменными токами понимают токи, периодически изменяющиеся во времени по синусоидальному закону.

Переменные токи, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону, возникают в линейных электрических цепях при действии в них электродвижущих сил (э. д. с.), изменяющихся во времени также по синусоидальному закону.

Источниками синусоидально изменяющихся во времени э. д. с. (переменных э. д. с.) служат или машинные генераторы, называемые просто генераторами переменного тока, или ламповые генераторы, предназначенные для получения токов высокой частоты.

Принцип получения переменных э. д. с. в генераторах переменного тока основан на законе электромагнитной индукции, открытом Фарадеем в 1831 г.

По закону Фарадея, э. д. с., наведенная в замкнутом контуре, равна скорости изменения магнитного потока, сцепляющегося с этим контуром:

$$e = - \frac{d\psi}{dt}.$$



Рис. 4.1

Принцип работы простейшего генератора переменного тока легко проследить на примере равномерного вращения со скоростью ω прямоугольной рамки в однородном магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами (рис. 4.1).

Пусть в какой-то момент времени рамка повернута на угол α относительно горизонтальной плоскости, тогда поверхность рамки пересекается не всем потоком, а лишь его частью

$$\psi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

где B — магнитная индукция — плотность магнитного потока;
 S — поверхность, ограниченная рамкой.

При равномерном вращении рамки со скоростью ω угол поворота в любой момент времени $\alpha = \omega t$.

Таким образом, магнитное потокоцепление с вращающейся рамкой изменяется во времени по косинусоидальному закону

$$\psi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t = \Psi_m \cos \omega t.$$

При $t=0$ рамка расположена горизонтально, поверхность рамки пронизывается максимальным магнитным потоком; при вертикальном положении — $\alpha = 90^\circ$, магнитные силовые линии скользят вдоль рамки, не пересекая ее.

Изменение во времени магнитного потока, сцепляющегося

с рамкой, наводит в рамке, согласно закону Фарадея, электродвижущую силу

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = \omega W_m \sin \omega t = 2\pi f W_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t.$$

При равномерном вращении рамки наведенная в рамке э. д. с. переменна, изменяется во времени по закону синуса.

В промышленных генераторах переменного тока вращается не рамка, а постоянное магнитное поле (создаваемое обмоткой ротора), которое, пересекая неподвижные витки обмотки, уложенной в пазах статора, наводит в этих витках э. д. с., изменяющиеся во времени по синусоидальному закону (см. главу 11).

§ 4.2. Основные характеристики синусоидально изменяющихся напряжений, токов и э. д. с.

Значения э. д. с., токов и напряжений в любой момент времени — t -мгновенные значения — записывают маленькими буквами e , i , u .

При синусоидальном законе изменения во времени мгновенные значения имеют вид:

$$\begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e); \\ i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i); \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Наибольшие значения мгновенных величин называют амплитудами:

$$\begin{aligned} E_m &\text{ — амплитуда э. д. с.;} \\ I_m &\text{ — амплитуда тока;} \\ U_m &\text{ — амплитуда напряжения.} \end{aligned}$$

Аргументы синуса получили наименования фазных углов или просто фаз, они определяют «состояние» функции в каждый момент времени:

$$\begin{aligned} \omega t + \psi_e &\text{ — фаза э. д. с.;} \\ \omega t + \psi_i &\text{ — фаза тока;} \\ \omega t + \psi_u &\text{ — фаза напряжения.} \end{aligned}$$

Фазы, рассматриваемые в начальный момент времени ($t=0$), именуют начальными фазами:

$$\begin{aligned} \psi_e &\text{ — начальная фаза э. д. с.;} \\ \psi_i &\text{ — начальная фаза тока;} \\ \psi_u &\text{ — начальная фаза напряжения.} \end{aligned}$$

При графическом построении положительные начальные фазы отсчитывают влево от начала координат (рис. 4.2), отрицательные — вправо.

Наименьший промежуток времени, по истечении которого мгновенные значения периодической э. д. с., напряжения или тока повторяются в той же последовательности, называют п е-

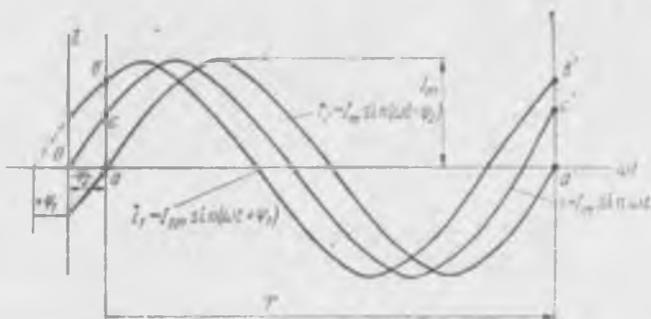


Рис. 4.2

риодом T э. д. с., напряжения или тока. В течение периода T фаза мгновенной величины изменяется на 2π

$$\omega T = 2\pi.$$

Ординаты двух произвольных точек графика $i = f(t)$ с абсциссами, отличающимися на T , одинаковы. Для $i_1 = -I_m \sin(\omega t + \psi_1)$ на рис. 4.2 — это ординаты ab и $a'b'$, для $i_2 = I_m \sin \omega t - ac$ и $a'c'$.

Величина ω называется угловой частотой переменного тока, она показывает изменение фазы в единицу времени; измеряется ω в радианах, деленных на секунду.

Число периодов в секунду обозначают буквой f — частота переменного тока

$$f = \frac{1}{T}, \quad (4.2)$$

откуда

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (4.3)$$

Частота переменного тока f измеряется в герцах; 1гц равен одному периоду в секунду. Чем больше частота f , тем меньше период колебаний T (рис. 4.3).

Кроме мгновенных и амплитудных значений, очень важной

характеристикой переменного тока является среднее квадратичное значение тока — действующее значение тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (4.4)$$

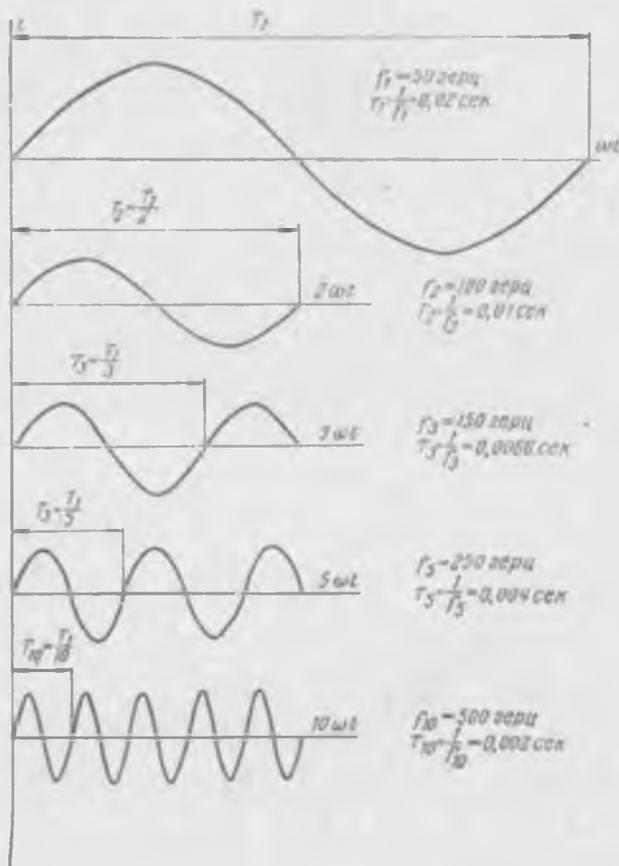


Рис. 4.3

Действующее значение тока очень удобно для оценки теплового действия тока и механических сил — электромагнитных сил, так как и тепловое действие и величина электромагнитных сил пропорциональны квадрату тока, среднее значение их определяется среднеквадратичным значением.

Действующее значение переменного тока численно равно такому постоянному току, который за время, равное

периоду T , выделяет в сопротивлении r такое же количество тепла, как и данный переменный ток за то же время в таком же сопротивлении

$$\int_0^T i^2 r dt = I^2 r T.$$

При синусоидальном токе действующее значение равно

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \left[\frac{I_m^2}{2} t - \frac{\sin 2\omega t}{2 \cdot 2\omega} \right]_0^T} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Действующее значение синусоидального тока в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитуды. По аналогии

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Среднее за период значение электромагнитной силы (3.53), действующей на провода с одним и тем же переменным током, определится по формуле

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \mu_0 I_m^2 \sin^2 \omega t \frac{l}{2\pi a} dt = \mu_0 \frac{l}{2\pi a} I^2.$$

Из полученного выражения видно, что действующее значение переменного тока характеризует электромагнитные силы.

Измерительные приборы для цепей переменного тока обычно отградуированы на показания действующих значений токов и напряжений.

Иногда возникает необходимость в использовании среднего значения переменных величин. Среднее значение синусоидального тока за период равно нулю и, естественно, интереса не представляет. Под средним значением в цепи переменного тока понимают среднее значение по модулю, численно равное среднему значению за половину периода:

$$\begin{aligned} I_{cp} &= \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt = \left. \frac{-2I_m}{T} \cos \omega t \right|_0^{\frac{T}{2}} = \\ &= \frac{2}{\pi} I_m. \end{aligned} \quad (4.6)$$

По аналогии

$$U_{cp} = \frac{2}{\pi} U_m; \quad E_{cp} = \frac{2}{\pi} E_m.$$

Отношение амплитуды к действующему значению называют коэффициентом амплитуды

$$k_a = \frac{I_m}{I}. \quad (4.7)$$

Отношение действующего значения к среднему значению по модулю определяет коэффициент формы

$$k_\phi = \frac{I}{I_{cp}}. \quad (4.8)$$

Для синусоидально изменяющихся во времени величин

$$k_a = \sqrt{2} = 1,41, \quad (4.9)$$

$$k_\phi = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Если периодически изменяющиеся ток или напряжение отличны от синусоиды, то коэффициенты формы и амплитуды имеют различные величины. Чем острее кривая, тем большие значения принимают коэффициенты формы и амплитуды.

Задачи. 4.1. Как изменятся и чему станут равными период T приложенного синусоидального напряжения и его угловая частота ω , если увеличить частоту $f=50$ гц в сто раз, уменьшить эту частоту в два раза?

$$\text{Ответ: } T=2 \cdot 10^{-4} \text{ сек, } \omega=31400 \text{ 1/сек;} \\ T=0,04 \text{ сек, } \omega=157 \text{ 1/сек.}$$

4.2. Каково показание вольтметра электромагнитной системы, если этот прибор подключен к сети синусоидального напряжения с амплитудным значением $U_m=282$ в?

$$\text{Ответ: } U=200 \text{ в.}$$

Вопросы для самопроверки

- Каковы преимущества переменного тока перед постоянным?
- Укажите области применения переменных токов различных частот.
- Что понимают под «переменным» током?
- При каких условиях в электрической цепи возникает синусоидальный ток?
- Каков принцип действия генератора переменного (синусоидального) напряжения?
- Напишите выражение мгновенного тока.
- Что называют амплитудой тока?
- Что такое «фаза», «начальная фаза»?
- Что такое период?
- Что понимают под угловой частотой переменного тока?
- Что такое частота переменного тока, в каких единицах она измеряется?
- Что называется действующим значением переменного тока?
- Почему действующее значение переменного тока является одной из основных характеристик электрических величин? Какие еще характеристики электрических токов и напряжений вы знаете?
- Что понимают под средним значением переменного тока?
- Что такое коэффициент амплитуды, коэффициент формы?
- Каковы значения коэффициентов амплитуды и формы для синусоидальных токов и напряжений?

§ 4.3. Законы Кирхгофа для цепей переменного тока. Применение векторов

Расчет электрических цепей переменного тока, как и цепей постоянного тока, производится по законам Кирхгофа. Прямая задача расчета цепей состоит в определении токов в ветвях и напряжений на отдельных элементах схемы.

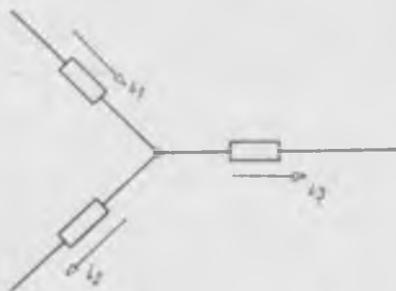


Рис. 4.4

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма мгновенных значений токов в ветвях, образующих узел электрической цепи, равна нулю:

$$\sum_1^n i = 0.$$

Так, например, для узла, изображенного на рис. 4.4, по первому закону Кирхгофа можно записать следующее соотношение:

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0.$$

Считают ток положительного знака, если в рассматриваемый момент времени он направлен к узлу; если ток направлен от узла — он отрицателен. Направления токов в цепях переменного тока условны и задаются ими произвольно. Но если направления токов приняты, то при дальнейших расчетах необходимо учитывать эти направления.

В линейных цепях переменного тока при установившемся режиме и синусоидальном приложенном напряжении каждое из указанных мгновенных значений, как будет доказано ниже, представляет собой синусоидальную функцию

$$I_1 m \sin(\omega t + \psi_1) - I_2 m \sin(\omega t + \psi_2) - I_3 m \sin(\omega t + \psi_3) = 0. \quad (4.10)$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма мгновенных значений э. д. с., действующих в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме мгновенных значений падений напряжений на участках этого замкнутого контура.

Мгновенные значения э. д. с. и напряжений так же, как и токи, — синусоидальные функции времени.

Расчислять электрические цепи аналитически при помощи тригонометрических уравнений, отображающих первый и второй законы Кирхгофа для мгновенных значений, громоздко и неудобно.

Следует обратить внимание на то, что максимумы синусоидальных функций могут наступать неодновременно (вы-

ражение 4.10), поэтому нельзя складывать алгебраически амплитудные значения.

Для упрощения расчетов цепей переменного тока вводится условное изображение синусоидальных функций векторами.

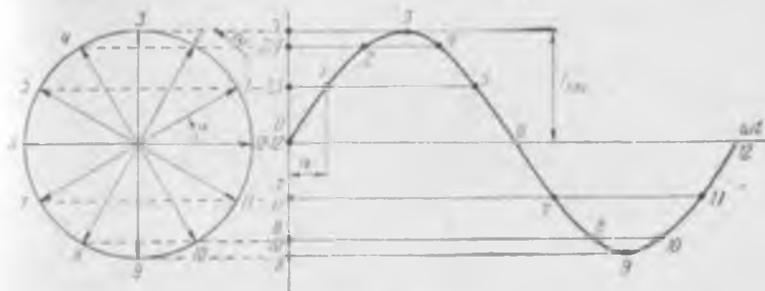


Рис. 4.5

Пусть длина вектора равна амплитуде тока I_m , а сам вектор вращается на плоскости xoy чертежа с постоянной угловой скоростью ω против часовой стрелки.

Проекция конца вектора на ось ординат совершает синусоидальные колебания, и каждое мгновенное значение тока, соответствующее моменту времени t и фазовому углу ωt , можно рассматривать как проекцию на ось ординат вектора, повернувшегося на фазовый угол ωt относительно оси абсцисс (рис. 4.5).

Все три синусоиды тока выражения (4.10) могут быть условно представлены векторами длины I_{1m} , I_{2m} , I_{3m} , сдвинутыми относительно оси абсцисс на соответствующие фазовые углы. Если построение производится для момента времени $t=0$, то фазовые углы равны начальным фазам ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 (см. рис. 4.6).

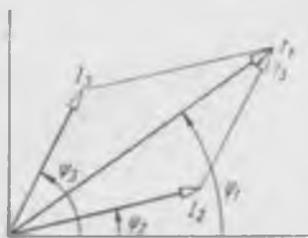


Рис. 4.6

Векторы, вращаясь с одной и той же угловой скоростью ω , неподвижны друг относительно друга.

Первый закон Кирхгофа при изображении синусоидальных функций векторами запишется так:

$$\vec{I}_{1m} - \vec{I}_{2m} - \vec{I}_{3m} = 0. \quad (4.11)$$

Сумма векторов амплитудных значений токов в ветвях, образующих узел электрической цепи, равна нулю.

Для синусоидальных токов действующие значения в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных (4.5).

Разделив выражение (4.11) на $\sqrt{2}$, получим первый закон Кирхгофа для действующих значений.

Сумма векторов действующих значений токов в ветвях, образующих узел электрической цепи, равна нулю:

$$\vec{I}_1 - \vec{I}_2 - \vec{I}_3 = 0. \quad (4.12)$$

Аналогично можно сформулировать второй закон Кирхгофа: *сумма векторов амплитудных (действующих) значений э. д. с., включенных в замкнутом контуре, равна сумме векторов амплитудных (действующих) значений напряжения на участках этого замкнутого контура:*

$$\sum_{k=1}^{k=n} \vec{E}_k = \sum_{s=1}^{s=n} \vec{U}_s. \quad (4.13)$$

Условное изображение синусоидально изменяющихся во времени токов и напряжений при помощи векторов позволило записать в «векторной» форме первый и второй законы Кирхгофа, что привело к особому «векторному» правилу сложения действующих значений токов напряжений и э. д. с. Применение в этой форме законов Кирхгофа дает возможность графически, достаточно просто и наглядно рассчитывать несложные электрические цепи, определять для каждого участка цепи действующие значения и фазы токов и напряжений. При использовании векторных диаграмм все расчеты ведутся для действующих значений токов и напряжений. Из расчетов исключены, таким образом, тригонометрические функции, что дает упрощение.

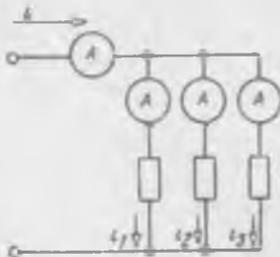


Рис. 4.7

Задачи. 4.3. Мгновенные значения токов в трех включенных параллельно ветвях равны (рис. 4.7):

$$i_1 = 6 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ а};$$

$$i_2 = 4 \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ а};$$

$$i_3 = 5 \sin(\omega t - 60^\circ) \text{ а}.$$

Применяя изображение синусоидальных величин векторами, построить векторную диаграмму токов для данной цепи (графически записать первый закон Кирхгофа). Определить показание амперметра I_0 и записать мгновенное выражение тока в неразветвленной части цепи.

Ответ: $I_0 = 7,5 \text{ а}$ (рис. 4.8).

4.4. Найти показание амперметра в неразветвленной части цепи (рис. 4.9), если показания амперметров в параллельных ветвях одинаковы — $2,82 \text{ а}$; начальная фаза тока в первой ветви -45° , а во второй $+45^\circ$. Построить векторную диаграмму. Записать мгновенные значения токов.

Ответ: $I_0 = 4 \text{ а}$.

4.5. На векторной диаграмме в масштабе показаны векторы тока в параллельных ветвях (рис. 4.10). Определить вектор тока в неразветвленной части цепи. Записать мгновенные значения токов во всех ветвях

$$m_x = 1,50 \frac{a}{cm}$$

Ответ: $I_0 = 8 a$.

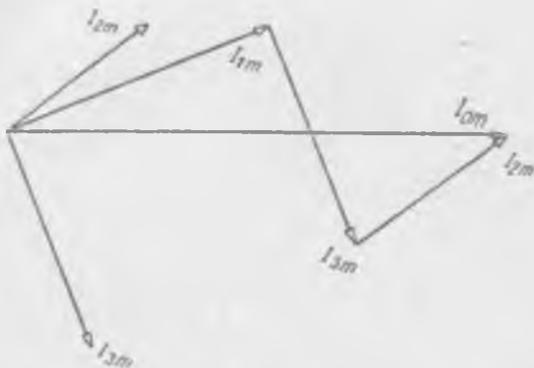


Рис. 4.8

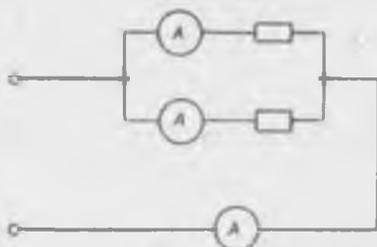


Рис. 4.9

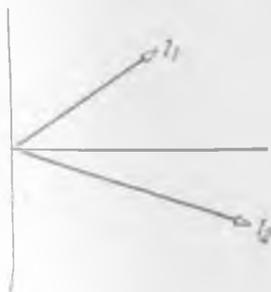


Рис. 4.10

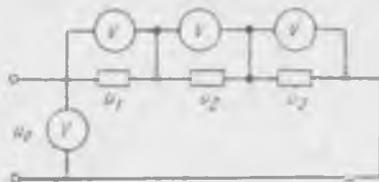


Рис. 4.11

4.6. Цепь (рис. 4.11) состоит из трех последовательно включенных сопротивлений, мгновенные значения падений напряжений на которых равны:

$$u_1 = 141 \sin(\omega t - 60^\circ) \text{ в};$$

$$u_2 = 141 \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ в};$$

$$u_3 = 141 \sin \omega t \text{ в}.$$

Изобразить графически, используя изображение синусоидальных функций векторами, второй закон Кирхгофа для действующих значений напряжений. Найти показания всех включенных на схеме вольтметров. Записать выражение мгновенного значения, приложенного к цепи напряжения.

Ответ: $U_1=U_2=U_3=100$ в; $U_0=200$ в; рис. 4.12.

4.7. Для двух последовательно включенных сопротивлений известны действующие значения напряжений $U_1=100$ в, $U_2=260$ в и начальные фазы напряжений $\Psi_1=60^\circ$, $\Psi_2=0^\circ$. Определить действующее значение приложенного напряжения. Записать мгновенное выражение всех напряжений данной цепи. Построить векторную диаграмму напряжений и построить графики u_1 , u_2 , $u_0=f(t)$.

Ответ: $U_0=300$ в.

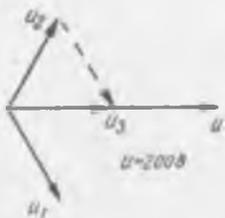


Рис. 4.12

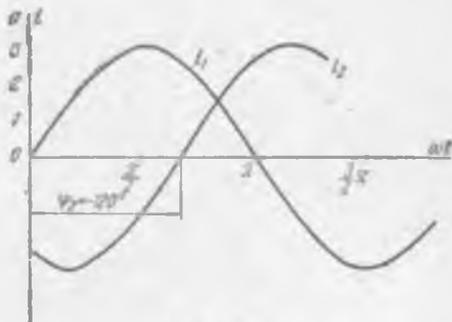


Рис. 4.13

4.8. Построены мгновенные значения токов, удовлетворяющие уравнению

$$i_1 + i_2 = i_3,$$

где $i_1 = 6 \sin \omega t$;
 $i_2 = 5 \sin (\omega t + 30^\circ)$.

Построить векторные диаграммы для моментов времени:

$$t_1 = 0; t_2 = \frac{T}{4}; t_3 = \frac{T}{2}; t_4 = \frac{3}{2} T.$$

Определить действующее значение тока I_3 .

Ответ: $I_3 = 7,5$ а.

4.9. Определить начальную фазу и амплитуду тока i_3 , если

$$i_3 = i_1 + i_2.$$

Мгновенные значения i_1 и i_2 заданы графиками (рис. 4.13).

Решение выполнить: а) аналитически; б) графически.

Ответ: $\Psi_3 = 120^\circ$; $I_{3m} = 3$ а.

4.10. Каждый из заданных токов (рис. 4.13) представить вектором и определить путем построения векторной диаграммы начальную фазу и амплитуду тока i_3 , если $i_3 = i_1 + i_2$.

Ответ: $\Psi_3 = 120^\circ$; $I_{3m} = 3$ а.

Вопросы для самопроверки

По каким законам рассчитываются электрические цепи?

Как читается первый закон Кирхгофа для мгновенных значений?

Как формулируется второй закон Кирхгофа для мгновенных значений?

В чем состоит принцип, на котором основано изображение векторами синусоидально изменяющихся величин? Какой смысл заключается в понятии «вектор тока», «вектор напряжения»?

Сформулируйте первый закон Кирхгофа для амплитудных (действующих) значений.

Сформулируйте второй закон Кирхгофа для амплитудных (действующих) значений.

В чем состоит целесообразность изображения синусоидальных функций токов и напряжений векторами? Какие упрощения дает применение векторных диаграмм?

§ 4.4. Электромагнитные процессы в цепях переменного тока

Особенности электромагнитных процессов в цепях переменного тока по сравнению с цепями постоянного тока обусловлены изменением во времени магнитных и электрических полей, связанных с цепью.

При переменном токе созданное им потокосцепление самоиндукции также переменное

$$\psi_L = Li = LI_m \sin \omega t. \quad (4.14)$$

Но при всяком изменении магнитного потока во времени в контуре, с которым сцепляется этот магнитный поток, наводится, согласно закону электромагнитной индукции, э. д. с. самоиндукции

$$\begin{aligned} e_L &= - \frac{d\psi_L}{dt} = - \frac{d(Li)}{dt} = - \frac{d(LI_m \sin \omega t)}{dt} = \\ &= - I_m \omega L \cos \omega t = - E_m \cos \omega t = E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (4.15)$$

Э. д. с. самоиндукции существует только тогда, когда изменяется во времени магнитный поток самоиндукции, а следовательно, тогда, когда изменяется во времени ток цепи.

В выражении э. д. с. самоиндукции множитель при $\cos \omega t$ представляет собой амплитуду э. д. с. самоиндукции

$$E_m = I_m \omega L. \quad (4.16)$$

Знаку минус в выражении э. д. с. самоиндукции придают определенный физический смысл, он отображает принцип электромагнитной инерции в электрических цепях. Магнитный поток стремится сохранить неизменной свою величину — при всяком изменении магнитного потока в контуре, с которым сцепляется этот поток, наводится э. д. с. такого направления, которое препятствует причине, вызвавшей изменение этого потока (закон Ленца). Мерой электромагнитной инерции служит индуктивность L .

Полученная зависимость (4.16) есть закон Ома для участка цепи: ωL , учитывающее реакцию самоиндукции цепи, на-

зывают индуктивным сопротивлением, обозначают буквой x_L и измеряют в омах:

$$x_L = \omega L. \quad (4.17)$$

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте тока в цепи. Чем больше частота, тем больше индуктивное сопротивление. Величина, обратная индуктивному сопротивлению, называется индуктивной проводимостью

$$b_L = \frac{1}{\omega L}.$$

(Это справедливо лишь для ветви, у которой $r=0$.)

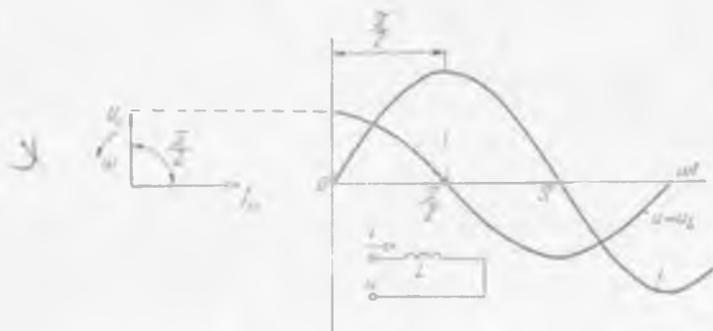


Рис. 4.14

В цепи постоянного тока в установившемся режиме магнитный поток постоянен, э. д. с. самоиндукции не возникает, индуктивного сопротивления нет, индуктивность себя не проявляет. Но при всяком изменении установившегося режима в цепи постоянного тока проявляется наличие индуктивности, возникают э. д. с. самоиндукции, стремящиеся препятствовать изменению токов в ветвях, обладающих индуктивностью.

В электрической цепи, обладающей только индуктивностью, при синусоидальном токе возникает э. д. с. самоиндукции (4.15), которую уравновешивает внешнее, приложенное к цепи напряжение:

$$u = -e_L = E_m \cos \omega t = I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (4.18)$$

Как видно, фазы u тока и напряжения различны. Напряжение «опережает» по фазе на $\frac{\pi}{2}$ ток в индуктивности, или ток «отстает» по фазе на $\frac{\pi}{2}$ от приложенного напряжения.

На рис. 4.14 видно, что максимум тока и напряжения наступает неодновременно. Это обусловлено «сдвигом фаз».

Но всякую изменяющуюся во времени по закону синуса функцию можно представить условно вектором (§ 4.3), поэтому для данного случая можно также построить векторную диаграмму (рис. 4.14). Диаграмма построена для $t=0$.

Индуктивность L — электромагнитная инерция цепи, она задерживает всякое изменение тока во времени.

Электромагнитной инерцией объясняется отставание по фазе тока относительно напряжения на участках цепи, обладающих индуктивностью.



Рис. 4.15

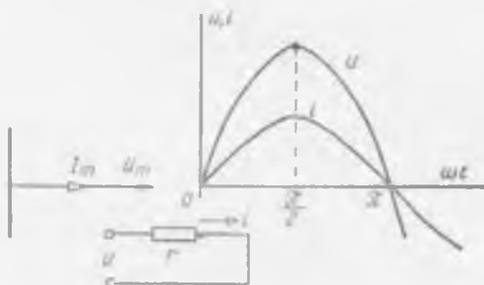


Рис. 4.16

Индуктивное сопротивление x по своей физической природе отличается от электрического сопротивления

$$r = \rho \frac{l}{S}, \quad \sphericalangle \quad (4.19)$$

которое в цепях переменного тока называют активным сопротивлением. Подобное сопротивление в цепи постоянного тока называют омическим сопротивлением. При параллельных соединениях удобно пользоваться понятием проводимости. В частном случае, когда индуктивность и емкость цепи малы и ими можно пренебречь и учитывать только активное сопротивление цепи, активную проводимость можно определить как величину, обратную активному сопротивлению.

Активное сопротивление может быть несколько больше омического. Причиной этого является поверхностный эффект. При переменном токе в проводнике создается переменный магнитный поток в пространстве, окружающем проводник, а также внутри самого проводника (рис. 4.15). Центральная часть проводника пересекается внешним магнитным потоком и потоком, расположенным внутри проводника. Поверхностные слои проводника охватываются только внешним потоком. В центральной части проводника будет находиться большая по величине э. д. с. самоиндукции, чем в слоях, рас-

положенных ближе к поверхности проводника. Наведенные э. д. с. создают сопротивление в центральной части провода большее, чем у поверхности проводника. Ток вследствие этого вытесняется к поверхности проводника, распределяется неравномерно по его сечению. Плотность тока становится неодинаковой в различных точках поперечного сечения проводника: в центре — меньше, у поверхности — больше.

Центральная часть сечения почти совсем не используется, сечение оказывается как бы меньше, а тем самым сопротивление проводника возрастает.

Явление поверхностного эффекта усиливается при увеличении частоты f тока, магнитной проницаемости μ материала проводника, сечения проводника и величины тока.

При больших μ возрастает способность пропускания магнитных силовых линий, увеличивается магнитный поток внутри провода и более резко проявляется поверхностный эффект.

При выполнении проводов из стали необходим учет поверхностного эффекта даже при промышленной частоте $f = 50$ гц и малых сечениях. Для медных проводов диаметром $d < 1$ см поверхностный эффект можно не учитывать при $f = 50$ гц и считать активное сопротивление равным омическому.

Явление поверхностного эффекта используют в технике для поверхностной закалки стальных изделий.

Активным сопротивлением в цепях переменного тока обладают не только те элементы ее, в которых электромагнитная энергия преобразуется в тепловую, но и все элементы, в которых происходит необратимое преобразование электромагнитной энергии в другие виды энергии — механическую, световую, химическую и т. д.

Активное сопротивление — это параметр электрической цепи; оно обозначается на электрических схемах прямоугольником (рис. 4.16). Измеряется активное сопротивление в омах. Ток и напряжение элемента, обладающего только активным сопротивлением, совпадают по фазе рис. 4.16

$$u = ir = I_m r \sin \omega t = U_m \sin \omega t.$$

Ток и напряжение, имеющие одну и ту же фазу, изобразятся в виде двух векторов, совпадающих по направлению (см. рис. 4.16).

Третьим параметром электрической цепи является емкость C — способность конденсатора накапливать заряд q при подведении к его обкладкам разности напряжений u :

$$C = \frac{q}{u}. \quad (4.20)$$

Емкость — параметр электрической цепи, который зависит от геометрической формы, размеров конденсатора и физических свойств диэлектрика. Если диэлектрик между обкладками конденсатора не выполнен из сегнетоэлектрика, то емкость не зависит ни от величины заряда, ни от разности напряжений на обкладках конденсатора. Условное изображение емкости на схемах показано на рис. 4.17.

Под воздействием внешнего электрического поля напряженности E все связанные заряды диэлектрика начинают смещаться и образовавшиеся диполи принимают определен-

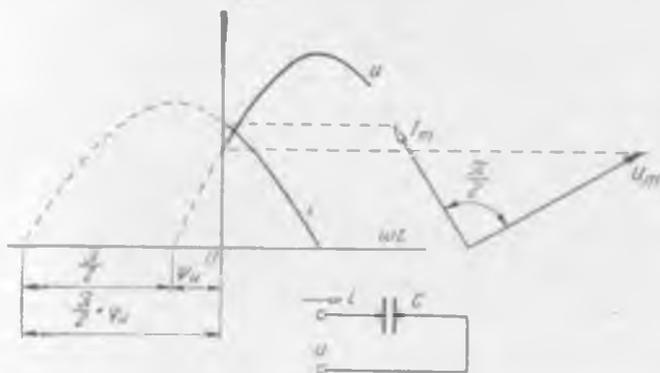


Рис. 4.17

ную ориентацию в пространстве — диэлектрик приходит в «упругое» состояние.

Движение свободных зарядов в проводнике называют током проводимости, а перемещение связанных зарядов в диэлектрике — током смещения. Ток смещения может быть только в том случае, если к конденсатору приложено изменяющееся во времени напряжение

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dCu}{dt} = C \frac{du}{dt}. \quad (4.21)$$

Если приложенное к цепи напряжение изменяется по закону

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

то

$$\begin{aligned} i &= C \frac{d[U_m \sin(\omega t + \psi_u)]}{dt} = \omega C U_m \cos(\omega t + \psi_u) = \\ &= \omega C U_m \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (4.22)$$

На рис. 4.17 представлены мгновенные значения u и i , на этом же рисунке изображена соответствующая векторная диаграмма.

Наибольшее значение тока — его амплитуда равна

$$I_m = \omega C U_m,$$

где $\omega C = b_c$ — емкостная проводимость.

Если разделить на $\sqrt{2}$ левую и правую части этого соотношения, то получим

$$I = \omega C U = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}.$$

Знаменатель полученного выражения называют емкостным сопротивлением

$$x_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (4.23)$$

Емкостное сопротивление, учитывающее реакцию емкости, обратно пропорционально угловой частоте: чем выше частота, тем меньше емкостное сопротивление. Для постоянного тока, частоту которого можно считать равной нулю, емкостное сопротивление равно бесконечности — конденсатор «не пропускает» постоянный ток.

Характерной особенностью переменного тока идеальной цепи, обладающей лишь емкостью ($C \neq 0, r = 0, L = 0$), является то, что максимум тока наступает на четверть периода $\left(\frac{T}{4}\right)$ раньше, чем максимум напряжения на конденсаторе. Этот сдвиг во времени на $\frac{T}{4}$ соответствует опережению по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

Опережение тока в цепи с емкостями можно объяснить «упругими» свойствами диэлектрика конденсатора — стремлением связанных зарядов диэлектрика при всяком малейшем уменьшении внешнего напряжения на обкладках конденсатора возвратиться к исходному хаотическому состоянию.

Индуктивное и емкостное сопротивления в отличие от активного называют реактивными сопротивлениями, сопротивлениями неактивными, оказывающими противодействие переменному току электрической цепи, но противодействие особое, несвязанное с преобразованием электрической энергии в тепловую. Реактивные сопротивления зависят от частоты приложенного напряжения и создают временные сдвиги фаз.

Задачи. 4.11. В однородном магнитном поле, магнитная индукция которого $B = 0,2$ тл, вращается с постоянной угловой скоростью $n = 1500$ об/мин рамка, состоящая из 30 витков. Поверхность рамки 30 см².

Записать выражения: магнитного потока, пересекающего поверхность рамки; э. д. с., наводимой в рамке.

Ответ: $e = 4500 \sin \omega t$.

4.12. Чему равно индуктивное сопротивление катушки, если индуктивность катушки 318 мГн, а частота тока $f_1 = 50$ Гц. Как изменится сопротивление катушки, если частота станет равной $f_2 = 500$ Гц.

Ответ: $x_1 = 100$ Ом; $x_2 = 1000$ Ом.

4.13. В идеальной индуктивной катушке ($r = 0$) мгновенное значение тока $i = 5,1 \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right)$, а напряжения $u = 120 \sin 314t$.

Определить индуктивность катушки.

Ответ: $L = 75$ мГн.

4.14. Каково емкостное сопротивление цепи, если емкость конденсатора $C = 40$ мкФ, а частота приложенного напряжения $f_1 = 50$ Гц? Как изменится сопротивление, если частота приложенного напряжения возрастет и станет равной $f_2 = 1000$ Гц?

Ответ: $x_1 = 80$ Ом; $x_2 = 4$ Ом.

4.15. К цепи приложено напряжение $u'_j = 100 \sin \omega t$, ток в цепи:

$$i = 10 \sin \omega t; \quad i = 10 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \quad i = 10 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Какие сопротивления по величине и характеру включены в цепь?

Ответ: 10 Ом, активное сопротивление;
10 Ом, индуктивное сопротивление,
10 Ом, емкостное сопротивление.

Вопросы для самопроверки

В чем состоит причина, определяющая различие электромагнитных процессов цепей переменного и постоянного токов?

Что такое э. д. с. самоиндукции? Какие физические процессы возникают в электрической цепи, содержащей только индуктивность, если цепь находится под синусоидальным напряжением?

В чем состоит принцип электромагнитной инерции?

Что представляет собой индуктивное сопротивление? Как получить выражение индуктивного сопротивления?

Как изменится величина индуктивного сопротивления, если частота приложенного к цепи напряжения увеличится в три раза? К какой величине стремится индуктивное сопротивление, если частота стремится к нулю (постоянный ток)?

Чем вызвано отставание по фазе тока от напряжения в цепи с индуктивностью?

Как в электрической цепи проявляются инерционные свойства индуктивности?

Чем отличается активное сопротивление от «омического»?

От каких факторов зависит проявление поверхностного эффекта?

Какие элементы электрических цепей обозначают в схемах активными сопротивлениями или активными проводимостями?

Каким сопротивлением обладает элемент цепи, если ток, протекающий по этому элементу, и падение напряжения на нем совпадают по фазе?

Что такое электрическая емкость? От чего зависит величина емкости?

Какие физические процессы возникают в электрической цепи, содержащей только емкость, если цепь находится под синусоидальным напряжением?

Что такое ток электрического смещения, в какой физической среде он возникает и при каких условиях?

Что собой представляют емкостное сопротивление, емкостная проводимость? Как получить выражение емкостного сопротивления?

Как с изменением частоты изменяется емкостное сопротивление? Если

частота приложенного напряжения равна нулю (постоянное напряжение), то чему равно сопротивление емкостного элемента?

Какой сдвиг по фазе возникает между напряжением и током в идеальном емкостном элементе и чем обусловлен этот сдвиг?

Почему емкость называют упругостью электрической цепи?

В какой электрической цепи ток будет отставать по фазе от приложенного к ней синусоидального напряжения и почему? Какие элементы должны содержать цепь переменного тока, чтобы ток в ней опережал по фазе приложенное напряжение? Какие сопротивления называют реактивными?

§ 4.5. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

Треугольники напряжений и сопротивлений

В цепи (рис. 4.18), состоящей из последовательно включенных активного сопротивления r , индуктивности L , емкости C и источника синусоидального напряжения

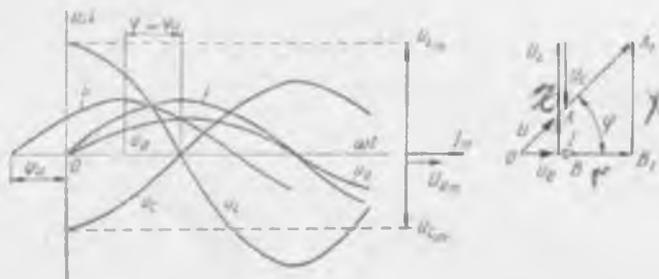
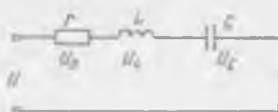


Рис. 4.18

$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$. Ток изменяется во времени также по синусоидальному закону. Это легко показать. Пусть ток в цепи синусоидальный $i = I_m \sin \omega t$. На каждом из последовательно включенных элементов r , L , C создается падение напряжения. Согласно второму закону Кирхгофа, для мгновенных значений

$$\begin{aligned} u &= u_r + u_L + u_C = ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = \\ &= I_m r \sin \omega t + I_m \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + I_m \frac{1}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

Мгновенные значения тока и падений напряжений показаны на рис. 4.18.

Известно, что сумма нескольких синусоидальных функций одной и той же частоты равна синусоидальной функции той же самой частоты, т. е. сумма синусоидально изменяющихся падений напряжений на участках замкнутого контура равна приложенному напряжению, изменяющемуся по закону синуса $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, или приложенное синусоидальное напряжение в линейной электрической цепи является причиной появления синусоидально изменяющегося во времени тока. Закон изменения во времени тока, приложенного напряжения и падений напряжений на участках цепи одинаков — синусоидальный.

Задача расчета цепи сводится к определению амплитуд и начальных фаз тока. Расчет удобнее произвести, воспользовавшись изображением синусоидальных величин векторами.

Второй закон Кирхгофа в векторной форме для рассматриваемой цепи может быть записан

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_c$$

и представлен графически на рис. 4.18. Для момента времени $t=0$, $i=0$, поэтому вектор тока I направлен по оси абсцисс — проекция его на вертикальную ось дает мгновенное значение, равное нулю.

Вектор падения напряжения в активном сопротивлении $\bar{U}_a = Ir$ совпадает по направлению с вектором тока; его называют активной составляющей напряжения. Падение напряжения в индуктивности \bar{U}_L опережает на $\frac{\pi}{2}$ ток, \bar{U}_L направлен по вертикальной оси вверх. Падение напряжения в емкости \bar{U}_c отстает на $\frac{\pi}{2}$ от тока, \bar{U}_c направлен по вертикальной оси вниз. На том же рис. 4.18 справа показано сложение векторов \bar{U}_a , \bar{U}_L , \bar{U}_c . Вектор OA изображает приложенное к цепи напряжение, сдвинутое по фазе относительно тока I на угол φ — сдвиг по фазе.

Вектор AB называют реактивной составляющей напряжения:

$$\bar{U}_p = \bar{U}_L + \bar{U}_c \text{ или } U_p = U_L - U_c.$$

Полученный треугольник OAB называют треугольником напряжений. Из треугольника напряжений следуют простые, часто применяемые при расчетах электрических цепей соотношения:

$$U_a = U \cos \varphi; U_p = U \sin \varphi; U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}. \quad (4.24)$$

Если все стороны треугольника напряжений OAB разделить на величину тока (см. рис. 4.18), то получится подобный треугольник, треугольник сопротивлений OA_1B_1 , где длина гипотенузы OA_1 соответствует полному сопротивлению $z = \frac{U}{I}$, катет OB_1 — активному сопротивлению $r = \frac{U_a}{I} = \frac{Ir}{I}$, катет A_1B_1 — реактивному сопротивлению $x = \frac{U_p}{I} = \frac{I_x}{I} = \frac{I(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{I}$. Для треугольника сопротивлений можно записать соотношения:

$$r = z \cos \varphi; \quad x = z \sin \varphi; \quad z = \sqrt{r^2 + x^2}. \quad (4.25)$$

Различная физическая природа активных и реактивных сопротивлений определяет особое правило сложения этих сопротивлений. Реактивные сопротивления создают сдвиг по фазе между напряжением и током

$$0 \leq \varphi \leq \pm \frac{\pi}{2}.$$

При известном полном сопротивлении закон Ома для цепи переменного тока формулируется так: *действующее (амплитудное) значение тока в цепи прямо пропорционально действующему (амплитудному) значению напряжения и обратно пропорционально полному сопротивлению ее*

$$I = \frac{U}{z}. \quad (4.26)$$

Расчет цепи (см. рис. 4.18) при использовании треугольника сопротивлений очень прост. По заданным параметрам цепи r , L , C определяется сопротивление каждого элемента току частоты f и по правилу треугольника рассчитывается полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Используя закон Ома (4.26), находят ток в цепи.

Сдвиг по фазе между током и напряжением определяется из соотношения

$$\varphi = \arcsin \frac{x}{z}.$$

При последовательном соединении нескольких приемников (рис. 4.19) ток во всех точках цепи одинаков. Падения напряжений на активных сопротивлениях совпадают по фазе с током, поэтому их можно сложить алгебраически:

$$U_a = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3 = I(r_1 + r_2 + r_3) = Ir_0.$$

Все активные сопротивления, включенные последовательно, можно также сложить алгебраически. Суммарное активное сопротивление r_3 называют эквивалентным активным сопротивлением:

$$r_3 = r_1 + r_2 + r_3.$$

Учитывая, что падения напряжения на индуктивных сопротивлениях опережают на $\pi/2$ ток, а на емкостных отстают на $\pi/2$, суммарное падение напряжения на всех реактивных элементах можно записать так:

$$U_p = Ix_1 - Ix_2 + Ix_3 = I(x_1 - x_2 + x_3) = Ix_3,$$

где x_3 — эквивалентное реактивное сопротивление, оно равно алгебраической сумме последовательно включенных реактивных сопротивлений.

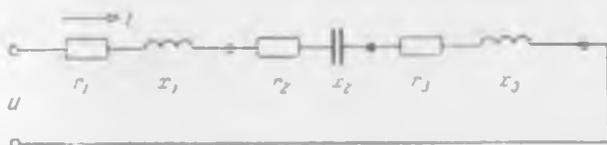


Рис. 4.19

Принято индуктивным сопротивлениям присписывать положительный знак, а емкостным — отрицательный:

$$x_3 = x_1 - x_2 + x_3.$$

Итак, схема рис. 4.19 может быть заменена простейшей, содержащей всего два сопротивления — r_3 и x_3 . Говорят, схема преобразована.

Полное сопротивление всей цепи определяется по правилу треугольника сопротивлений

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2}.$$

Ток по закону Ома

$$I = \frac{U}{z_3}.$$

Задачи. 4.16. Определить показания приборов (рис. 4.20), если параметры цепи $r=6$ ом, $L=25,5$ мГн, а приложенное к цепи напряжение

$$u = 141 \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ в.}$$

Частота напряжения $f=50$ Гц.

Построить в функции времени мгновенные значения тока, напряжения, активную и реактивную составляющие напряжения.

Построить векторную диаграмму и треугольник сопротивлений.

Ответ: $I=10$ а; $U=100$ в.

4.17. Индуктивная катушка, активное сопротивление которой $r=6$ ом, а индуктивность $L=25,5$ мГн, включена на постоянное напряжение 120 в. Определить ток в катушке.

Каким станет ток, если катушку включить на напряжение 120 в частоты 50 Гц?

Как изменится ток, если при той же величине напряжения 120 в частота возрастет до 500 Гц?

Построить зависимость полного сопротивления и тока в функции частоты приложенного напряжения.

Ответ: $I_1=20$ а; $I_2=12$ а; $I_3=1,5$ а.

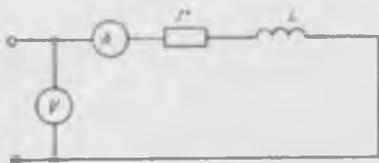


Рис. 4.20

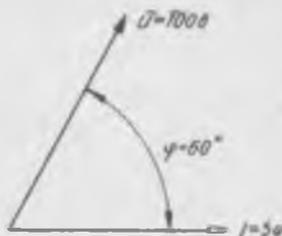


Рис. 4.21

4.18. В цепи, полное сопротивление которой равно 176 ом, а индуктивность $L=398$ мГн, ток $I=2$ а частоты $f=50$ Гц.

Какой величины приложенное к цепи напряжение?

Построить векторную диаграмму и треугольник сопротивлений.

Ответ: $U=352$ в; $x=125$ ом; $r=125$ ом.

4.19. Каковы сопротивления элементов цепи при последовательном включении их, если приложенное к цепи напряжение $U=200$ в, ток $I=2$ а и $\cos\varphi=0,8$?

Ответ: $r=80$ ом; $x=60$ ом.

4.20. Цепь содержит последовательно включенные активные сопротивления $r=50$ ом, индуктивность $L=318$ мГн, емкость $C=31,8$ мкФ и находится под напряжением, действующее значение которого $U=150$ в, а частота $f=50$ Гц. Определить величины полного сопротивления и тока в цепи.

Ответ: $z=50$ ом; $I=3$ а.

4.21. Для заданной векторной диаграммы (рис. 4.21) построить треугольники напряжений и сопротивлений. Определить полное, активное и реактивное сопротивления, а также активную и реактивную составляющие напряжений

Начертить электрическую схему, указав характер реактивного сопротивления.

Ответ: $z=20$ ом; $r=10$ ом; $x=17,32$ ом.

4.22. Определить величину тока в электрической цепи, состоящей из трех включенных последовательно приемников (см. рис. 4.19), находящихся под напряжением, действующее значение которого $U=100$ в. Сопротивления приемников равны $r_1=r_2=r_3=10$ ом, $x_1=30$ ом, $x_2=40$ ом, $x_3=50$ ом.

Ответ: $I=2$ а.

Вопросы для самопроверки

Какое соединение элементов электрической цепи называется последовательным?

По какому закону изменяется ток во времени в электрической цепи, со-

стоящей из последовательно включенных индуктивности, емкости, активного сопротивления и синусоидального источника э. д. с.?

В чем заключается задача расчета установившегося режима электрической цепи?

Напишите уравнение по второму закону Кирхгофа для электрической цепи, состоящей из последовательно включенных индуктивности, активного сопротивления и синусоидальной э. д. с., для мгновенных значений токов и напряжений, действующих значений токов и напряжений.

Что означает понятие «активная составляющая напряжения» и «реактивная составляющая напряжения»?

Какие соотношения можно записать для треугольников сопротивлений, треугольников напряжений?

Как формулируется закон Ома для цепи переменного тока?

Что собой представляет эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно включенных сопротивлений, и как оно вычисляется? Как определить ток в цепи, находящейся под синусоидальным напряжением и содержащей несколько последовательно включенных сопротивлений?

§ 4.6. Параллельное соединение активной, индуктивной и емкостной проводимостей. Треугольники токов и проводимостей

Если начала ветвей объединены в одну точку, а концы их в другую, и к этим двум точкам подано напряжение, то такое соединение ветвей называют **п а р а л л е л ь н ы м**. Каждая из ветвей окажется под одним и тем же напряжением. На рис. 4.22 дана схема, состоящая из трех параллельно включенных элементов, — активной проводимости g , индуктивности L и емкости C .

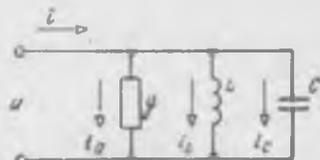


Рис. 4.22

В каждом из перечисленных элементов ток будет синусоидальный, если приложенное к цепи напряжение синусоидально $u = U_m \sin \omega t$ и элементы линейны. Мгновенное значение тока в неразветвленной части цепи можно определить по первому закону Кирхгофа

$$\begin{aligned}
 i &= i_g + i_L + i_C = U_m g \sin \omega t + \frac{1}{L} \int_0^t U_m \sin \omega t dt + \\
 &+ C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m g \sin \omega t + U_m \frac{1}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \\
 &+ U_m \omega C \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).
 \end{aligned}$$

Полученное соотношение представлено графически на рис. 4.23. Как видно, ток в неразветвленной ветви изменяется также синусоидально.

Удобнее синусоидальные функции представить в виде векторов (рис. 4.24), тогда первый закон Кирхгофа запишется

$$\bar{I} = \bar{I}_a + I_L + I_C.$$

На рис. 4.24 показано сложение векторов. Вектор OA определяет ток в неразветвленной части цепи по величине и по фазе

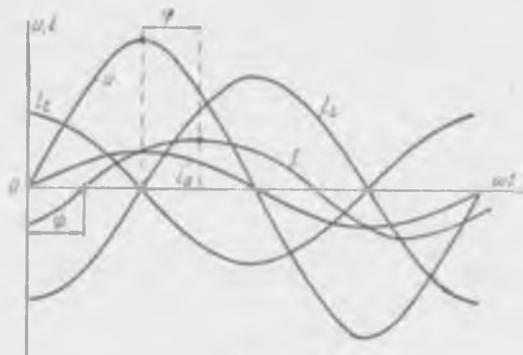


Рис. 4.23

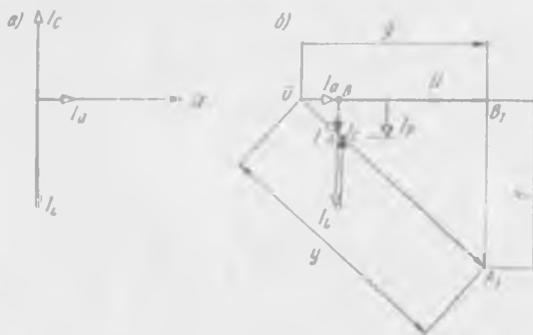


Рис. 4.24

(OB — активная составляющая тока — I_a ; AB — реактивная составляющая тока — I_p):

$$I_p = I_L - I_C.$$

Полученный треугольник OAB называют треугольником токов, для него можно выписать соотношения:

$$I_a = I \cos \varphi; I_p = I \sin \varphi; I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (4.27)$$

Если все стороны треугольника токов разделить на величину приложенного к цепи напряжения U , то новый треуголь-

ник OA_1B_1 будет представлять собою треугольник проводимостей. Треугольник проводимостей подобен треугольнику токов.

Соотношения, выписанные для треугольника проводимостей, определяют правила сложения проводимостей в цепях переменного тока:

$$g = y \cos \varphi; \quad b = y \sin \varphi; \quad y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad (4.28)$$

где y — полная проводимость цепи;

b — реактивная проводимость цепи.

Итак, если к цепи (см. рис. 4.22) приложено переменное напряжение U , то ток в ней определится по закону Ома

$$I = Uy = U \sqrt{g^2 + b^2} = U \sqrt{g^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}.$$

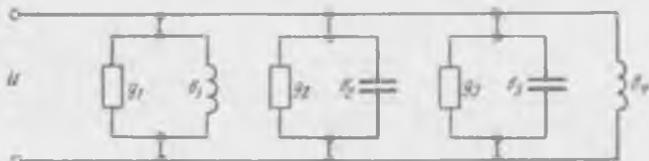


Рис. 4.25

Сдвиг по фазе между током и напряжением можно определить из соотношения

$$\varphi = \arcsin \frac{b}{y}.$$

При параллельном соединении приемников удобно каждый из них представлять параллельным соединением активной и реактивной проводимостей (рис. 4.25). Токи во всех ветвях, обладающих только активной проводимостью, совпадают по фазе с напряжением и друг с другом, поэтому их можно просто сложить алгебраически

$$I_a = Ug_1 + Ug_2 + Ug_3 = U(g_1 + g_2 + g_3) = Ug_3.$$

Эквивалентная активная проводимость цепи равна сумме параллельно включенных активных проводимостей

$$g_3 = g_1 + g_2 + g_3.$$

Токи в ветвях с реактивными проводимостями сдвинуты по фазе на $\pm \frac{\pi}{2}$ относительно приложенного напряжения. Относительно друг друга они совпадают по фазе в ветвях одного характера, индуктивных или емкостных, и находятся в противофазе в разнородных реактивных ветвях. Все реактивные то-

ки, суммируясь алгебраически, создают реактивную составляющую тока

$$I_p = -Ub_1 + Ub_2 + Ub_3 - Ub_4 = U(-b_1 + b_2 + b_3 - b_4) = Ub_0.$$

Эквивалентная реактивная проводимость цепи равна алгебраической сумме параллельно включенных реактивных проводимостей

$$b_0 = -b_1 + b_2 + b_3 - b_4.$$

Все элементы схемы рис. 4.25 заменены двумя. Схема преобразована, сведена к простейшей, для которой применимо правило сложения проводимостей по треугольнику

$$y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}.$$

Ток в неразветвленной части цепи определится по закону Ома

$$I = Uy_0.$$

§ 4.7. Преобразование последовательного соединения активного и реактивного сопротивлений в эквивалентное параллельное соединение

Любой приемник электрической энергии, находящийся под синусоидальным напряжением определенной частоты, может быть условно представлен на схеме последовательным соединением активного и реактивного сопротивлений или параллельным соединением активной и реактивной проводимостей



Рис. 4.26

(рис. 4.26). Какому соединению отдать предпочтение зависит от того, как включен данный приемник в общую схему. Если приемник включен последовательно (см. рис. 4.19), то целесообразна схема «а», если параллельно (см. рис. 4.25) — удобнее пользоваться схемой «б». Обе схемы равноценны — эквивалентны. Схему «а» можно заменить схемой «б» и схему «б» — схемой «а».

Схемы называются эквивалентными, если при подведении к ним напряжения U ток в неразветвленной цепи обе-

их схем одинаков и сдвиг по фазе между напряжением и током один и тот же по величине и знаку.

Можно записать следующие соотношения:
для схемы «а»

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}}; \quad (4.29)$$

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x}{z}, \quad (4.30)$$

для схемы «б»

$$I = Uy = U \sqrt{g^2 + b^2}; \quad (4.31)$$

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad \sin \varphi = \frac{b}{y}. \quad (4.32)$$

Из сопоставлений (4.29) и (4.31) следует, что полное сопротивление схемы «а» равно обратной величине полной проводимости схемы «б»

$$z = \frac{1}{y}. \quad (4.33)$$

Из совместного решения зависимостей (4.30), (4.32) и (4.33) можно получить формулы преобразования параллельного соединения в последовательное:

$$\begin{aligned} r &= z \cos \varphi = \frac{1}{y} \frac{g}{y} = \frac{g}{y^2} = \frac{g}{g^2 + b^2}, \\ x &= z \sin \varphi = \frac{1}{y} \frac{b}{y} = \frac{b}{y^2} = \frac{b}{g^2 + b^2}. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Из соотношений (4.34) следует, что активное сопротивление не является величиной, обратной активной проводимости. Только в одном частном случае, когда цепь содержит одну активную проводимость, величина «r» обратна величине «g».

При решении тех же зависимостей (4.30), (4.32), (4.33) относительно проводимостей получают формулы преобразования последовательного соединения в параллельное:

$$\begin{aligned} g &= y \cos \varphi = \frac{1}{z} \frac{r}{z} = \frac{r}{z^2} = \frac{r}{r^2 + x^2}, \\ b &= y \sin \varphi = \frac{1}{z} \frac{x}{z} = \frac{x}{z^2} = \frac{x}{r^2 + x^2}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Итак, обратными друг другу являются только полное сопротивление z и проводимость y . Активные и реактивные сопротивления и проводимости не являются обратными величинами.

Задачи. 4.23. Цепь состоит из активной проводимости $g=0,08 \frac{1}{\text{ом}}$ и включенной параллельно емкости $C=191 \text{ мкф}$. Какова величина полной проводимости цепи, если частота приложенного напряжения $f=50 \text{ гц}$.

Ответ: $y=0,1 \frac{1}{\text{ом}}$.

4.24. Полная проводимость индуктивной катушки $y=0,1 \frac{1}{\text{ом}}$, активная проводимость ее $g=0,06 \frac{1}{\text{ом}}$. Какова индуктивность катушки, если частота приложенного напряжения $f=50 \text{ гц}$?

Ответ: $L=0,04 \text{ гн}$.

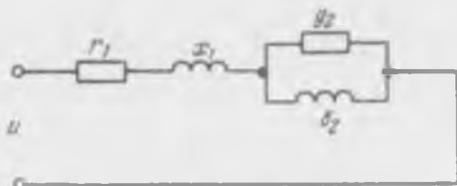


Рис. 4.27

4.25. Определить полную проводимость цепи рис. 4.22 при синусоидальном приложении напряжения частоты $f=500 \text{ гц}$, если $g=0,01 \frac{1}{\text{ом}}$, $C=-15,6 \text{ мкф}$, а ветвь с индуктивностью отключена.

Ответ: $y=0,05 \frac{1}{\text{ом}}$

4.26. Даны значения тока, напряжения и сдвиг по фазе между напряжением и током (см. рис. 4.21). Построить треугольники токов и проводимостей. Определить активную и реактивную составляющие токов, а также

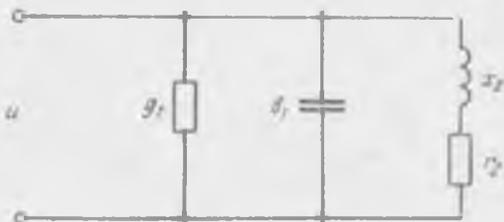


Рис. 4.28

активную, реактивную и полную проводимости. Начертить электрическую схему, указав характер реактивной проводимости.

Ответ: $y=0,05 \frac{1}{\text{ом}}$; $g=0,025 \frac{1}{\text{ом}}$; $b_2=0,0433 \frac{1}{\text{ом}}$.

4.27. Определить величину тока в неразветвленной части электрической цепи (см. рис. 4.25), находящейся под напряжением $U=50 \text{ в}$. Проводимости участков цепи равны: $g_1=0,01 \frac{1}{\text{ом}}$; $b_1=0,06 \frac{1}{\text{ом}}$; $g_2=0,02 \frac{1}{\text{ом}}$; $b_3=0,01 \frac{1}{\text{ом}}$; $g_3=0,05 \frac{1}{\text{ом}}$; $b_4=0,02 \frac{1}{\text{ом}}$; $b_5=0,03 \frac{1}{\text{ом}}$.

Ответ: $I=5 \text{ а}$.

4.28. К цепи (рис. 4.27) приложено напряжение $U=100$ в. Определить $\cos \varphi$ всей цепи и величину тока в неразветвленной ее части, если $r_1 = 10$ ом, $x_1 = 4$ ом, $g_2 = 0,06 \frac{1}{\text{ом}}$, $b_2 = 0,08 \frac{1}{\text{ом}}$.

О т в е т: $\cos \varphi = 0,8$; $I = 5$ а.

4.29. Определить полную проводимость электрической цепи и ток в ее неразветвленной части (рис. 4.28), если $g_1 = 0,4 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{ом}}$, $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{ом}}$, $r_2 = 40$ ом, $x_2 = 30$ ом и приложенное к цепи напряжение равно $U=100$ в.

О т в е т: $y = 2 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{ом}}$; $I = 2$ а.

Вопросы для самопроверки

Какое соединение элементов электрической цепи называется параллельным?

Напишите уравнение по первому закону Кирхгофа электрической цепи, состоящей из параллельно включенных индуктивности, емкости, активной проводимости и находящейся под синусоидальным напряжением, для мгновенных и действующих значений токов.

Что называют активной и реактивной составляющей тока?

Какие соотношения можно записать для треугольников токов и треугольников проводимостей?

Что представляет собой реактивная проводимость цепи?

Что такое полная проводимость цепи переменного тока и как она определяется?

Какое соотношение определяет сдвиг по фазе между током и напряжением в простейшей цепи при параллельном соединении?

Как определить эквивалентную проводимость цепи, содержащей несколько параллельно включенных приемников?

Какие существуют простейшие схемы замещения электрических приемников? Когда и какой из них целесообразнее воспользоваться?

Какие электрические схемы переменного тока называются эквивалентными?

По каким зависимостям производится преобразование параллельного соединения элементов в последовательное их соединение?

Как записываются формулы, определяющие величины проводимостей при преобразовании последовательного соединения в параллельное?

§ 4.8. Мгновенная мощность в цепи переменного тока

Мгновенное значение мощности p , развиваемой в электрической цепи, выражается через мгновенные значения напряжения u на зажимах цепи и тока i в этой цепи и представляет собой скорость совершения работы в данный момент времени

$$p = \frac{dA}{dt} = \frac{uidt}{dt} = ui.$$

Если ток и напряжение синусоидальные, то мгновенная мощность также переменная во времени величина

$$p = U_m I_m \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) = U_m I_m \frac{\cos \varphi - \cos (2 \omega t - \varphi)}{2}.$$

Для синусоидально изменяющихся величин удобно вместо амплитудных значений ввести действующие значения тока и напряжения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

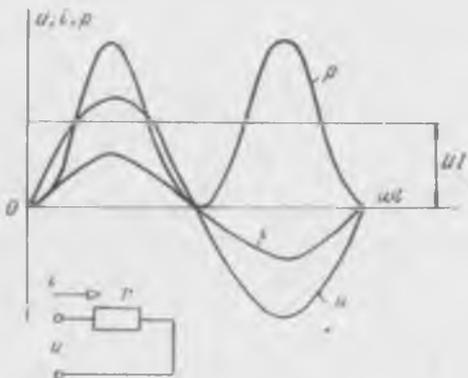


Рис. 4.29

Мгновенная мощность цепи переменного тока представится суммой постоянной величины $UI \cos \varphi$ и переменной составляющей $UI \cos (2\omega t - \varphi)$, изменяющейся с угловой частотой 2ω , в два раза превышающей угловую частоту напряжения и тока:

$$p = UI [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)]. \quad (4.36)$$

Переменная составляющая мгновенной мощности указывает на неравномерность поступления энергии в цепь, в то время как в цепь постоянного тока энергия поступает равномерно из внешнего источника энергии. В качестве иллюстрации предлагается рассмотреть два идеализированных примера: цепь имеет только активное сопротивление r ; только реактивное сопротивление x .

На рис. 4.29 построены кривые напряжения, тока и мгновенной мощности для электрической цепи, обладающей только активным сопротивлением $x=0$, $\varphi=0$, $\cos \varphi=1$:

$$p = UI (1 - \cos 2\omega t).$$

Как видно, мгновенная мощность колеблется с двойной угловой частотой 2ω около среднего значения UI . Мощность всегда положительна, т. е. энергия только поступает в цепь и преобразуется в ней в тепло, но скорость поступления ее все время меняется.

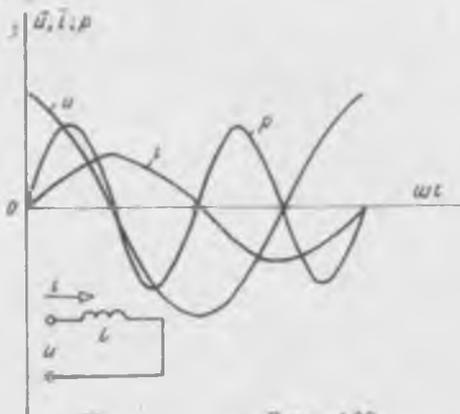


Рис. 430

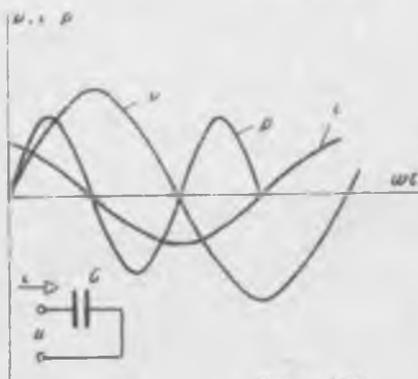


Рис. 431

Иначе выглядит (рис. 4.30 и 4.31) выражение мгновенной мощности идеальной реактивной цепи, для которой можно пренебречь активным сопротивлением $r=0$, $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, $\cos\varphi=0$:

$$p = \mp UI \sin 2\omega t.$$

В этом случае мгновенная мощность колеблется около нулевого значения с двойной угловой частотой 2ω , принимая то положительные значения (энергия поступает от внешнего источника энергии в цепь), то отрицательные (энергия возвращается из цепи обратно во внешний источник энергии).

§ 4.9. Колебания энергии в цепи переменного тока

В электрической цепи, обладающей только индуктивностью L , при пренебрежении активным сопротивлением проводов $r=0$ внешнее напряжение уравнивается только э. д. с. самоиндукции

$$u = L \frac{di}{dt}.$$

Мгновенная мощность цепи равна

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}.$$

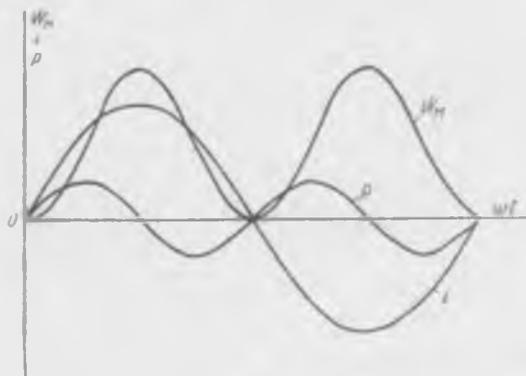


Рис. 4.32

Откуда выражение энергии магнитного поля контура

$$W_m = \int_0^t p dt = \int_0^t Li di = \frac{Li^2}{2}. \quad (4.37)$$

При синусоидальном токе энергия магнитного поля

$$W_m = \frac{1}{2} L I_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{LI^2(1 - \cos 2\omega t)}{2} \quad (4.38)$$

изменяется во времени с двойной угловой частотой и колеблется между внешним источником энергии и цепью. Преобразования электромагнитной энергии в другие виды энергии в этом случае не происходят.

На рис. 4.32 построены кривые мгновенных значений тока, мощности и энергии для рассматриваемой цепи. С увеличением тока возрастает запас энергии магнитного поля за счет поступления энергии из внешнего источника — мгновенная мощность, определяющая скорость поступления энергии, положительна. Энергия магнитного поля достигает максимума при

экстремальном значении тока, в этот момент мгновенная мощность имеет нулевое значение, затем становится отрицательной, энергия магнитного поля начинает уменьшаться — из цепи энергия возвращается к внешнему источнику энергии.

При достижении нулевого значения тока энергия магнитного поля также равна нулю. И процесс повторяется вновь. Происходит колебание энергии магнитного поля с двойной угловой частотой около среднего значения, равного

$$\frac{LI^2}{2}.$$

Мгновенная мощность цепи, содержащей только емкость C , по которой может протекать ток электрического смещения

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt},$$

определится выражением

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}.$$

Энергия электрического поля

$$W_e = \int_0^t p dt = \int_0^u C u du = \frac{Cu^2}{2}. \quad (4.39)$$

При синусоидальном приложенном напряжении энергия электрического поля

$$W_e = \frac{1}{2} C U_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{C U^2 (1 - \cos 2 \omega t)}{2} \quad (4.40)$$

изменяется во времени с двойной угловой частотой, то принимая максимальное значение $C U^2$ при экстремуме мгновенного значения приложенного напряжения, то падая до нуля. Законы изменения во времени мгновенной мощности и энергии для емкостной ($C \neq 0$, $L = 0$, $r = 0$) и индуктивной цепи ($L \neq 0$, $C = 0$, $r = 0$) одинаковы. Если на рис. 4.32 надписать на кривой i напряжение u , то этот же рисунок будет иллюстрировать закон изменения мгновенной мощности и энергии емкостной цепи.

При положительном значении мгновенной мощности энергия от внешнего источника поступает в цепь — энергия электрического поля увеличивается. При отрицательной мгновенной мощности энергия электрического поля убывает, возвращаясь к внешнему источнику энергии.

В электрической цепи, содержащей и активное сопротивление и реактивные элементы, происходит одновременно преобразование электромагнитной энергии в тепло и колебания энергии, связанные с запасом и возвратом энергии электрическим или магнитным полем цепи. Колебание энергии вызывает

как бы дополнительную загрузку по току всех элементов цепи, связывающих внешний источник энергии с реактивными элементами-потребителями, а следовательно, создает во всех этих элементах цепи дополнительные потери активной мощности на нагрев проводов и дополнительные потери напряжения.

§ 4.10. Активная, реактивная и полная мощности

Среднее значение мгновенной мощности за период называется активной мощностью

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)] dt = UI \cos \varphi. \quad (4.41)$$

Используя соотношения из треугольников напряжения и тока, можно записать еще несколько выражений активной мощности:

$$P = U_a I = I^2 r; \quad P = UI_a = U^2 g. \quad (4.42)$$

Зависимостями $P = U_a I = I^2 r$ удобно пользоваться при последовательном соединении элементов цепи, а выражениями $P = UI_a = U^2 g$ — при параллельном соединении.

Активной мощностью оцениваются средняя за период скорость преобразования электромагнитной энергии в тепловую, механическую, световую и химическую, а также затраты энергии, связанные с перемагничиванием ферромагнитного материала и с наведением вихревых токов.

Множитель $\cos \varphi$ в выражении активной мощности называют коэффициентом мощности. Чем больше относительная величина реактивного сопротивления в цепи, тем меньше $\cos \varphi$ и тем меньше активная мощность при тех же значениях тока и напряжения.

Элементы электрической цепи рассчитаны на определенные величины (номинальные) тока и напряжения, поэтому произведение действующего значения напряжения на действующее значение тока

$$UI = S, \quad (4.43)$$

называемое полной или кажущейся мощностью, характеризует пропускную способность элементов электрической цепи, а $\cos \varphi$ показывает, в какой степени используется пропускная способность цепи для передачи активной мощности.

В электротехнике широко пользуются понятием реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (4.44)$$

Реактивной мощности трудно придать физический смысл, ее можно рассматривать как амплитуду реактивной составляющей мгновенной мощности электрической цепи, т. е. как амплитуду скорости поступления энергии в электрическое или магнитное поле элементов электрической цепи. Но такое толкование справедливо лишь для простейшей электрической цепи.

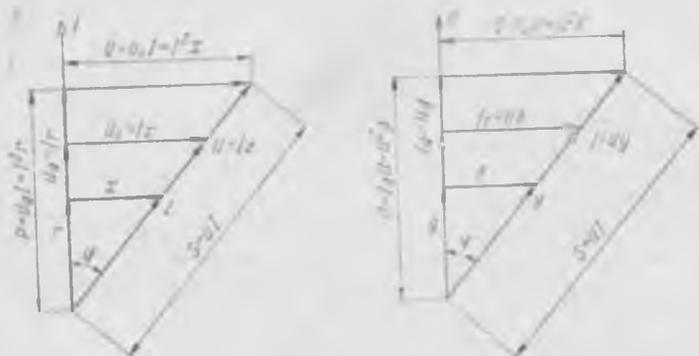


Рис. 4.33

Используя соотношение для треугольника напряжений или треугольников тока, можно записать несколько выражений реактивной мощности

$$Q = U_p I = I^2 x = U I_p = U^2 b. \quad (4.45)$$

Из выражений активной, реактивной и полной мощностей следует, что можно ввести понятия треугольников мощностей, подобных треугольникам сопротивлений или, соответственно, треугольникам проводимостей (рис. 4.33)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4.46)$$

§ 4.11. Коэффициент мощности и пути его повышения

В энергетических системах наибольшую часть нагрузки (примерно 80%) составляют асинхронные двигатели, в которых при помощи вращающегося магнитного поля электрическая энергия преобразуется в механическую. Наличие магнитных полей связано в цепях переменного тока с колебаниями мгновенной мощности между потребителями и генератором, загрузкой реактивными токами всех промежуточных элементов электрических цепей — трансформаторов, линий передачи, распределительных сетей.

Колебания мощностей вызывают дополнительные потери мощности во всех элементах цепи, ограничивают пропускную

способность элементов цепи, создают дополнительные падения напряжений в сетях, ухудшая качество электрической энергии: у потребителя напряжение оказывается меньше номинального.

Чем больше магнитные поля, тем выше индуктивность цепи, меньше $\cos\varphi$ и больше ток. Действительно, из формулы активной мощности $P = UI\cos\varphi$ следует

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Все элементы цепи рассчитаны на определенную величину тока. Для использования пропускной способности их с целью передачи наибольшей активной мощности необходимо повысить $\cos\varphi$, иначе потребуются увеличение сечения проводов и большой расход проводникового материала, тем самым увеличатся дополнительные капитальные затраты.

Повышение $\cos\varphi$ в электроэнергетических системах является важной технико-экономической проблемой. Увеличение его всего на 0,01 дает дополнительное полезное использование электрической энергии в промышленности СССР порядка несколько сот миллионов киловатт-часов в год.

В нашей стране введен дифференциальный тариф на электроэнергию: а) стоимость 1 *квт* · ч, отпущенного предприятию, увеличивается при $\cos\varphi < 0,9$; б) стоимость 1 *квт* · ч не изменяется и принимается номинальной при $\cos\varphi = 0,9 \div 0,92$; в) при $\cos\varphi > 0,9$ стоимость 1 *квт* · ч снижается.

Основные пути повышения $\cos\varphi$:

а) правильный подбор номинальной мощности асинхронных двигателей для привода рабочих машин, трансформаторов;

б) улучшение режимов работы оборудования (при работе в режиме, близком к холостому ходу, резко снижается $\cos\varphi$);

в) улучшение качества ремонта асинхронных двигателей (изменение обмоточных данных и увеличение воздушных зазоров приводит к понижению $\cos\varphi$);

г) искусственная компенсация реактивной мощности потребителей с помощью статических конденсаторов и синхронных компенсаторов.

Повышение $\cos\varphi$ при помощи статических конденсаторов происходит вследствие взаимной компенсации потоков реак-

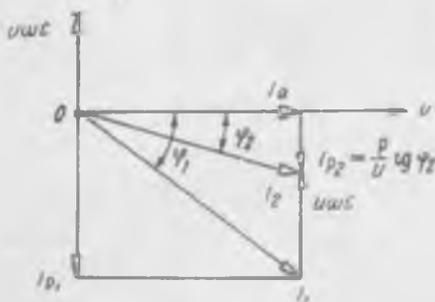


Рис. 4.34

тивной энергии, вернее, в результате создания колебательного контура, в котором емкость запасает электрическую энергию в ту часть периода, когда в индуктивном контуре уменьшается величина тока, и возвращает эту энергию индуктивному контуру при уменьшении напряжения.

Величину емкости, необходимую для повышения $\cos\varphi$ от заданного значения $\cos\varphi_1$ до требуемого значения $\cos\varphi_2$, можно определить, воспользовавшись векторной диаграммой рис. 4.34.

Вектор приложенного напряжения U направлен по горизонтальной оси. Ток I отстает от напряжения на угол φ_1 , активная составляющая тока $I_a = \frac{P}{U}$ совпадает по направлению с напряжением, реактивная составляющая тока $I_{p1} = I_a \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{P}{U} \operatorname{tg} \varphi_1$ нормальна к вектору напряжения.

При неизменной активной составляющей тока I_a уменьшение сдвига фаз между напряжением и результирующим током достигается за счет емкостной составляющей тока, равной $U\omega C$ и противоположной по фазе реактивной составляющей тока I_{p1} .

Итак,

$$U\omega C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2),$$

откуда

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Батареи статических конденсаторов устанавливают на подстанциях, питающих электроэнергией крупные предприятия.

Задачи. 4.30. Даны выражения мгновенных значений напряжения и тока в цепи:

$$\begin{aligned} u &= 282 \sin(\omega t + 20^\circ) \text{ в}, \\ i &= 14,1 \sin(\omega t - 12^\circ) \text{ а}. \end{aligned}$$

Найти активную мощность, потребляемую цепью. Определить параметры эквивалентной схемы, состоящей из последовательно соединенных элементов. Построить векторную диаграмму и треугольник мощностей.

Ответ: $P = 1700 \text{ вт}$.

4.31. Какой энергией обладает индуктивная катушка, индуктивность которой $L = 0,5 \text{ гн}$, когда ток в ней 20 а ?

Ответ: $W = 100 \text{ дж}$.

4.32. По показаниям приборов, включенных в цепь катушки (рис. 4.35), находящейся под синусоидальным напряжением частоты $f = 50 \text{ гц}$, ампер-

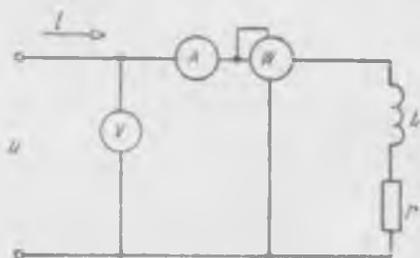


Рис. 4.35

метра 12 а, вольтметра 120 в, ваттметра 865 вт, определить параметры катушки—ее активное сопротивление и индуктивность. Построить треугольник сопротивлений и напряжений.

Ответ: $r=6$ ом, $L=25,5$ мГн.

4.33. Напишите выражение мгновенной мощности в цепи переменного тока с емкостью $C=100$ мкФ, если приложенное напряжение $u=220 \times \sin 314 t$ (в). Какова амплитуда этой мощности и чему равно среднее ее значение?

Ответ: $p=760 \sin 628t$ ватт.

4.34. Напишите выражение мгновенной мощности в электрической цепи, активное сопротивление которой $r=80$ ом и индуктивность $L=191$ мГн, если приложенное к цепи напряжение $u=200 \sin 314t$ в.

Какова амплитуда мгновенной мощности и чему равно среднее ее значение?

Ответ: $p=200 [\cos 36^\circ 50' - \cos (628t - 36^\circ 50')] \text{ ватт}$; $P=160$ ватт.

4.35. Какова средняя мощность за период в цепи синусоидального тока с активной нагрузкой, если амплитуда напряжения и тока соответственно равны 200 в и 6 а?

Ответ: $P=600$ ватт.

4.36. Какова активная мощность цепи, состоящей из активного сопротивления $r=8$ ом, индуктивного — 6 ом, если к цепи приложено напряжение 100 в?

Ответ: $P=800$ ватт.

4.37. Чему равна реактивная мощность электрической цепи емкостью $C=239$ мкФ, если действующее значение приложенного напряжения $U=200$ в при частоте $f=50$ Гц?

Ответ: $Q=3$ кВар.

4.38. Какова активная мощность электрической цепи, активное сопротивление которой $r=8$ ом и индуктивность $L=0,0191$ Гн, если действующее значение приложенного напряжения $U=100$ в и при частоте $f=50$ Гц?

Ответ: $P=800$ ватт.

4.39. Какой емкости конденсатор следует включить параллельно электродвигателю, работающему при напряжении $U=200$ в, токе $I=29,2$ а и коэффициенте мощности $\cos \varphi_1=0,82$, чтобы довести коэффициент мощности до $\cos \varphi_2=0,96$?

Ответ: $C=150$ мкФ.

4.40. К асинхронному двигателю, полезная мощность которого $P=3,7$ кВт, а $\eta=83,5\%$, по проводам сопротивлением $r_1=2$ ом подается напряжение $U_2=380$ в. Двигатель работает с $\cos \varphi_2=0,707$.

Какую емкость нужно включить параллельно двигателю, чтобы повысить $\cos \varphi$ до 0,9?

Как изменятся при этом потери мощности и напряжения в линии?

Ответ: $C=50$ мкФ, потери мощности уменьшатся на 200 ватт, напряжения — на 7 в.

4.41. Какова активная мощность цепи, если полная мощность $S=250$ кВА, а коэффициент мощности — $\cos \varphi=0,8$?

Ответ: $P=200$ кВт.

4.42. На сколько возрастет активная мощность цепи, если при той же полной мощности $S=250$ кВА $\cos \varphi$ увеличится до 0,95?

Ответ: на 37 кВт.

4.43. Чему равен коэффициент мощности цепи, если начальная фаза приложенного напряжения 55° , а начальная фаза тока цепи 10° ?

Ответ: $\cos \varphi=0,702$.

4.44. Каким активным сопротивлением обладает элемент электрической цепи, если при токе $I=10$ а активная мощность $P=100$ вт?

Ответ: $r=1$ ом.

4.45. Какова активная мощность элемента электрической цепи, если его активная проводимость $g=0,01$ $\frac{1}{\text{ом}}$, а напряжение на элементе $U=200$ в?

Ответ: $P=400$ вт.

4.46. Каков $\cos \varphi$ установки, если ее активная мощность $P=800$ вт, а реактивная — $Q=600$ вар?

Ответ: $\cos \varphi=0,8$.

Вопросы для самопроверки

По какому закону изменяется мгновенная мощность в цепи переменного тока? Получите выражение мгновенной мощности цепи переменного тока.

С какой частотой изменяется во времени мгновенная мощность цепи переменного тока, если приложенное к цепи напряжение изменяется по закону $u=U_m \sin \omega t$?

В каких пределах изменяется мгновенная мощность в цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление?

В каких пределах изменяется мгновенная мощность электрической цепи переменного тока, содержащей только реактивные сопротивления?

Какое толкование можно дать отрицательному значению мгновенной мощности, положительному?

Какое выражение имеет энергия магнитного поля одиночного контура индуктивности L , если мгновенное значение тока в контуре i ?

По какому закону изменяется во времени энергия магнитного поля, создаваемого переменным током?

Напишите выражение энергии электрического поля.

По какому закону изменяется во времени энергия электрического поля, если напряжение на обкладках конденсатора изменяется по синусоидальному закону?

Какая зависимость существует между активной мощностью и мгновенной? Что понимают под активной мощностью в цепи переменного тока? Какие формулы служат для определения величины активной мощности?

Что называют коэффициентом мощности?

Что представляет собой полная или кажущаяся мощность в цепи переменного тока?

Что такое реактивная мощность? По каким формулам она может быть рассчитана?

Какие соотношения можно записать из треугольника мощностей?

Почему стремятся уменьшить перетоки реактивных мощностей (по сетям и линиям передач) по элементам электрических сетей и систем? Почему необходимо увеличивать коэффициент мощности?

Каким образом можно повысить коэффициент мощности? Как можно уменьшить перетоки реактивных мощностей?

В чем состоит сущность физического процесса при компенсации $\cos \varphi$ статическими конденсаторами?

Как рассчитать величину емкости, необходимую для повышения $\cos \varphi$?

§ 4.12. Резонанс в электрических цепях

Простейшая электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных емкости C и индуктивности L при пренебрежении активным сопротивлением r , представляет собой иде-

альный колебательный контур, в котором роль инерции играет индуктивность, а упругости — емкость.

При сообщении такой цепи извне некоторого количества энергии в контуре возникают незатухающие колебания тока

$$i = I_m \sin \omega_0 t.$$

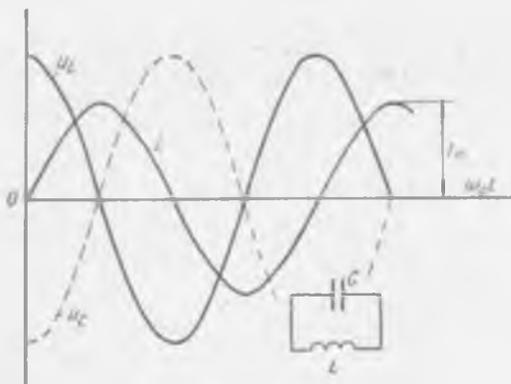


Рис. 4.36

Мгновенные значения напряжений на индуктивности, емкости и тока в цепи представлены на рис. 4.36.

Угловая частота колебаний (собственная частота незатухающих колебаний контура) зависит от параметров цепи

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.47)$$

Колебания тока связаны с периодическими преобразованиями энергии электрического поля $W_e = \frac{Cu^2}{2}$ в энергию магнитного поля $W_m = \frac{Li^2}{2}$ и обратно — энергии магнитного поля в энергию электрического поля. Как энергия электрического поля конденсатора, так и энергия магнитного поля индуктивности катушки изменяются во времени с угловой частотой $2\omega_0$.

При учете активного сопротивления контура (рис. 4.37) каждое преобразование энергии сопровождается переходом части энергии в теплоту, вследствие чего колебания приобретают затухающий характер:

$$i = I_m e^{-\delta t} \sin \omega t,$$

где

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad \delta = \frac{r}{2L}.$$

Подводя к электрической цепи, состоящей из индуктивности, емкости и активного сопротивления, внешнюю изменяющуюся по синусоидальному закону электродвижущую силу, можно возбудить вынужденные электрические колебания в цепи. При приближении частоты внешней электродвижущей силы к собственной частоте колебательного контура $\omega \approx \omega_0$ резко возрастают амплитуды вынужденных колебаний токов или напряжений — в цепи возникает электрический резонанс.

В зависимости от того, по какой схеме подключена к колебательному контуру внешняя э. д. с. — последовательно или параллельно, различают два электрических резонанса: при последовательном включении — резонанс напряжений, при параллельном — резонанс токов.

При резонансе напряжений индуктивное и емкостное сопротивления равны по величине и взаимно компенсируют друг друга. Действительно, при резонансе $\omega_0 = \omega$, а

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ откуда } \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Сопротивление реактивных элементов при резонансе называют волновым сопротивлением

$$\rho = \omega L = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.48)$$

Полное сопротивление цепи становится наименьшим, равным активному $z = r$. Ток достигает наибольшего возможного при данной внешней э. д. с. значения, причем он совпадает по фазе с внешней э. д. с. — $\cos\varphi = 1$. Величина тока определяется по закону Ома

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{E}{r}.$$

Ток большой величины создает в каждом из последовательно включенных элементов цепи рис. 4.38 падение напряжения. Падения напряжения на индуктивности $I\omega L$ и емкости $\frac{I}{\omega C}$ равны по величине, так как равны по величине их сопротивления, но

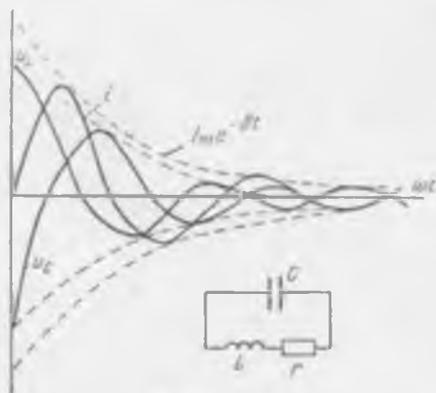


Рис. 4.37

противоположны по фазе в силу различной их физической природы. Они могут во много раз превышать падение напряжения на активном сопротивлении, если последнее во много раз меньше каждого реактивного:

$$r < \omega L; r < \rho.$$

Но при резонансе падение напряжения на активном сопротивлении $U_a = Ir$ равно приложенной э. д. с. E , следовательно, падения напряжений на каждом из реактивных элементов больше приложенной внешней э. д. с. $U_L = U_C > E$ (рис. 4.38).

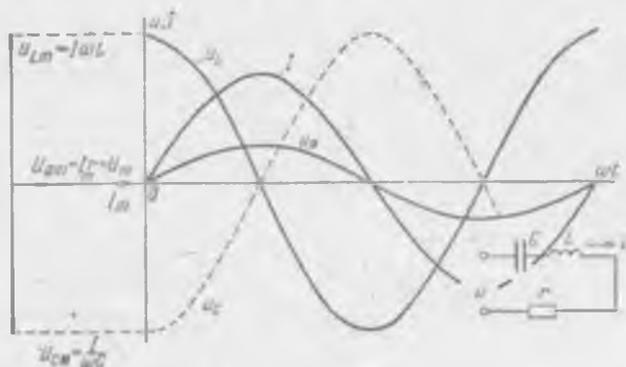


Рис. 4.38

Для резонанса напряжений характерны резкие увеличения напряжений на индуктивности и емкости по сравнению с приложенным внешним напряжением. Цепь в целом ведет себя так, как будто в ней нет реактивных сопротивлений ($z = r$, $\cos \varphi = 1$).

Итак, резонанс напряжений в электрической цепи возникает при выполнении двух условий: а) индуктивное сопротивление x_L равно емкостному x_C ($x = x_L - x_C = 0$) и б) активное сопротивление меньше волнового $r < \rho$.

Характеристикой контура, определяющей его способность «настраиваться в резонанс», является резонансная кривая — зависимость действующего значения тока от частоты приложенного напряжения (рис. 4.39).

Резонансная кривая построена на основании закона Ома для данной цепи

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

при переменном значении угловой частоты приложенной внешней э. д. с. Максимум действующего значения тока наступает при $\omega = \omega_0$.

Максимум проявляется более резко при меньших значениях активного сопротивления r , малом затухании — d :

$$d = \frac{r}{p}; Q = \frac{1}{d} = \frac{p}{r}. \quad (4.49)$$

Говорят, что при этом добротность (Q) контура лучше — лучше его избирательные свойства, контур легче «настраивается» в резонанс.

При резонансе токов (рис. 4.40) взаимно компенсируются индуктивная $b_L = \frac{1}{\omega L}$ и емкостная $b_C = \omega C$ проводимости $b_L = b_C$.

Полная проводимость цепи принимает при резонансе наименьшее значение

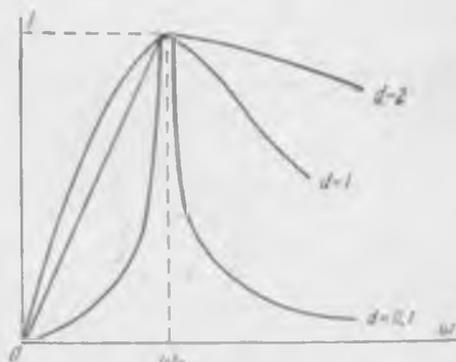


Рис. 4.39

$$y = \sqrt{g^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2},$$

становится равной только активной проводимости g , угол сдвига фаз между током и напряжением отсутствует $\varphi=0$, $\cos\varphi=1$. Ток в неразветвленной цепи минимальный, равен току

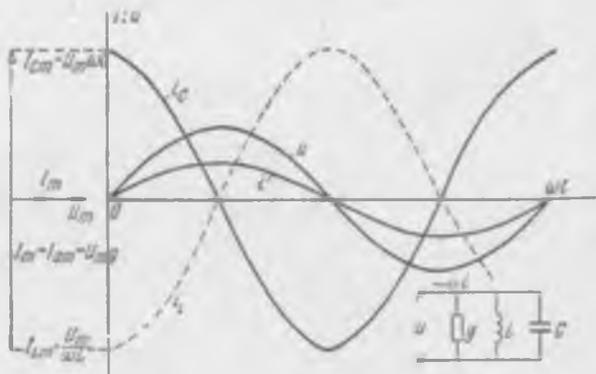


Рис. 4.40

в активной проводимости $I = Ug$ и не зависит от токов в реактивных элементах.

Токи в индуктивности $I_L = Ub_L$ и в емкости $I_C = Ub_C$ противоположны по фазе и равны по величине, так как равны друг

другу реактивные проводимости. При $g < b_L = b_C$ токи в реактивных элементах могут во много раз превышать ток в неразветвленной цепи, поэтому этот резонанс и называют резонансом токов. Итак, резонанс токов в электрической цепи возникает при выполнении двух условий: а) индуктивная проводимость b_L равна емкостной проводимости b_C , т. е. $b = 0$; б) активная проводимость цепи меньше индуктивной или емкостной $g < b_L$.

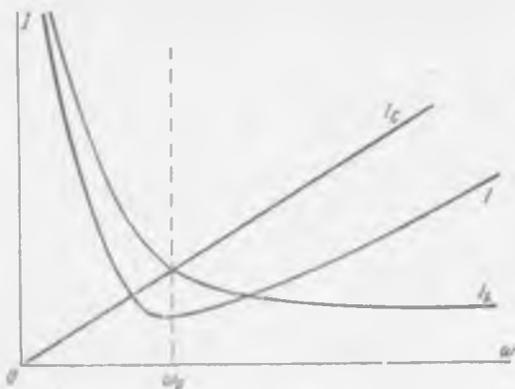


Рис. 4.11

На рис. 4.11 представлена резонансная кривая, построенная по закону Ома:

$$I = Uy = U \sqrt{g^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

при переменной угловой частоте приложенного к цепи напряжения.

При $\omega = \omega_0$ действующее значение тока имеет минимум. Из условия резонанса токов можно получить величину волновой проводимости γ , равную отношению тока в реактивном элементе к приложенному напряжению,

$$\gamma = \frac{I_C}{U} = \frac{I_L}{U} = b_C = b_L = \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Отношение активной проводимости к волновой называется затуханием цепи

$$d = \frac{g}{\gamma},$$

Из каких элементов состоит электрический колебательный контур? Какова физическая природа колебаний электрического колебательного контура? Чему равна угловая частота собственных незатухающих колебаний контура?

Что понимают под электрическим резонансом? Какого вида резонансы возможны в электрических цепях?

Чему равно полное сопротивление цепи при резонансе напряжений? Каков коэффициент мощности электрической цепи при резонансе?

Какие соотношения между напряжениями на реактивных элементах устанавливаются при резонансе напряжений? Какова величина тока при этом в электрической цепи? Как математически записываются условия, при которых возможен в цепи резонанс напряжений?

Что называют резонансной кривой и какой вид она имеет для последовательной цепи?

Что такое затухание контура? Что представляет собой добротность контура и какое влияние оказывает она на форму резонансной кривой?

В какой цепи возникает резонанс токов и почему он так называется? Чему равна полная проводимость цепи при резонансе токов и какова величина тока в неразветвленной ветви?

Какие соотношения между токами реактивных элементов устанавливаются при резонансе токов? При каких условиях возникает в цепи резонанс токов?

Каким путем можно достичь выполнения условия резонанса?

По какому закону изменяется во времени энергия электрического и магнитного полей и суммарная энергия электрического и магнитного поля при резонансе?

Почему резонанс токов широко используется для компенсации мощностей промышленных установок?

Каково практическое значение резонанса в электрических цепях?

Какую опасность могут представлять собой резонансные контуры в электрических цепях?

§ 4.13. Топографические диаграммы

Векторные диаграммы напряжений, построенные в строгом согласовании с местом расположения отдельных элементов цепи, называют топографическими диаграммами. Каждой точке на топографической диаграмме соответствует определенная точка схемы электрической цепи.

Познакомимся с методом построения топографической диаграммы на частном примере схемы рис. 4.43.

В масштабе тока проведен вектор тока \vec{I} по горизонтальной оси. Примем потенциал точки l схемы равным нулю и разместим соответствующую точку l с нулевым потенциалом на векторной диаграмме в начале координат (рис. 4.44). Падение напряжения на участке цепи $l-a$, содержащем только активное сопротивление r_1 , совпадает по фазе с током и равно по величине $U_1 = Ir$. В масштабе напряжения от точки l строим параллельно вектору тока вектор напряжения \vec{U}_1 . Конец вектора \vec{U}_1 обозначим a . Эта точка соответствует точке a на схеме.

Между точками a и b схемы включено сопротивление z_2 . Падение напряжения на нем $U_2 = Iz_2$ опережает по фазе вектор тока I на угол φ_2 , величину которого можно определить из треугольника сопротивлений $\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2}$.

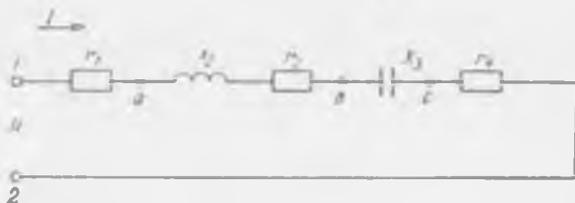


Рис. 4.43

Из точки a под углом φ_2 к горизонтальной оси проводим вектор \bar{U}_2 . Конец вектора \bar{U}_2 обозначим b . Между b и c включено емкостное сопротивление x_3 . Падение напряжения на нем $U_3 = Ix_3$ отстает по фазе от тока на $\frac{\pi}{2}$. Из точки b перпендикулярно направлению тока проводим вектор \bar{U}_3 . Конец вектора \bar{U}_3 соответствует точке c .

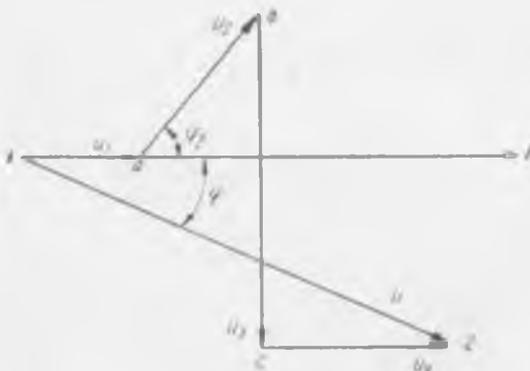


Рис. 4.44

Последний участок цепи $c-2$ содержит активное сопротивление r_4 , падение напряжения на нем равно $U_4 = Ir_4$ и совпадает по направлению с током. Начало вектора U_4 располагается в точке c , а конец — в точке 2 . Вектор, соединяющий начало координат (точку 1) и конец вектора U_4 (точку 2), есть приложенное напряжение ко всей цепи U .

При таком построении диаграммы можно определить напряжение между любой парой точек — a и c , a и 2 , 1 и b и т. д.

Для каждого из полученных напряжений можно построить треугольник напряжений. Разделив стороны его на величину тока цепи, получим треугольник сопротивлений. Тем самым находим параметры того участка цепи, для которого определено напряжение. Топографическая диаграмма наглядна и удобна для простых по конфигурации электрических цепей.

§ 4.14. Символический метод расчета цепей переменного тока

Символический метод или метод комплексных амплитуд основан на записи векторов комплексными числами, благодаря чему графическое решение заменяется аналитическим. Аналитическое решение всегда точнее графического. Символический метод сохраняет наглядность графического решения, так как в любой момент по символической записи электрических величин — токов и напряжений — легко построить соответствующую векторную диаграмму.

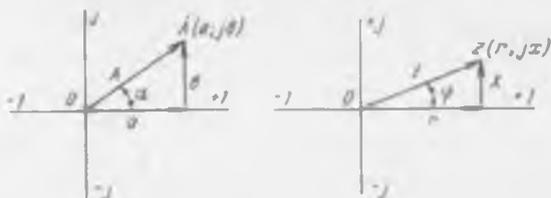


Рис. 4.45

Любой вектор тока или напряжения (рис. 4.45) можно расположить на комплексной плоскости, так чтобы начало его совпадало с началом координат. Положение на комплексной плоскости конца вектора соответствует точке на комплексной плоскости $a + jb$. С другой стороны, проекция вектора на ось вещественных равна a , на ось мнимых — b , т. е. вектор можно условно, символически записать комплексным числом $a + jb$. Длина вектора или модуль его

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Вектор повернут относительно оси вещественных на угол

$$\alpha = \arctg \frac{b}{a}.$$

Итак, синусоидально изменяющуюся величину можно представить вектором, а вектор можно записать аналитически при помощи комплексного числа

$$A = a + jb = Ae^{j\alpha} = A \cos \alpha + jA \sin \alpha,$$

т.е. синусоидально изменяющиеся во времени токи и напряжения можно условно записать комплексным числом.

Законы Кирхгофа в этом случае формулируются для комплексных действующих величин.

Первый закон — алгебраическая сумма комплексных действующих значений токов в ветвях, образующих узел электрической цепи, равна нулю

$$\sum I = 0. \quad (4.50)$$

Второй закон — в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма комплексных действующих значений приложенных напряжений равна алгебраической сумме комплексных действующих значений напряжений на участках этого замкнутого контура:

$$\sum \dot{E} = \sum \dot{U}. \quad (4.51)$$

Сопротивление тоже представляют комплексным числом. Треугольник сопротивлений прямоугольный. При совмещении катета, изображающего активное сопротивление, с осью вещественных второй катет x параллелен оси мнимых (рис. 4.45). Полное сопротивление запишется в виде комплексного числа

$$Z = r + jx = z (\cos \varphi + j \sin \varphi) = ze^{j\varphi}. \quad (4.52)$$

Проводимость в комплексной форме

$$Y = \frac{1}{z} = \frac{1}{ze^{j\varphi}} = \frac{1}{z} e^{-j\varphi} = ye^{-j\varphi} = g - jb. \quad (4.53)$$

Используя символическую форму записи электрических величин, можно записать закон Ома в символической форме: комплекс действующего значения тока прямо пропорционален комплексу действующего значения напряжения и обратно пропорционален комплексу сопротивления

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \dot{U}Y. \quad (4.54)$$

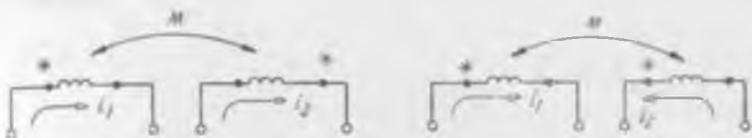
При использовании символической формы записи законов Кирхгофа и Ома появляется полная аналогия в методах расчета цепей переменного и постоянного тока. Все методы расчета электрических цепей постоянного тока применимы в символической форме к расчетам цепей переменного тока.

В частности, расчет электрической цепи (рис. 4.46) методом преобразования в символической форме будет выглядеть следующим образом. Ток в неразветвленной части цепи

$$i_1 = \frac{\dot{U}}{Z_s},$$

При последовательном согласном включении эквивалентная индуктивность цепи

$$L_s' = L_1 + L_2 + 2M.$$



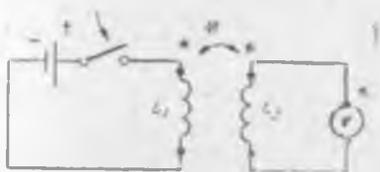
Р и с. 4.53

При встречном включении

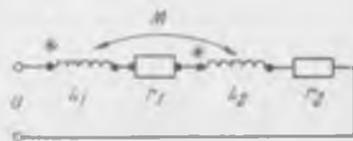
$$L_s'' = L_1 + L_2 - 2M.$$

Если цепь находится под синусоидальным напряжением, то, используя символический метод, можно записать второй закон Кирхгофа

$$\dot{U} = (r_1 + r_2)\dot{I} + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)\dot{I}.$$



Р и с. 4.54



Р и с. 4.55

Выражение ωM определяет сопротивление взаимной индукции, знак которого (плюс или минус) зависит от способа включения индуктивно связанных цепей — согласное или встречное.

Степень индуктивной связи двух ветвей цепи характеризуют коэффициентом связи

$$k_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (4.57)$$

Коэффициент связи всегда меньше единицы и определяет долю магнитного потока взаимоиндукции от потоков самоиндукции.

Падение напряжения на ветви, индуктивно связанной с другой ветвью электрической цепи, зависит от токов в этих ветвях.

Для индуктивно связанных ветвей нельзя воспользоваться законом Ома. Это накладывает ограничение в применении методов расчета к индуктивно связанным цепям. Непосредственно применимы только законы Кирхгофа и метод контурных токов. Для возможности использования любого другого метода необходимо предварительно от индуктивной связи перейти к электрической, т. е. эквивалентировать индуктивно связанную цепь цепью электрической без индуктивной связи.

Самым характерным примером индуктивно связанных цепей является трансформатор. При помощи последнего преобразуют переменный ток одного напряжения в переменный ток другого, более высокого или низкого напряжения. Энергия посредством переменного магнитного потока взаимной индукции передается из одного контура цепи в другой.

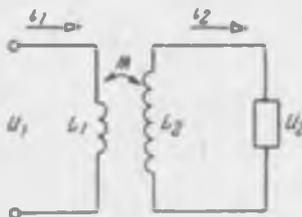


Рис. 4.56

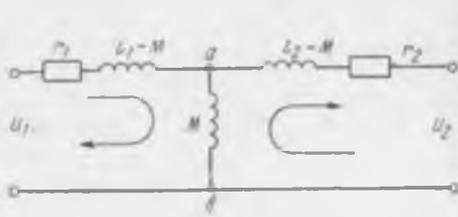


Рис. 4.57

Трансформаторы состоят из двух или нескольких индуктивно связанных обмоток. Трансформатор, обмотки которого нанесены на сердечник, выполненный из ферромагнитного материала, называют трансформатором со сталью; если же сердечник выполнен не из ферромагнитного материала, то такой трансформатор называют воздушным.

Воздушные трансформаторы применяются при высоких частотах в некоторых измерительных устройствах. Обмотка трансформатора, к которой подводится напряжение, называется первичной обмоткой, а с которой напряжение снимается — вторичной обмоткой.

Уравнения по второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной цепи трансформатора (рис. 4.56) имеют вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}, \\ -u_2 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}. \end{aligned} \quad (4.58)$$

Если во вторичной цепи трансформатора изменить условное направление тока на противоположное, то изменится знак

у э.д.с. взаимной индукции, и уравнения трансформатора можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \\ -u_2 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}. \end{aligned} \quad (4.59)$$

При синусоидальном приложенном напряжении в установившемся режиме уравнения трансформатора можно представить в символической форме:

$$U_1 = r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2, \quad (4.60)$$

$$-j\omega M \dot{I}_1 = r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + U_2. \quad (4.61)$$

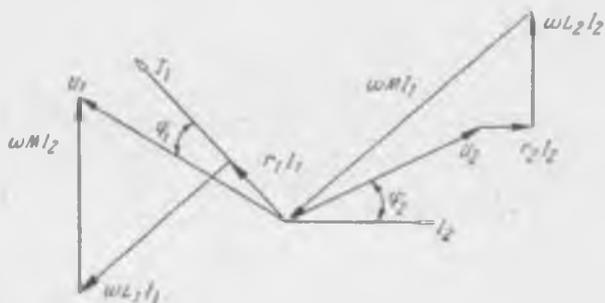


Рис. 4.58

Для воздушного трансформатора можно составить эквивалентную схему замещения. Для этого сделаем несложные преобразования уравнений (4.60) и (4.61):

$$\begin{aligned} U_1 &= r_1 \dot{I}_1 + j\omega(L_1 - M) \dot{I}_1 + j\omega M(\dot{I}_1 + \dot{I}_2), \\ -U_2 &= r_2 \dot{I}_2 + j\omega(L_2 - M) \dot{I}_2 + j\omega M(\dot{I}_1 + \dot{I}_2). \end{aligned} \quad (4.62)$$

Эквивалентная схема трансформатора, составленная в соответствии с полученными уравнениями (4.62), дана на рис. 4.57. При помощи схемы замещения индуктивная связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора заменяется связью электрической. Общую ветвь первичного и вторичного контуров *ab* называют ветвью намагничивания. Замена индуктивной связи электрической упрощает расчеты электрических схем, содержащих трансформаторы.

Для анализа работы трансформатора полезно построить векторную диаграмму, для чего воспользуемся уравнениями (4.60) и (4.61).

По любому направлению, например по горизонтальной оси слева направо, проводится вектор тока нагрузки \dot{I}_2 (рис. 4.58).

Под углом φ_2 к вектору тока \vec{I}_2 в сторону опережения, при индуктивном характере нагрузки, располагается вектор падения напряжения на нагрузке \vec{U}_2 . Из конца вектора \vec{U}_2 параллельно вектору тока проводится вектор падения напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора $\vec{r}_2 \vec{I}_2$. Вектор напряжения $\omega L_2 \vec{I}_2$, уравнивающего э. д. с. самоиндукции вторичной обмотки трансформатора, опережает вектор тока на $\frac{\pi}{2}$. Вектор $\omega L_2 \vec{I}_2$ проведен из конца $\vec{r}_2 \vec{I}_2$, перпендикулярно направлению тока, вверх.

Итак, на диаграмме построены три вектора \vec{U}_2 , $\vec{r}_2 \vec{I}_2$ и $\omega L_2 \vec{I}_2$, сумма которых, согласно уравнению (4.61), равна э. д. с. взаимной индукции $-j\omega M I_1$. Ток \vec{I}_1 опережает э. д. с. на $\frac{\pi}{2}$ или соответственно отстает на $\frac{\pi}{2}$ от напряжения, уравнивающего эту э. д. с.

Проводим вектор тока \vec{I}_1 . Приступаем к построению уравнения (4.60). Падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора совпадает по фазе с током в первичной цепи — вектор $r_1 \vec{I}_1$ откладываем по направлению вектора тока \vec{I}_1 из начала координат. Из конца вектора $r_1 \vec{I}_1$ достраиваем вектор падения напряжения $\omega L_1 \vec{I}_1$, уравнивающего э. д. с. самоиндукции первичной обмотки трансформатора. Из конца вектора $\omega L_1 \vec{I}_1$ проводим вектор $\omega M \vec{I}_2$ падения напряжения, уравнивающего э. д. с. взаимной индукции в первичной обмотке трансформатора. Вектор, соединяющий начало координат с концом вектора $\omega M \vec{I}_2$, представляет собой, согласно уравнению (4.60), приложенное к первичной обмотке трансформатора напряжение U_1 . На векторной диаграмме, если ее построить в масштабе, наглядно видны соотношения токов, напряжений, сдвиги по фазе, влияние величины и характера нагрузки.

Задачи. 4.60. Две реактивные катушки, индуктивности которых $L_1 = 0,1$ гн и $L_2 = 0,2$ гн, включены последовательно.

Определить ток, если приложено напряжение

$$U = \sqrt{2} \cdot 220 \sin 314t \text{ в,}$$

взаимная индуктивность между катушками $M = 0,1$ гн, катушки включены согласно; встречно.

Определить коэффициент связи.

Ответ: $I = 1,4$ а; $I = 7$ а; $k_{св} = 0,7$.

4.61. Трансформатор без сердечника имеет реактивное сопротивление первичной цепи $x_1 = 40$ ом, а вторичной $x_2 = 90$ ом. Коэффициент связи между обмотками $k_{св} = 0,5$.

Определить сопротивление взаимной индукции обмоток трансформатора.

Ответ: $x_M = 30$ ом.

4.62. Воздушный трансформатор имеет сопротивления первичной обмотки $x_1=40$ ом, $r_1=30$ ом, сопротивления вторичной обмотки $x_2=90$ ом, $r_2=30$ ом, сопротивление взаимной индукции 30 ом. Первичная обмотка трансформатора включена на $U=100$ в.

Определить напряжение вторичной обмотки в режиме холостого хода трансформатора.

Определить ток во вторичной цепи при коротком замыкании трансформатора.

О т в е т: $U_{2х.х}=60$ в, $I_{2к.з}=0,7$ а.

Вопросы для самопроверки

Какие электрические цепи называют индуктивно связанными цепями? Что понимают под согласным включением индуктивно связанных цепей? Какое включение индуктивно связанных цепей называют встречным?

Как опытным путем можно определить величину взаимной индуктивности двух контуров?

Что понимают под эквивалентной индуктивностью связанных цепей? Что такое коэффициент связи?

В чем заключаются особенности расчета индуктивно связанных цепей?

Укажите области применения трансформатора без сердечника. Составьте уравнения трансформатора в дифференциальной форме и в символической форме записи.

Начертите схему замещения воздушного трансформатора. Каково значение схемы замещения трансформатора?

Постройте векторную диаграмму воздушного трансформатора.

ГЛАВА 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

§ 5.1. Получение э. д. с. и токов, сдвинутых по фазе

Электрическую энергию вырабатывают, передают на расстояние и потребляют в основном как энергию трехфазного тока.

Системой трехфазного тока или трехфазной системой называется совокупность трех цепей, в которых действуют в простейшем случае три э.д.с. одной и той же час-

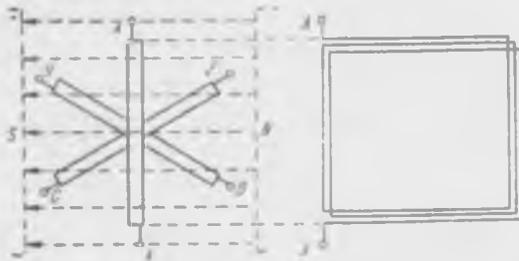


Рис. 5.1

тоты, но сдвинутые по фазе. Наиболее часто э.д.с. источников трехфазного тока смещены по фазе одна относительно другой на 120° .

Возможность получения таких э.д.с. т. е. принцип работы генератора трехфазного тока, можно отобразить с помощью рис. 5.1. На нем показаны три одинаковые рамки AX , BY , CZ , расположенные в пространстве симметрично одна по отношению к другой. Благодаря этому при равномерном вращении рамок с угловой скоростью ω в неподвижном равномерном магнитном поле или, наоборот, при вращении поля относительно неподвижных рамок в них будут индуцироваться три одинаковые синусоидальные э.д.с. (см. § 4.1), смещенные по фазе на 120° :

$$\begin{aligned}
 e_1 &= E_m \sin \omega t; \\
 e_2 &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ); \\
 e_3 &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ).
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Графически эти э.д.с. могут быть изображены тремя синусоидами (рис. 5.2, а), сдвинутыми на треть периода, или же тре-

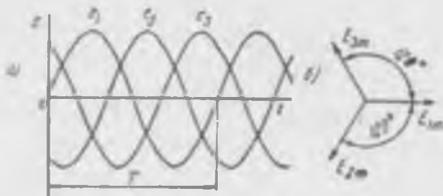


Рис. 5.2

мя векторами (рис. 5.2, б). Из соотношений (5.1) и диаграмм видно, что сумма мгновенных значений трех э.д.с. в любой момент времени равна нулю.

Очевидно, что таким же путем можно создать любое число э.д.с., смещенных по фазе на угол $\frac{2\pi}{m}$, т. е. создать m -фазную (многофазную) систему. На практике в некоторых специаль-

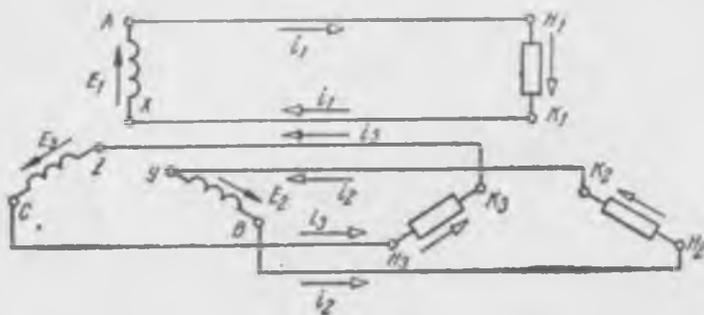


Рис. 5.3

ных случаях применяют 6 и 12-фазные системы.

Схема трехфазной системы изображена на рис. 5.3. Слева показаны расположенные симметрично обмотки (рамки) источника, в которых индуктируются три сдвинутые по фазе э.д.с.; справа — подключенные к обмоткам приемники H_1K_1 , H_2K_2 , H_3K_3 . Схема трехфазной системы (рис. 5.3) содержит три электрически несвязанные цепи, каждая из которых состоит из обмотки источника, приемника и двух соединительных проводов и представляет собой так называемую фазу трехфазной системы. Аналогично обмотка источника носит название его

фазы, а приемник представляет собой фазу нагрузки. Действующие в фазах э.д.с., напряжения и токи называются соответственно фазными величинами.

Так, напряжения, действующие между началом и концом обмотки источника или между началом и концом приемника, называются соответственно фазными напряжениями источника или приемника ($U_{1\phi}$, $U_{2\phi}$, $U_{3\phi}$). Если сопротивление соединительных проводов настолько мало, что им можно пренебречь, фазные напряжения источника и приемника будут одинаковыми.

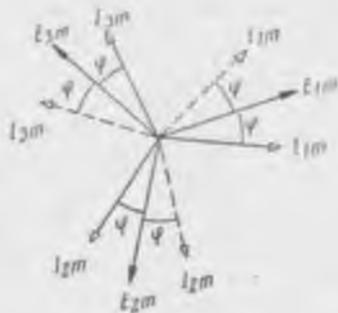


Рис. 5.4

В фазах трехфазной системы протекают фазные токи i_1 , i_2 , i_3 . Когда сопротивления приемников линейны, мгновенные значения этих токов, как и э.д.с. источника, будут изменяться по закону синуса. При одинаковых по величине и характеру сопротивлениях всех приемников (или, как говорят, при равномерной, симметричной нагрузке) максимальные значения фазных токов будут равны и сдвинуты на 120° одно относительно другого. По отношению же к действующей в фазе э.д.с. каждый фазный ток будет смещен на угол $\pm\varphi$ в зависимости от характера сопротивлений приемников (рис. 5.4). В этом случае сумма мгновенных значений токов фаз

будет равна нулю.

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \sin(\omega t \pm \varphi), \\ i_2 &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ \pm \varphi), \\ i_3 &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ \pm \varphi) \end{aligned} \quad (5.2)$$

будет равна нулю.

Следовательно, если объединить три обратных провода фаз, соединяющих концы приемников K_1 , K_2 и K_3 с концами обмоток источника X , Y и Z (см. рис. 5.3) в один общий провод, то в нем при равномерной нагрузке ток будет равен нулю, и этот провод вообще можно исключить из схемы.

Из этого следует, что переход от трехфазной системы с электрически несвязанными фазами к системе с тремя электрически связанными фазами дает возможность уменьшить в два раза число соединительных проводов. В этом одно из основных достоинств трехфазной системы.

В системах с электрически связанными фазами применяются две схемы соединения источников и приемников: схема звезды и схема треугольника.

Задачи. 5.1. Максимальное значение синусоидальных э. д. с. трехфазного источника $E_m = 100$ в. Записать мгновенные значения э. д. с., если в начальный момент времени э. д. с. $e_1 = 86$ в. Доказать, что сумма мгновенных значений э. д. с. в любой момент времени равна нулю.

Решение. Мгновенное значение первой э. д. с. в любой момент времени равно

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi) = 100 \sin(\omega t + \psi),$$

при $t = 0$

$$e_1 = 100 \sin \psi = 86 \text{ в.}$$

откуда

$$\sin \psi = 0,86; \psi \cong 60^\circ$$

Мгновенные значения э. д. с. можно выразить следующими соотношениями:

$$e_1 = 100 \sin(\omega t + 60^\circ);$$

$$e_2 = 100 \sin(\omega t - 60^\circ);$$

$$e_3 = 100 \sin(\omega t + 180^\circ).$$

Для момента времени, которому соответствует $\omega t = 90^\circ$,

$$e_1 = 100 \sin 150^\circ = 50 \text{ в.};$$

$$e_2 = 100 \sin 30^\circ = 50 \text{ в.};$$

$$e_3 = 100 \sin 270^\circ = -100 \text{ в.}$$

Следовательно, сумма мгновенных значений э. д. с.

$$e_1 + e_2 + e_3 = 50 + 50 - 100 = 0.$$

Аналогично можно показать, что в любой момент времени сумма мгновенных значений э. д. с. равна нулю.

5.2. Построить графики изменения э. д. с. задачи 5.1 и соответствующую им векторную диаграмму. Проверить на графиках для различных моментов времени, что сумма мгновенных значений э. д. с. равна нулю.

Вопросы для самопроверки

Что представляет собой система трехфазного тока?

Как получить трехфазную и m -фазную систему э. д. с.?

Как записать и графически изобразить э. д. с. трехфазной цепи?

Что такое фаза трехфазной системы?

В чем состоит преимущество трехфазной системы с электрически связанными фазами по сравнению с системой с электрически несвязанными фазами?

§ 5.2. Схема соединения звездой

Для получения схемы звезды концы обмоток соединяют в общую так называемую нулевую точку O (рис. 5.5). Аналогично концы фаз приемников объединяют в нулевой точке нагрузки O' . Соединение приемников с источником осуществляют проводами линии передач ($A-1$, $B-2$, $C-3$) или линейными проводами. В некоторых случаях нулевые точки O и O' соединяют четвертым проводом, получившим название нулевого или нейтрального провода.

Помимо понятий фазных величин, для системы с электрически связанными фазами используют дополнительно понятия линейных величин. Так, токи, протекающие в линейных прово-

дах, получили название линейных токов, а напряжения, действующие между линейными проводами — линейных напряжений.

Выясним, какова зависимость между фазным и линейным токами, фазным и линейным напряжениями для соединения звездой. Из схемы видно, что в линейном проводе и в последовательно соединенных с ним обмотке источника и приемнике

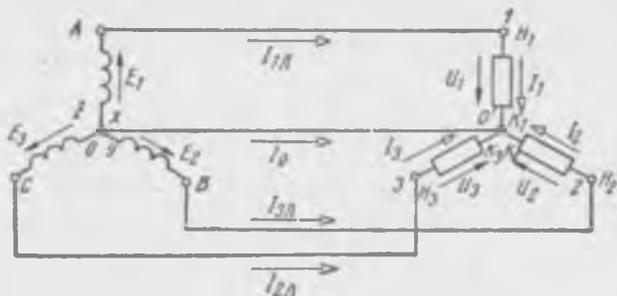


Рис. 5.5

будет протекать один и тот же ток. Следовательно, для звезды линейный ток равен соответствующему фазному току

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}. \quad (5.3)$$

Далее, принимая во внимание указанные на схеме направления векторов фазных напряжений, на основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{12} &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2; \\ \dot{U}_{23} &= \dot{U}_2 - \dot{U}_3; \\ \dot{U}_{31} &= \dot{U}_3 - \dot{U}_1, \end{aligned} \quad (5.4)$$

т. е. в общем случае линейное напряжение равно векторной разности двух соответствующих фазных напряжений.

На рис. 5.6 показаны векторы фазных напряжений U_1 , U_2 и U_3 , угол сдвига фаз между которыми может отличаться от 120° . Линейные напряжения U_{12} , U_{23} , U_{31} в соответствии с соотношениями (5.4) будут изображаться векторами $O'-4$, $O'-5$ и $O'-6$ или $1-2$, $2-3$ и $3-1$.

При равномерной нагрузке векторы фазных напряжений будут сдвинуты один относительно другого на угол 120° и треугольники $1-O'-2$, $2-O'-3$, $3-O'-1$ будут равнобедренными, причем углы у их основания равны 30° . Из этого следует, например, что

$$U_{12} = 2U_1 \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_1. \quad (5.5)$$

Аналогично

$$U_{23} = \sqrt{3}U_{\phi}, U_{31} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

Таким образом, линейное напряжение при равномерной нагрузке в $\sqrt{3}$ раз больше фазного

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}. \quad (5.6)$$

При наличии нулевого провода на основании первого закона Кирхгофа для схемы рис. 5.5 можно записать

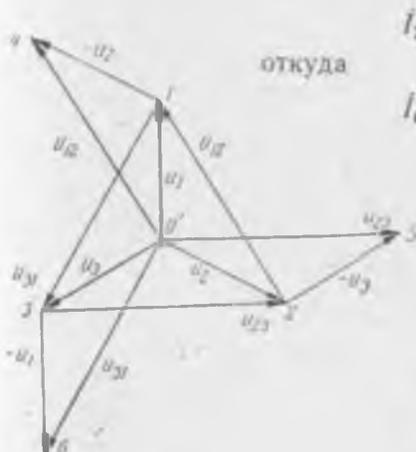


Рис. 5.6

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_0 = 0,$$

$$I_0 = -(I_1 + I_2 + I_3),$$

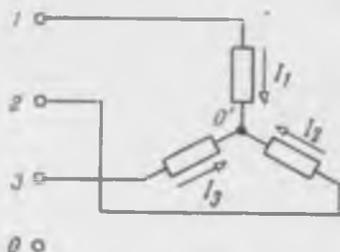


Рис. 5.7

т. е. вектор тока нулевого провода равен вектору суммы фазных токов и противоположен ему по направлению.

Изменение любого фазного тока будет влиять только на ток нулевого провода и не будет отражаться на остальных фазных токах. Приемники работают в этой схеме независимо один от другого, как и в схеме с электрически несвязанными фазами.

В случае равномерной нагрузки фазные токи одинаковы по величине и сдвинуты по фазе на 120° . Поэтому их сумма равна нулю. Следовательно, будет равен нулю и ток нулевого провода. Отсюда можно сделать вывод, что при равномерной нагрузке нет необходимости включать нулевой провод, можно использовать для включения приемников схему звезды без нулевого провода (см. рис. 5.7).

Для схемы рис. 5.7 при любой нагрузке справедливо соотношение

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (5.7)$$

Из него видно, что изменение тока одной какой-нибудь фазы будет вызывать такое изменение тока двух других фаз, при котором сумма векторов трех токов всегда равна нулю (рис. 5.8).



Рис. 5.8

Например, уменьшение тока I_1 от значения $I_1 = I_2 = I_3$ при равномерной нагрузке до нуля приведет к уменьшению второго и третьего токов до

$$I_2' = I_3' = I_2 \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} I_2.$$

Причем соотношение (5.7) сохраняется не только за счет изменения величины токов, но и за счет изменения угла сдвига фаз между ними даже при неизменном характере нагрузки.

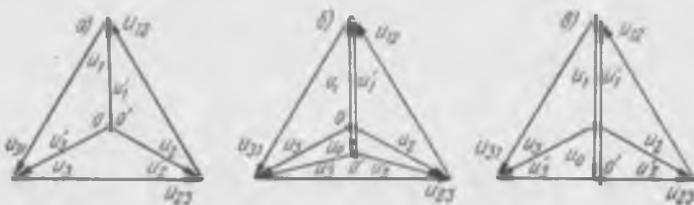


Рис. 5.9

Если при этом сопротивления второго и третьего приемников остаются неизменными, то изменение их токов будет происходить только за счет изменения фазных напряжений (рис. 5.9). Таким образом, возникновение неравномерности нагрузки в схеме звезды без нулевого провода будет сопровождаться перераспределением или, как говорят, перекасом фазных напряжений — на фазе с меньшей нагрузкой будет действовать повышенное напряжение, а на фазах с большей нагрузкой — пониженное напряжение. Повышенное напряжение может вызвать перегрев или перегорание приемников; опасно для их изоляции. Понижение напряжения на фазах приведет к тому, что они не получат и не отдадут расчетной мощности.

Поэтому, когда возможна неравномерность нагрузки, схему звезды без нулевого провода для ее соединения не применяют. Такую нагрузку соединяют по схеме звезды с нулевым проводом. Для большей надежности работы нулевого провода, т. е. для предотвращения перехода от звезды с нулевым проводом к звезде без нулевого провода, в нем не ставят предохранители.

Фазные напряжения приемников в схеме (см. рис. 5.7) при неравномерной нагрузке будут отличаться от фазных напряжений источника, так как между нулевыми точками O и O' будет существовать напряжение U_0 (см. рис. 5.9, *б* и *в*), зависящее от величины и характера нагрузки фаз.

Выясним, как можно определить напряжения приемников по их проводимостям Y_1, Y_2, Y_3 и напряжениям фаз источника $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$. Токи фаз в любом случае будут иметь значения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U}'_1 Y_1 = (\dot{U}_1 - \dot{U}_0) Y_1; \\ \dot{I}_2 &= \dot{U}'_2 Y_2 = (\dot{U}_2 - \dot{U}_0) Y_2; \\ \dot{I}_3 &= \dot{U}'_3 Y_3 = (\dot{U}_3 - \dot{U}_0) Y_3. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Принимая во внимание соотношение (5.7), можно записать

$$(\dot{U}_1 - \dot{U}_0) Y_1 + (\dot{U}_2 - \dot{U}_0) Y_2 + (\dot{U}_3 - \dot{U}_0) Y_3 = 0,$$

откуда

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3}. \quad (5.9)$$

Таким образом, определив по формуле (5.9) напряжение между нулевыми точками источника и приемников, на основании соотношений (5.8) можно рассчитать токи фаз (метод двух узлов).

В заключение отметим, что схему звезды применяют для соединения приемников в тех случаях, когда их номинальное напряжение U_n меньше линейного напряжения U_L источника питания в $\sqrt{3}$ раз, т. е.

$$U_n = \frac{U_L}{\sqrt{3}}. \quad (5.10)$$

По схеме звезды без нулевого провода включают равномерную нагрузку (например, электродвигатели, электрические печи, трансформаторы и другие трехфазные устройства). По схеме звезды с нулевым проводом включают неравномерную нагрузку (например, осветительную), а также обмотки трансформаторов и генераторов трехфазного тока.

Задачи. 5.3. К трехфазной сети с линейными напряжениями 220 в подключена соединенная звездой равномерная нагрузка, каждая фаза которой содержит последовательно включенные сопротивления $r=11$ ом и $x_L=6,35$ ом.

Определить фазные напряжения и токи, коэффициент мощности фаз и построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Решение. Фазные напряжения

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ в.}$$

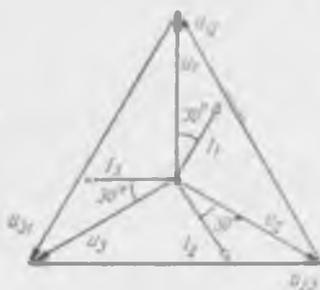


Рис. 5.10

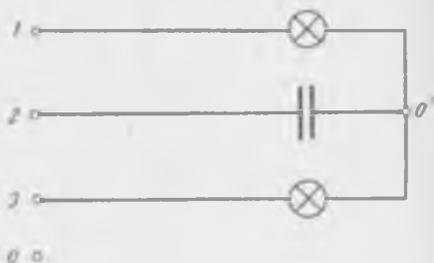


Рис. 5.11

Общие сопротивления фаз

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{11^2 + 6,35^2} = 12,7 \text{ ом.}$$

Фазные токи

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z} = \frac{127}{12,7} = 10 \text{ а.}$$

Коэффициент мощности фаз

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{11}{12,7} = 0,866, \varphi = 30^\circ.$$

Векторная диаграмма напряжений и токов приведена на рис. 5.10.

5.4. К источнику трехфазного тока с фазными напряжениями 100 в подключены две лампы и конденсатор (рис. 5.11). Сопротивления $r_1=r_2=10$ ом. Определить напряжения ламп и конденсатора, их токи и построить векторную диаграмму цепи.

Решение. Фазные напряжения источника смещены на 120° (рис. 5.12) и их можно записать в комплексном виде:

$$U_1 = U_2 = 100 \text{ в.}$$

$$U_3 = -100 \cos 60^\circ - j 100 \sin 60^\circ = -50 - j 86,6 \text{ в.}$$

$$U_3 = -100 \cos 60^\circ + j 100 \sin 60^\circ = -50 + j 86,6 \text{ в.}$$

Проводимости фаз

$$Y_1 = Y_2 = \frac{1}{r_1} = 0,1 \text{ сим; } Y_3 = \frac{1}{-j x_c} = j 0,1 \text{ сим.}$$

Напряжение между нулевыми точками $O-O'$

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} = \frac{100 \cdot 0,1 + (-50 - j86,6) / 0,1 + (-50 + j86,6) 0,1}{0,1 + j0,1 + 0,1} = 62 - j12,7 \text{ в.}$$

Напряжение фаз нагрузки:

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = 100 - 62 + j12,7 = 38 + j12,7 \text{ в.}$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_2 - \dot{U}_0 = -50 - j86,6 - 62 + j12,7 = -112 - j73,9 \text{ в.}$$

$$\dot{U}'_3 = \dot{U}_3 - \dot{U}_0 = -50 + j86,6 - 62 + j12,7 = -112 + j99,3 \text{ в.}$$

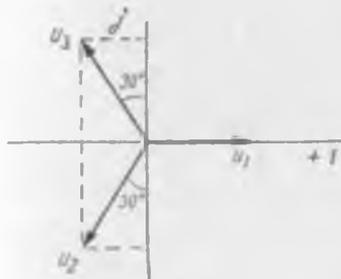


Рис. 5.12

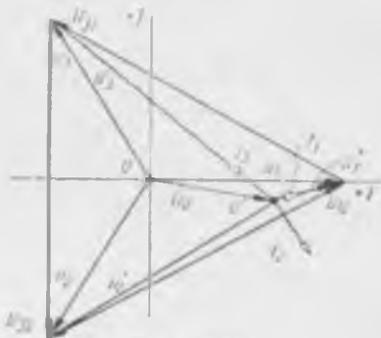


Рис. 5.13

Токи фаз:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}'_1 Y_1 = (38 + j12,7) 0,1 = 3,8 + j1,27 \text{ а.}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}'_2 Y_2 = (-112 - j73,9) / 0,1 = 7,39 - j11,2 \text{ а.}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{U}'_3 Y_3 = (-112 + j99,3) 0,1 = -11,2 + j9,93 \text{ а.}$$

Векторная диаграмма цепи изображена на рис. 5.13. Из диаграммы видно, что лампа, включенная в первую фазу, будет находиться под меньшим напряжением, чем вторая лампа. Первая лампа будет гореть тускло, вторая — ярко.

Таким образом, если в трехфазной сети неизвестен порядок чередования фаз (неизвестно, к каким фазам принадлежит зажимы цепи), его можно установить подключением двух ламп и конденсатора (указатель порядка чередования фаз), соединенных звездой без нулевого провода. Зажим, к которому подключен конденсатор, можно считать соединенным со второй фазой, а тот зажим, к которому подключена ярко горящая лампа, можно считать соединенным с третьей фазой.

5.5. К трехфазной сети с линейными напряжениями 380 в по схеме звезды с нулевым проводом подключена несимметричная нагрузка, сопротивление фаз которой $Z_1 = Z_2 = 19 + j11 \text{ ом}$, $Z_3 = 9,5 + j5,5 \text{ ом}$. Определить токи фаз и нулевого провода. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Ответ: $I_0 = 10 \text{ а.}$

5.6. По данным задачи 5.5 определить токи фаз и построить векторную диаграмму цепи, считая, что нагрузка соединена по схеме звезды без нулевого провода. Проверку решения осуществить на основании законов Кирхгофа.

Вопросы для самопроверки.

Как получить схему звезды с нулевым проводом и без него?

Какова зависимость между фазными и линейными токами, фазными и линейными напряжениями этих схем?

Почему при включении неравномерной нагрузки необходим нулевой провод, а при включении равномерной нагрузки можно обойтись без него?

К чему приведет включение неравномерной нагрузки по схеме звезды без нулевого провода?

Как определить напряжение между нулевыми точками источника и приемников при отсутствии нулевого провода?

Как определить фазное напряжение приемников в схеме звезды без нулевого провода?

Когда применяется схема звезды?

Какие устройства соединяются по схеме звезды с нулевым проводом и без него?

§ 5.3. Схема соединения треугольником

Для получения схемы треугольника конец первой обмотки источника соединяется с началом второй обмотки, конец второй — с началом третьей, конец третьей — с началом первой. Аналогично соединяются и приемники.

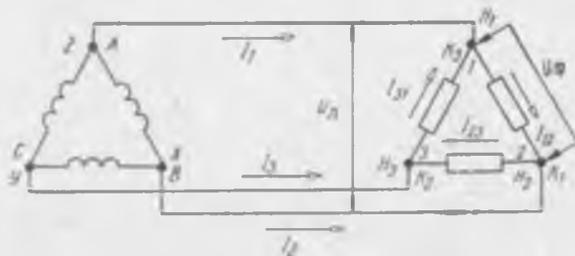


Рис. 5.14

На схеме рис. 5.14 оба основных элемента цепи — источник и приемники — соединены треугольником, ранее на схеме рис. 5.5 и то и другое было соединено звездой. Следует, однако, иметь в виду, что это сделано только для наглядности, так как необязательно соединение источника и приемников по одной и той же схеме.

Питание приемников, соединенных треугольником, осуществляется с помощью только трех линейных проводов. Прием-

ники включены непосредственно между линейными проводами. Поэтому для данной схемы справедливо соотношение

$$U_{\text{л}} = U_{\Phi}. \quad (5.11)$$

На основании первого закона Кирхгофа для узловых точек 1, 2 и 3 можно составить следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_{12} - \dot{I}_{31}; \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_{23} - \dot{I}_{12}; \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_{31} - \dot{I}_{23}, \end{aligned} \quad (5.12)$$

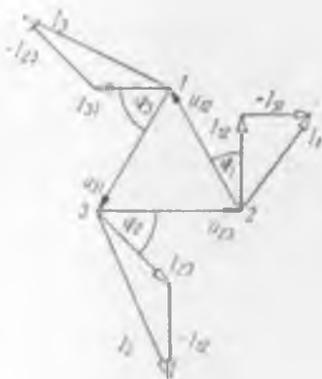


Рис. 5.15

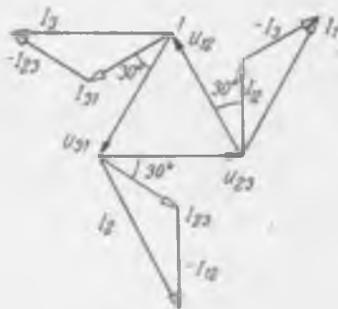


Рис. 5.16

т. е. в общем случае линейный ток треугольника равен в $\sqrt{3}$ раз больше фазного тока.

На рис. 5.15 представлена векторная диаграмма напряжений и токов треугольника, соответствующая индуктивному характеру нагрузки. При равномерной нагрузке фазные токи, как и напряжения, будут одинаковы по величине и сдвинуты по фазе на 120° . В этом случае треугольники токов (рис. 5.16) будут равнобедренными и углы у их вершин будут составлять 120° . Поэтому можно записать, что

$$I_1 = 2I_{12} \cos 30^\circ = \sqrt{3} I_{12}. \quad (5.13)$$

Аналогично

$$I_2 = \sqrt{3} I_{23}, I_3 = \sqrt{3} I_{31}.$$

Таким образом, при равномерной нагрузке линейный ток треугольника в $\sqrt{3}$ раз больше фазного тока

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\Phi}. \quad (5.14)$$

Ток любой фазы треугольника (см. рис. 5.14) может замыкаться через два линейных провода, минуя две другие фазы. Это обуславливает независимость фаз треугольника и нормальную их работу как при равномерной, так и при неравномерной нагрузке. Возможность нормального питания приемников при неравномерной нагрузке с помощью только трех проводов — одно из основных достоинств этой схемы по сравнению со схемой звезды. Недостатком же этой схемы можно считать то, что при обрыве одного линейного провода перестают нормально работать две прилегающие к нему фазы, в то время как при таком же повреждении в схеме звезды с нулевым проводом не работает только одна фаза.

Схему треугольника применяют для соединения приемников в тех случаях, когда их номинальное напряжение U_n равно линейному напряжению U_L источника питания, т. е.

$$U_n = U_L. \quad (5.15)$$

По этой схеме могут работать электродвигатели, трансформаторы, электрические печи и другая равномерная и неравномерная нагрузка.

Наиболее часто трехфазные приемники приходится подключать к источникам с напряжениями 220/127 в и 380/220 в. В числителе этих дробей указаны линейные напряжения, в знаменателе — фазные. Одни и те же приемники с номинальным напряжением $U_n = 220$ в в сеть 220/127 в в соответствии с соотношением (5.15) должны быть включены по схеме треугольника, в сеть 380/220 в в соответствии с соотношением (5.10) — по схеме звезды. В обоих случаях они будут находиться под номинальным напряжением и будут получать расчетную мощность.

Задачи. 5.7. По данным задачи 5.3 определить фазные и линейные токи и построить векторную диаграмму приемников, считая, что они включены треугольником.

Решение. Для соединения треугольником фазное напряжение равно линейному, поэтому токи фаз

$$I_\phi = \frac{U_L}{z} = \frac{220}{12,7} = 17,3 \text{ а}$$

Линейные токи

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi = 1,73 \cdot 17,3 = 30 \text{ а,}$$

т. е. линейные токи треугольника в три раза больше токов звезды при включении обеих схем в одну и ту же сеть.

Векторная диаграмма цепи приведена на рис. 5.16.

5.8. К трехфазной сети с линейными напряжениями 200 в подключены соединенные треугольником сопротивления $r = x_L = x_C = 10$ ом.

Определить фазные и линейные токи и построить векторную диаграмму цепи.

Решение. Совместив вектор первого линейного напряжения с осью вещественных величин комплексной плоскости, можно записать комплексное выражение линейных напряжений:

$$\begin{aligned}
 U_{12} &= U_{13} = 200 \text{ в}; \\
 U_{23} &= -200 \cos 60^\circ - j 200 \cos 30^\circ = -100 - j 173 \text{ в}; \\
 U_{31} &= -200 \cos 60^\circ + j 200 \cos 30^\circ = -100 + j 173 \text{ в}.
 \end{aligned}$$

Фазные токи:

$$\begin{aligned}
 i_{12} &= \frac{U_{12}}{r} = \frac{200}{10} = 20 \text{ а}; \\
 i_{23} &= \frac{U_{23}}{j x_L} = \frac{-100 - j 173}{j 10} = -17,3 + j 10 \text{ а}; \\
 i_{31} &= \frac{U_{31}}{-j x_C} = \frac{-100 + j 173}{-j 10} = -17,3 - j 10 \text{ а}.
 \end{aligned}$$

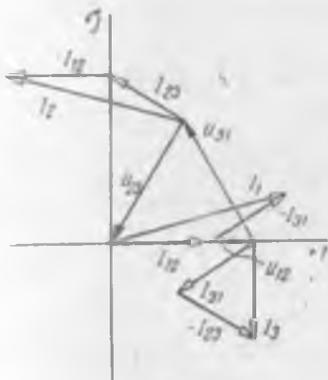


Рис. 5.17

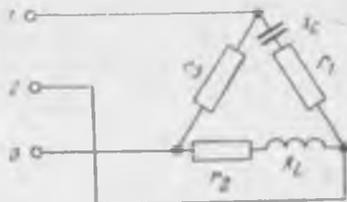


Рис. 5.18

Линейные токи:

$$\begin{aligned}
 i_1 &= i_{12} - i_{31} = 20 + 17,3 + j 10 = 37,3 + j 10 \text{ а}; \\
 i_2 &= i_{23} - i_{12} = -17,3 + j 10 - 20 = -37,3 + j 10 \text{ а}; \\
 i_3 &= i_{31} - i_{23} = -17,3 - j 10 + 17,3 - j 10 = -j 20 \text{ а}.
 \end{aligned}$$

Векторная диаграмма напряжений и токов изображена на рис. 5.17.

5.9. Определить фазные и линейные токи трехфазной цепи, в которой действуют линейные напряжения 220 в и все фазы содержат последовательно включенные сопротивления $r = x_c = 10 \text{ ом}$.

Построить векторную диаграмму цепи.

Ответ: $I_{\Delta} = 27 \text{ а}$.

5.10. Определить фазные и линейные токи цепи (рис. 5.18), если

$$r_1 = r_2 = r_3 = x_L = x_C = 5 \text{ ом}, U_{\Delta} = 100 \text{ в}.$$

Построить векторную диаграмму цепи. Для проверки решения учесть, что векторная сумма линейных токов должна быть равна нулю.

Вопросы для самопроверки

Как нужно соединить приемники или обмотки источников, чтобы они образовали схему треугольника?

Каковы соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами треугольника при равномерной нагрузке и в общем случае?

В каком случае применяют схему треугольника?
 В чем достоинство и недостаток этой схемы?
 Какие устройства можно включать по схеме треугольника?

§ 5.4. Мощность трехфазного тока

В общем случае активная мощность трехфазной цепи равна арифметической сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 + U_{2\phi} I_{2\phi} \cos \varphi_2 + U_{3\phi} I_{3\phi} \cos \varphi_3. \quad (5.16)$$

Реактивная мощность равна алгебраической сумме реактивных мощностей фаз

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = U_{1\phi} I_{1\phi} \sin \varphi_1 + U_{2\phi} I_{2\phi} \sin \varphi_2 + U_{3\phi} I_{3\phi} \sin \varphi_3. \quad (5.17)$$

Причем реактивная мощность индуктивностей берется со знаком плюс, а емкостей — со знаком минус.

Полная или кажущаяся мощность равна геометрической сумме общей активной и реактивной мощности

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.18)$$

При равномерной нагрузке напряжения токи и коэффициенты мощности всех фаз одинаковы, поэтому активная мощность трехфазной цепи равна

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi.$$

Если цепь соединена звездой, тогда

$$I_{\phi} = I_n, \quad U_{\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

и, следовательно,

$$P_Y = 3 \frac{U_n}{\sqrt{3}} I_n \cos \varphi = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi.$$

При соединении цепи треугольником

$$U_{\phi} = U_n, \quad I_{\phi} = \frac{I_n}{\sqrt{3}}$$

и мощность ее равна

$$P_{\Delta} = 3U_n \frac{I_n}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi.$$

Таким образом, активную мощность трехфазной цепи при равномерной нагрузке независимо от способа ее соединения можно определить по формуле

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \quad (5.19)$$

где U и I — линейное напряжение и линейный ток схемы.

Аналогично можно выразить реактивную и полную мощности цепи:

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi; \quad (5.20)$$

$$S = \sqrt{3} UI. \quad (5.21)$$

Задачи. 5.11. По данным задач 5.3 и 5.7 определить мощности S , P , Q цепи.

Решение. В обоих случаях в трехфазную цепь включена равномерная нагрузка. По условию первой задачи она соединена звездой и ее мощности будут равны:

$$S = \sqrt{3} UI = 1,73 \cdot 220 \cdot 10 = 3,8 \text{ ква};$$

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 10 \cdot 0,866 = 3,3 \text{ кат};$$

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 10 \cdot 0,5 = 1,9 \text{ квар}.$$

По условию второй задачи нагрузка соединена треугольником. Для нее будем иметь:

$$S = \sqrt{3} UI = 1,73 \cdot 220 \cdot 30 = 11,4 \text{ ква};$$

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 30 \cdot 0,866 = 9,9 \text{ кат};$$

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 30 \cdot 0,5 = 5,7 \text{ квар}.$$

Таким образом, если одни и те же сопротивления включены в цепь звездой и треугольником, мощность, потребляемая треугольником, в три раза больше мощности звезды.

5.12. Определить мощности трехфазной цепи по условию задачи 5.4.

Решение. Мощности фаз:

$$S_1 = U_1' \dot{I}_1^* = (38 + j12,7)(3,8 - j1,27) = 160 \text{ ва};$$

$$S_2 = U_2' \dot{I}_2^* = (-112 - j73,9)(7,39 + j11,2) = -j1800 \text{ ва};$$

$$S_3 = U_3' \dot{I}_3^* = (-112 + j99,3)(-11,2 - j9,93) = 2240 \text{ ва}.$$

Мощности цепи:

$$P = P_1 + P_2 = 160 + 2240 = 2,4 \text{ кат};$$

$$Q = Q_2 = 1,8 \text{ квар};$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2,4^2 + 1,8^2} = 3 \text{ ква}.$$

5.13. Определить мощности P , Q и S трехфазной цепи по условиям задачи 5.8.

Ответ: $P=4 \text{ кат}$, $Q=0$, $S=4 \text{ ква}$.

Вопросы для самопроверки

Как можно подсчитать мощность трехфазной цепи при неравномерной нагрузке?

Как определяются мощности S , P , Q при равномерной нагрузке?

§ 5.5. Вращающееся магнитное поле

Одним из достоинств системы трехфазного тока является возможность получения на ее основе вращающегося магнитного поля. Три одинаковых по величине тока создают равномер-

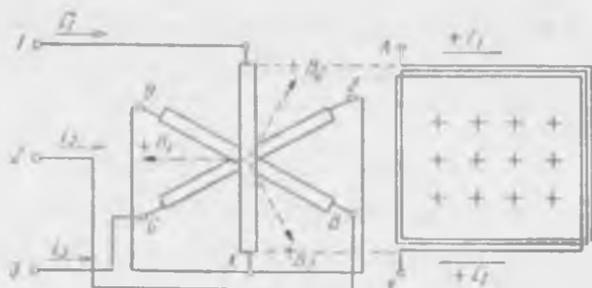


Рис. 5.19

ное вращающееся поле, если они и во времени (по фазе) и в пространстве смещены на 120° .

Оба эти условия выполняются, если к трехфазной сети подключить три одинаковые катушки, симметрично расположенные одна по отношению к другой (рис. 5.19). Мгновенные значения токов катушек будут равны:

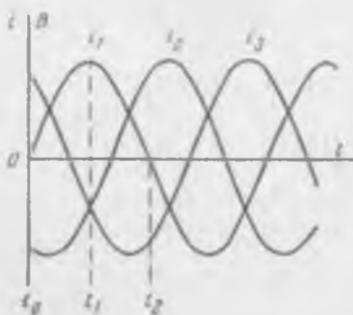


Рис. 5.20

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \sin \omega t; \\ i_2 &= I_m \sin (\omega t - 120^\circ); \\ i_3 &= I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (5.22)$$

и их можно изобразить графически тремя синусоидами, смещенными на треть периода (рис. 5.20). За положительное направление токов катушек примем такое направление, при котором токи протекают от начал катушек к их концам. Этим направлениям токов будут соответствовать положительные направления индукций

катушек. Причем, если катушки находятся в неферромагнитной среде, то закон изменения индукций их будет аналогичен характеру изменения токов (5.22).

Выясним, каковы будут величины и направления векторов индукции катушек, а также величина и направление вектора суммарной индукции для моментов времени t_0 , t_1 , t_2 . Из соотношений (5.22) видно, что для момента времени t_0

$$i_1 = 0, i_2 = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m, i_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m,$$

соответственно

$$B_1 = 0, B_2 = -\frac{\sqrt{3}}{2} B_m, B_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m,$$

т. е. в этот момент времени магнитное поле создается только второй и третьей катушками. Векторы их индукций и суммарной индукции показаны на рис. 5.21, а. Величина суммарного вектора

$$B = 2B_3 \cos 30^\circ = 2 \frac{\sqrt{3}}{2} B_m \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,5B_m.$$

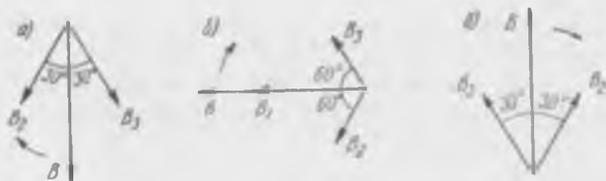


Рис. 5.21

Для момента времени t_1 , отстоящего от t_0 на четверть периода, $\omega t_1 = 90^\circ$ и, следовательно,

$$B_1 = B_m, B_2 = -\frac{1}{2} B_m, B_3 = -\frac{1}{2} B_m.$$

Векторы этих индукций представлены на рис. 5.21, б. Суммарный вектор равен

$$B = B_1 + 2B_2 \cos 60^\circ = B_m + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} B_m = 1,5B_m.$$

Для момента времени t_2 , отстоящего от t_0 на полпериода, $\omega t_2 = 180^\circ$ и поэтому

$$B_1 = 0, B_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m, B_3 = -\frac{\sqrt{3}}{2} B_m,$$

т. е. численные значения индукций будут такими же, как и для t_0 , а их направления будут противоположными (рис. 5.21, в).

Таким образом, и для момента времени t_2 вектор суммарной индукции имеет значение $B = 1,5 B_m$.

В любой другой момент времени это значение вектора суммарной индукции не изменяется. С течением времени изменяется лишь направление вектора. Из рис. 5.21 видно, что он равномерно вращается: за четверть периода поворачивается на четверть оборота, за полпериода — на пол оборота, за период —

на один оборот, т. е. три катушки создают равномерное (круговое) вращающееся магнитное поле.

Направление вращения поля зависит от порядка чередования фаз, к которым подключаются катушки. Если изменить его, например вторую катушку подключить к первой фазе, а первую — ко второй, направление вращения поля изменится на обратное.

При неправильном включении одной катушки, когда с концами двух других катушек соединен не конец, а ее начало, возникает неравномерное (эллиптическое) магнитное поле. В моменты времени, когда ток этой катушки равен нулю, индукция поля будет равна $1,5 B_m$, а при максимальном токе — только $0,5 B_m$. Направление вращения поля при этом будет обратным по сравнению с тем, каким оно было бы при правильном включении катушек.

Вращающееся магнитное поле лежит в основе работы трехфазных двигателей — асинхронных и синхронных, оно возникает также в трехфазных генераторах. На нем базируется работа многих измерительных приборов, например фазометров, тахометров.

Задачи. 5.14. Определить число оборотов вращающегося магнитного поля, создаваемого тремя одинаковыми катушками, смещенными на 120° и включенными в сеть трехфазного тока с частотой $f=50$ гц.

Решение. Поле трех катушек совершает один оборот за время одного периода T . Следовательно, за секунду оно будет совершать f оборотов, за минуту $60 f$ оборотов. При $f=50$ гц поле будет вращаться со скоростью

$$n = 60f = 60 \cdot 50 = 3000 \text{ об/мин.}$$

5.15. Поле трех катушек вращается со скоростью 750 об/мин.

Определить частоту тока катушек и длительность одного его периода.

Ответ: $T=0,08$ сек.

Вопросы для самопроверки

При каких условиях с помощью трех катушек можно создать равномерное вращающееся магнитное поле?

Какова индукция этого поля?

От чего зависит скорость вращения поля трех катушек?

Чем определяется направление вращения поля и как его можно изменить?

Каким будет поле трех катушек при неправильном включении одной катушки?

Где применяется вращающееся магнитное поле?

ГЛАВА 6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМИ Э. Д. С. И ТОКАМИ. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 6.1. Несинусоидальные переменные токи

Ранее мы рассматривали расчет электрических цепей с синусоидальными токами и напряжениями. Однако на практике часто встречаются случаи, когда напряжения и токи в электрической цепи несинусоидальны.

Несинусоидальные токи могут возникнуть по следующим причинам:



Рис. 6.1

а) источник электрической энергии дает несинусоидальное напряжение и все элементы цепи линейны;

б) источник электрической энергии дает синусоидальное напряжение, но один или несколько элементов цепи нелинейны;

в) источник электрической энергии дает несинусоидальное напряжение и электрическая цепь содержит одно или несколько нелинейных сопротивлений.

К источникам, дающим несинусоидальное напряжение, можно отнести выпрямители и феррорезонансные стабилизаторы напряжения. Так, выпрямитель, работающий по однополупериодной схеме выпрямления, дает напряжение, показанное на рис. 6.1. Выпрямитель, работающий по двухполупериодной схеме выпрямления, дает напряжение, изображенное на рис. 6.2. На рис. 6.3 показана кривая напряжения на выходе феррорезонансного стабилизатора.

Примером нелинейного сопротивления, искажающего форму кривой тока, является катушка со стальным сердечником,

подключенная к источнику синусоидального напряжения (рис. 6.4).

Рассмотрим порядок расчета линейной электрической цепи, находящейся под действием несинусоидального напряжения (рис. 6.5). Для удобства расчета несинусоидальное напряжение

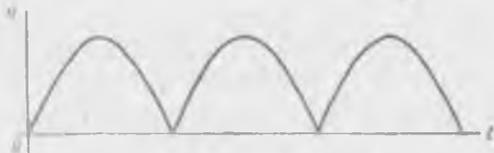


Рис. 62



Рис. 63

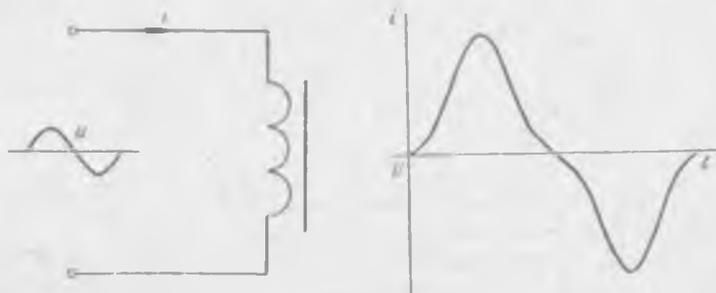


Рис. 64

источника раскладывается в ряд Фурье, т. е. представляется в виде суммы синусоид различных частот

$$u = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (6.1)$$

где U_0 — постоянная составляющая напряжения;
 $U_{1m}, U_{2m}, \dots, U_{km}$ — амплитуды первой, второй и других гармоник;

$\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k$ — начальные фазы первой, второй и других гармоник.

Амплитуды и фазы гармоник можно определить: аналитически, если известно математическое выражение кривой $u(t)$,

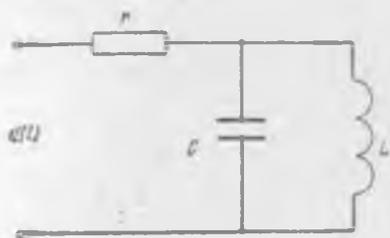


Рис. 6.5

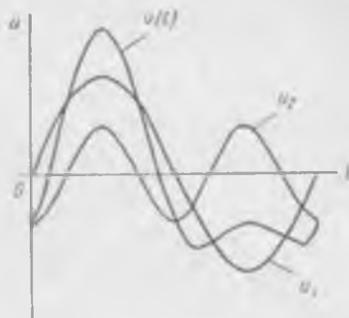


Рис. 6.6

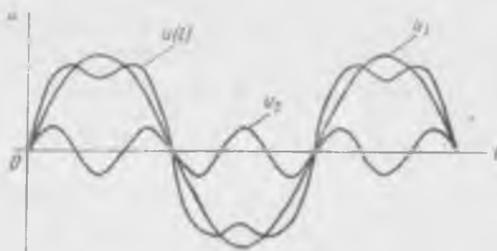


Рис. 6.7

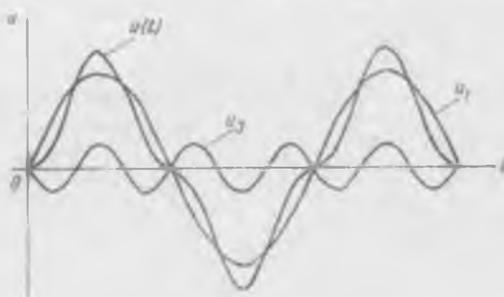


Рис. 6.8

графически, если кривая $u(t)$ задана в виде графика или осциллограммы, и экспериментально с помощью приборов, называемых аналлизаторами гармоник. Аналитические и графические методы излагаются в курсах математики. Так, кривая напряжения, приведенная на рис. 6.6, содержит первую и вторую гармоники. Кривые, приведенные на рис. 6.7 и 6.8, со-

держат первую и третью гармоники, причем последняя имеет противоположную фазу.

После того как несинусоидальное напряжение источника представлено в виде суммы гармоник, производится расчет токов в цепи от каждой гармоники напряжения в отдельности. При расчете токов от постоянной составляющей напряжения принимаем во внимание, что для постоянного тока конденсатор представляет бесконечно большое сопротивление, а индуктивная катушка обладает сопротивлением, равным нулю. Далее,

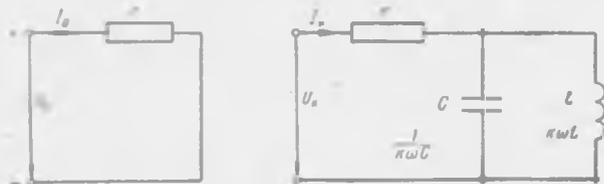


Рис. 6.9

с ростом номера гармоники k сопротивление конденсатора уменьшается $X_{kC} = \frac{1}{k\omega C}$, а сопротивление катушки возрастает $X_{kL} = k\omega L$.

На рис. 6.9 приведены расчетные схемы для постоянной составляющей и синусоидальных составляющих гармоник напряжения. Окончательно имеем

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k). \quad (6.2)$$

§ 6.2. Активная мощность несинусоидального тока. Действующее значение несинусоидального тока

Активная мощность несинусоидального тока может быть найдена как мощность постоянной составляющей $P_0 = U_0 I_0$ плюс сумма мощностей всех гармоник:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_k$$

или

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (6.3)$$

С другой стороны, активная мощность — это мощность, выделяющаяся в активном сопротивлении:

$$P = I_0^2 r + I_1^2 r + I_2^2 r + \dots + I_k^2 r. \quad (6.4)$$

Заменим данный несинусоидальный ток некоторым эквивалентным синусоидальным током, который выделяет такую же мощность, т. е.

$$I^2 r = P, \quad (6.5)$$

Сопоставляя (6.4) и (6.5), находим, что

$$I^2 = I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2$$

или

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}. \quad (6.6)$$

Здесь I — действующее значение несинусоидального тока.

Аналогично может быть найдено и действующее значение несинусоидального напряжения

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2}. \quad (6.7)$$

Для определения степени отклонения кривой напряжения от синусоиды вычисляют коэффициент искажения формы кривой, который представляет собой отношение действующего значения высших гармоник к действующему значению первой гармоники:

$$k_n = \frac{\sqrt{U_0^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}}{U_1}. \quad (6.8)$$

§ 6.3. Влияние электрической цепи на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении

Рассмотрим влияние различных элементов электрической цепи на содержание высших гармоник в кривой тока (рис. 6.10). В простейшем случае, когда схема содержит лишь

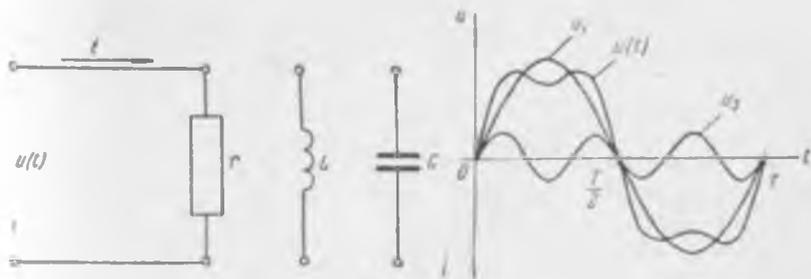


Рис. 6.10

активное сопротивление, для всех гармоник цепь будет обладать одним и тем же сопротивлением. Следовательно, форма

кривой тока будет повторять форму кривой напряжения (рис. 6.11).

Если же схема содержит индуктивную катушку, то для каждой гармоники сопротивление будет различным. Чем выше

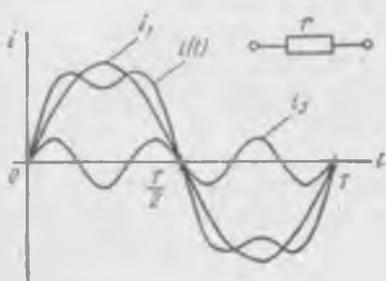


Рис. 6.11

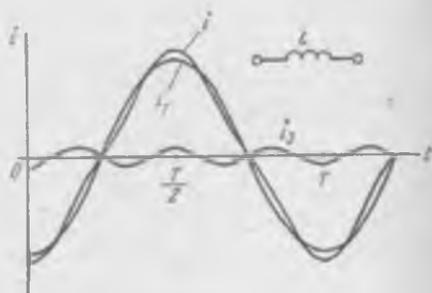


Рис. 6.12

порядок гармоники, тем сопротивление будет больше. Следовательно, в кривой тока высшие гармоники будут выражены слабее, чем в кривой напряжения, и кривая тока приближается к синусоиде (рис. 6.12).

Для цепи, содержащей емкость, картина будет обратная.

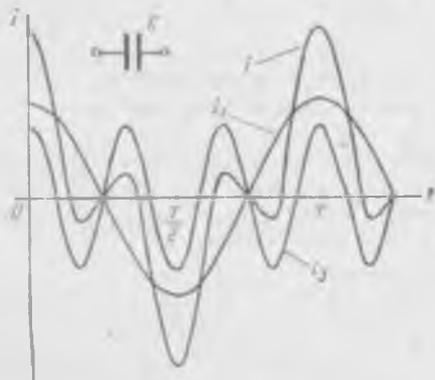


Рис. 6.13

Чем выше порядок гармоники, тем меньше сопротивление схемы. Следовательно, в кривой тока высшие гармоники выражены резче, чем в кривой напряжения, и кривая тока более искажена, чем кривая напряжения (рис. 6.13).

Если соединить последовательно все три элемента r , L , C (рис. 6.14), то, меняя параметры цепи L или C , можно добиться резонанса напряжений для любой гармоники.

Так, условие резонанса для 3-й гармоники запишется в виде

$$3\omega L = \frac{1}{3\omega C} \quad (6.9)$$

Если активное сопротивление мало ($r \ll \omega L$), то сопротивление цепи для третьей гармоники будет незначительным и в кривой тока будет резко выражена третья гармоника.

При параллельном соединении L и C (рис. 6.15) и настройке параллельного контура на резонанс токов для k -ой гармоники (например, третьей) сопротивление контура для этой гармоники будет большим. В кривой тока эта гармоника практически будет отсутствовать.

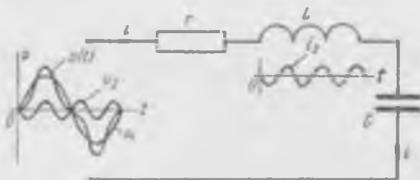


Рис. 6.14

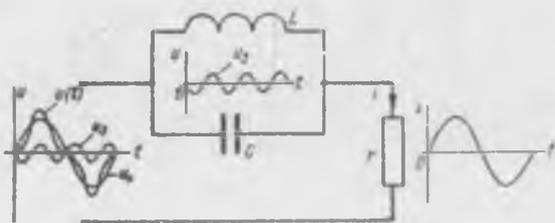


Рис. 6.15

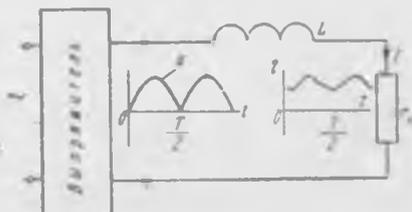


Рис. 6.16

Рассмотренные свойства электрической цепи используются для построения электрических фильтров, которые представляют собой схемы с разными сочетаниями индуктивностей и емкостей. Фильтры имеют самое разнообразное назначение. Так, сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения гармоник в кривой тока нагрузки, подключаемой к выпрямителю. Простейшим сглаживающим фильтром является индуктивная катушка, подключаемая к сопротивлению нагрузки (рис. 6.16). Сглаживающий эффект фильтра усиливается при одновременном использовании индуктивности и емкости, что имеет место в Г-образных, Т-образных и П-образных фильтрах (рис. 6.17).

Фильтр, представляющий большое сопротивление для определенной гармонике, называется **з а г р а ж д а ю щ и м ф и л ь т р о м**. Схема такого фильтра была рассмотрена ранее (см.

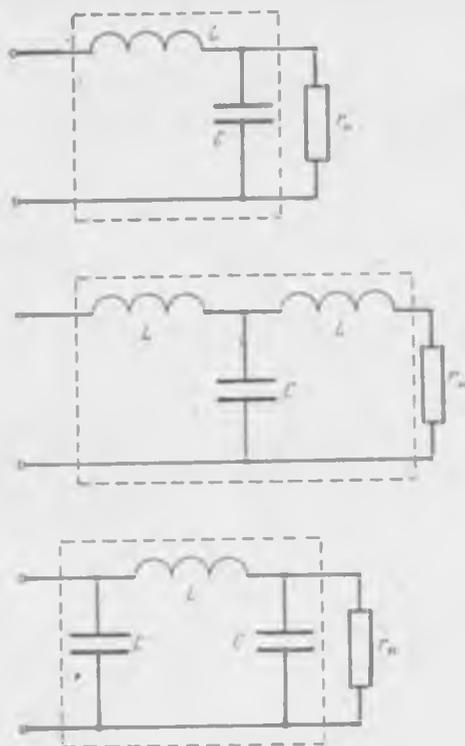


Рис. 6.17

рис. 6.15). Заграждающие фильтры широко используются в технике связи.

Задачи. 6.1. К цепи, содержащей активное сопротивление $r = 10$ ом, приложено несинусоидальное напряжение $u = 100\sqrt{2}\sin\omega t + 30\sqrt{2}\sin 3\omega t$.

Определить действующее значение несинусоидального тока. Найти коэффициент искажения формы кривой тока.

Ответ: $I = 10,5$ а; $k_H = 0,3$.

6.2. К цепи, содержащей индуктивную катушку с индуктивностью $L = 0,01$ гн, приложено несинусоидальное напряжение

$$u = 100\sqrt{2}\sin 1000t + 30\sqrt{2}\sin 3000t \text{ в.}$$

Определить действующее значение несинусоидального тока. Найти коэффициент искажения формы кривой тока.

Решение. Определяем действующее значение первой гармоники напряжения

$$U = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 100 \text{ в.}$$

Действующее значение третьей гармоники напряжения

$$U_3 = \frac{U_{3m}}{\sqrt{2}} = \frac{30\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 30 \text{ в.}$$

Действующее значение первой и третьей гармоники тока:

$$I_1 = \frac{U_1}{\omega L} = \frac{100}{1000 \cdot 0,01} = 10 \text{ а;}$$

$$I_3 = \frac{U_3}{3\omega L} = \frac{30}{3000 \cdot 0,01} = 1 \text{ а}$$

Действующее значение несинусоидальной кривой тока

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{10^2 + 1^2} = 10,05 \text{ а.}$$

Коэффициент искажения формы кривой тока

$$k_n = \frac{\sqrt{I_3^2}}{I_1} = \frac{I_3}{I_1} = \frac{1}{10} = 0,1.$$

6.3. Цепь, содержащая конденсатор емкостью 100 мкф, включается под несинусоидальное напряжение

$$u = 100\sqrt{2} \sin 1000t + 30\sqrt{2} \sin 3000t \text{ в.}$$

Определить действующее значение несинусоидального тока. Найти коэффициент искажения формы кривой тока.

О т в е т: $I = 13,5 \text{ а; } k_n = 0,9.$

6.4. К генератору с напряжением $u = 100\sqrt{2} \sin 1000t + 20\sqrt{2} \sin 5000t$ подключена цепь, изображенная на рис. 6.14. Определить первую и пятую гармоники тока, если $r = 10 \text{ ом, } L = 0,04 \text{ гм, } C = 1 \text{ мкф.}$

О т в е т: $I_1 = 0,1 \text{ а; } I_5 = 2 \text{ а.}$

6.5. Для условия предыдущей задачи найти первую и пятую гармоники напряжения на всех элементах.

О т в е т: $U_{1r} = 1 \text{ в; } U_{5r} = 20 \text{ в;}$
 $U_{1L} = 4 \text{ в; } U_{5L} = 400 \text{ в;}$
 $U_{1C} = 100 \text{ в; } U_{5C} = 400 \text{ в.}$

6.6. К генератору с напряжением

$$u = 100\sqrt{2} \sin 1000t + 20\sqrt{2} \sin 5000t \text{ в}$$

подключена цепь, изображенная на рис. 6.15.

Определить гармоники токов и напряжений на отдельных участках, если $r = 200 \text{ ом, } L = 0,04 \text{ гм, } C = 1 \text{ мкф.}$

Решение. Задачу решаем символическим (комплексным) методом. Определяем сопротивления отдельных участков цепи для первой гармоники

$$x_{1L} = \omega L = 1000 \cdot 0,04 = 40 \text{ ом;}$$

$$x_{1C} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{1000 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 1000 \text{ ом.}$$

Находим сопротивление параллельной цепи в комплексной форме

$$Z_{1LC} = \frac{jx_{1L} \cdot (-jx_{1C})}{jx_{1L} - jx_{1C}} = \frac{j40 \cdot (-j1000)}{j40 - j1000} = j41,7 \text{ ом.}$$

Общее сопротивление цепи

$$Z_1 = r + Z_{1LC} = 200 + j41,7 \text{ ом.}$$

Ток неразветвленной части цепи:

$$\begin{aligned} I_1 = I_{1r} &= \frac{\dot{U}}{Z_1} = \frac{100}{200 + j41,7} = \frac{1}{2 + j0,417} = \\ &= \frac{2 - j0,417}{(2 + j0,417)(2 - j0,417)} = \frac{2 - j0,417}{2^2 + 0,417^2} = 0,48 - j0,1 \text{ а;} \\ I &= \sqrt{0,48^2 + 0,1^2} = 0,49 \text{ а.} \end{aligned}$$

Напряжение на активном сопротивлении:

$$\dot{U}_{1r} = I_r \cdot r = (0,48 - j0,1) 200 = 96 - j20 \text{ в,}$$

$$U_{1r} = \sqrt{96^2 + 20^2} = 98 \text{ в.}$$

Напряжение на параллельном участке цепи:

$$\dot{U}_{1LC} = I \cdot Z_{1LC} = (0,48 - j0,1) j41,7 = 4,17 + j20 \text{ в;}$$

$$U_{1LC} = \sqrt{4,17^2 + 20^2} = 20,4 \text{ в.}$$

Ток в ветви с емкостью:

$$I_{1C} = \frac{\dot{U}_{1LC}}{-jx_{1C}} = \frac{4,17 + j20}{-j1000} = (j4,17 - 20) 10^{-3} \text{ а;}$$

$$I_{1C} = 20,4 \cdot 10^{-3} \text{ а.}$$

Ток в ветви с индуктивностью:

$$I_{1L} = \frac{\dot{U}_{1LC}}{jx_{1L}} = \frac{4,17 + j20}{j40} = 0,5 - j0,104 \text{ а;}$$

$$I_{1L} = \sqrt{0,5^2 + 0,104^2} = 0,51 \text{ а.}$$

Определяем сопротивления отдельных участков цепи для пятой гармоники:

$$x_{5L} = 5\omega L = 5 \cdot 1000 \cdot 0,04 = 200 \text{ ом;}$$

$$x_{5C} = \frac{1}{5\omega C} = \frac{x_{1C}}{5} = \frac{1000}{5} = 200 \text{ ом.}$$

Общее сопротивление цепи

$$Z_5 = r + Z_{5LC} = 200 + \frac{j200(-j200)}{j200 - j200} = \infty.$$

Ток неразветвленной части цепи

$$I_5 = I_{5r} = \frac{\dot{U}_5}{Z_5} = \frac{20}{\infty} = 0.$$

Напряжение на активном сопротивлении

$$\dot{U}_{5r} = I_5 \cdot r = 0 \cdot 200 = 0,$$

Напряжение на параллельном участке

$$\dot{U}_{5LC} = \dot{U}_5 - \dot{U}_{5C} = 20 - 0 = 20 \text{ в}$$

Ток емкости:

$$\dot{I}_{5C} = \frac{\dot{U}_{5LC}}{-jx_{5C}} = \frac{20}{-j200} = j0,1 \text{ а}; I_{5C} = 0,1.$$

Ток индуктивности:

$$\dot{I}_{5L} = \frac{\dot{U}_{5LC}}{jx_{5L}} = \frac{20}{j200} = -j0,1 \text{ а}; I_{5L} = 0,1 \text{ а}.$$

Вопросы для самопроверки

В каких случаях в электрической цепи могут возникнуть несинусоидальные напряжения и токи?

Назовите источники энергии, которые дают несинусоидальное напряжение.

В каких цепях возможно появление несинусоидальных токов даже при синусоидальном напряжении источника?

Какой порядок расчета линейной электрической цепи, находящейся под действием несинусоидального напряжения?

Чему равна активная мощность несинусоидального тока? Как определяется действующее значение несинусоидального тока?

Чем характеризуется степень несинусоидальности кривой тока, напряжения?

Как влияет цепь, содержащая активное сопротивление, на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении?

Как влияет цепь, содержащая индуктивность, на содержание высших гармоник при несинусоидальном напряжении?

Как влияет цепь с емкостью на гармонический состав кривой тока при несинусоидальном напряжении?

Запишите условие резонанса напряжений для k -ой гармоники?

Для чего предназначены сглаживающие фильтры? Нарисуйте несколько схем сглаживающих фильтров.

Что такое заграждающий фильтр?

§ 6.4. Нелинейные цепи переменного тока

Нелинейными электрическими цепями переменного тока называются цепи переменного тока, содержащие нелинейные сопротивления. Нелинейные сопротивления в отличие от линейных обладают нелинейными вольт-амперными характеристиками.

Различают три типа нелинейных сопротивлений — активные, емкостные и индуктивные. К активным нелинейным сопротивлениям можно отнести электрическую лампочку накаливания, электронные лампы, полупроводниковые диоды и триоды. На рис. 6.18 показана вольт-амперная характеристика электрической лампы с угольной нитью накаливания, а на рис. 6.19 — вольт-амперная характеристика диода.

Емкостное нелинейное сопротивление представляет собой конденсатор, между обкладками которого находится сегнето-

(рис. 6.22). Ток, протекающий по катушке, создает магнитное поле, которое при своем изменении наводит в катушке э. д. с. самоиндукции e . В соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать, что

$$u + e = ir, \quad (6.10)$$

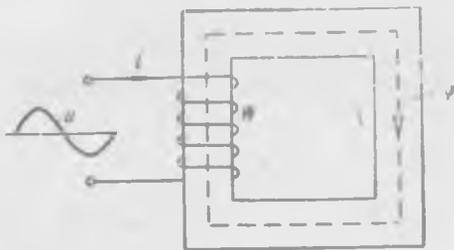


Рис. 6.22

Так как активное сопротивление катушки невелико, величиной r можно пренебречь, тогда

$$u = -e = \frac{d\Psi}{dt}. \quad (6.11)$$

Покажем, что при синусоидальном напряжении сети потокосцепление Ψ будет изменяться также по синусоидальному закону. В самом деле,

предположим, что $\Psi = \Psi_m \sin \omega t$, тогда

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \omega \Psi_m \cos \omega t = \omega \Psi_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (6.12)$$

Из формулы 6.12 видно, что напряжение опережает потокосцепление по фазе на четверть периода, или на 90° . Макси-



Рис. 6.23

мальное же значение напряжения связано с максимальным значением потокосцепления следующей простой зависимостью:

$$U_m = \omega \Psi_m. \quad (6.13)$$

Найдем закон изменения тока катушки при синусоидальном изменении потокосцепления. Для этого по кривой намагничивания $B=f(H)$ строим вебер-амперную характеристику $\Psi=f(i)$, умножая каждое значение B на ωS и каждое значение H на $\frac{l}{\omega}$. Затем для каждого значения потокосцепления находим соответствующее значение тока (рис. 6.23).

Кривую $i=f(t)$ можно представить в виде суммы нечетных гармоник тока. На рис. 6.23 показана несинусоидальная кривая тока и ее первая и третья гармоники.

Таким образом, катушка со стальным сердечником при синусоидальном напряжении (потокосцеплении) является генератором гармоник тока.

§ 6.6. Катушка со стальным сердечником при синусоидальном токе

Найдем закон изменения напряжения на катушке при синусоидальном токе. Для этого по кривой намагничивания для каждого значения тока находим соответствующее значение

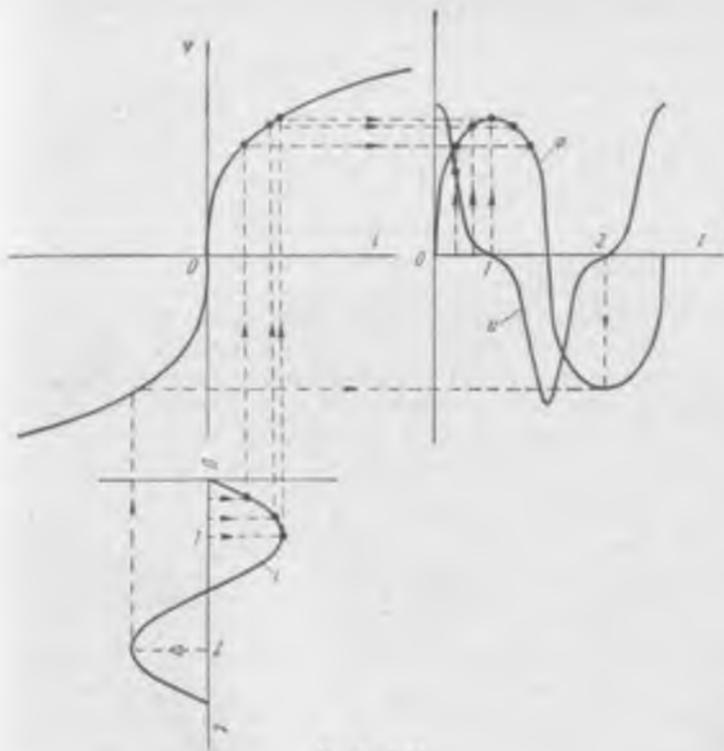


Рис. 6.21

потокосцепления (рис. 6.24). Напряжение на катушке найдем, вычислив производную от потокосцепления по времени:

$$u = \frac{d\psi}{dt}.$$

Производная в любой точке численно равна тангенсу угла наклона касательной к кривой. В точке, где потокосцепление постоянно, напряжение равно нулю. Напряжение имеет максимальное значение в момент времени, где скорость изменения потокосцепления наибольшая.

Несинусоидальную кривую напряжения можно представить в виде суммы нечетных гармоник напряжения. Таким образом, катушка со стальным сердечником при синусоидальном токе является генератором нечетных гармоник напряжения.

§ 6.7. Магнитные усилители

В настоящее время широкое распространение получили электромагнитные аппараты, содержащие катушки со стальными сердечниками при наличии дополнительной обмотки, пи-

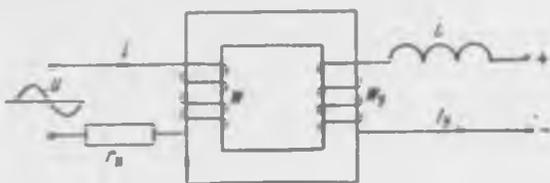


Рис. 6.25

таемой постоянным током. Такого рода электромагнитные аппараты получили название магнитных усилителей.

Магнитные усилители применяются в электрических схемах контроля, измерения и автоматического регулирования (например, для автоматического управления двигателями, плавного регулирования освещения, измерения постоянных токов и т. д.).

Схема простейшего магнитного усилителя изображена на рис. 6.25. Она содержит стальной сердечник, на котором расположены две обмотки: обмотка переменного тока w , называемая рабочей обмоткой, и обмотка постоянного тока w_y , называемая управляющей обмоткой.

Для ограничения величины переменного тока, наводимого в управляющей обмотке, в цепь включена индуктивность L .

Принцип действия магнитного усилителя можно пояснить с помощью графических построений, приведенных на рис. 6.26. В первом приближении пренебрегаем величиной активного со-

противления нагрузки r_n в рабочей цепи. Тогда напряжение, приложенное к рабочей обмотке w , и потокосцепление Ψ будет изменяться по синусоидальному закону (кривая 1).

При отсутствии управляющего тока ток в рабочей обмотке будет невелик (кривая 2). Постоянный ток, подаваемый в управляющую цепь, создает постоянное магнитное поле с потокосцеплением Ψ_0 , которое накладывается на переменное магнитное поле. В результате суммарное магнитное поле увеличивается (кривая 3), что приводит к увеличению тока в рабочей цепи (кривая 4). Оказывается, что изменением относительно небольшого постоянного тока можно регулировать значительную мощность нагрузки.

Магнитный усилитель, изображенный на рис. 6.25, не нашел практического применения в виду того, что в управляющей цепи наводится переменный ток, который снижает коэффициент усиления усилителя. Для устранения этого недостатка применяется схема магнитного усилителя, содержащая два сердечника (рис. 6.27). Первичные обмотки такого усилителя соединяются согласно, а вторичные — встречно. При отсутствии управляющего тока э. д. с., наводимые в управляющей цепи, будут одинаковы: $e_1 = e_2$. Так как обмотки управляющей цепи соединены встречно, то результирующая э. д. с. равна

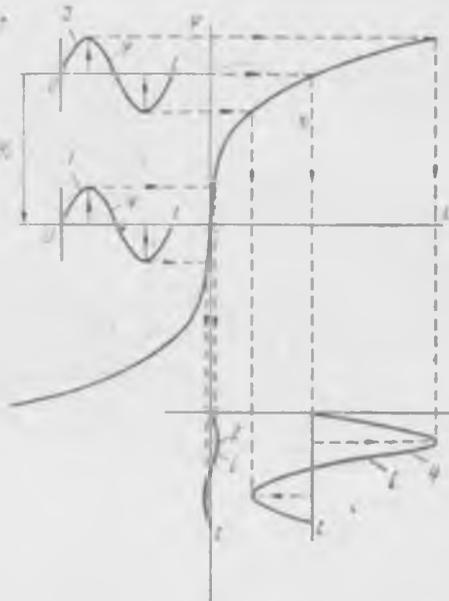


Рис. 6.26

$$e = e_1 - e_2 = 0$$

и переменный ток в управляющей цепи отсутствует.

При подмагничивании постоянным током в управляющей цепи протекают токи четных гармоник, которые оказывают добавочное подмагничивающее действие.

Основной характеристикой магнитного усилителя является нагрузочная характеристика, т. е. зависимость тока нагрузки I от величины управляющего тока I_y (см. рис. 6.27). При изменении полярности управляющего тока величина тока нагрузки

не изменяется. Следовательно, такой усилитель не реагирует на полярность управляющего сигнала.

Для того чтобы усилитель реагировал на полярность управляющего тока, в схему магнитного усилителя вводят обмотку смещения $w_{см}$ (см. рис. 6.28). Эта обмотка, так же как и

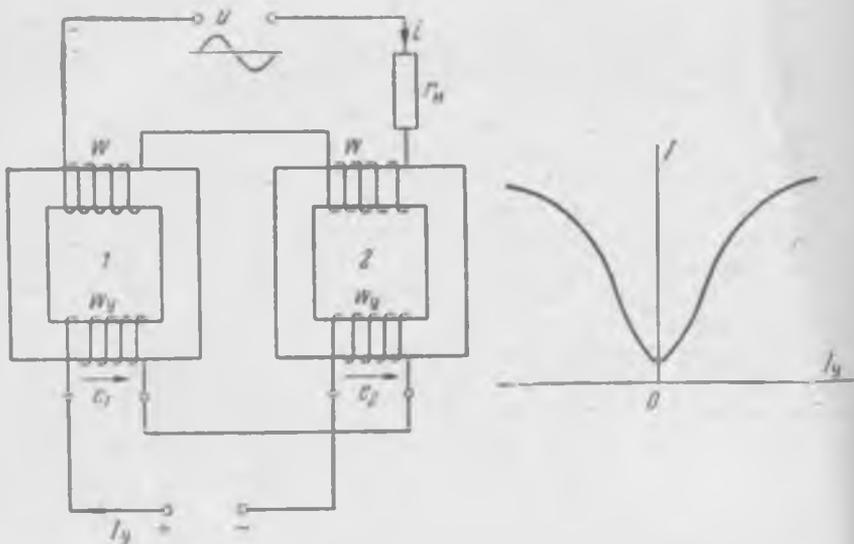


Рис. 6.27

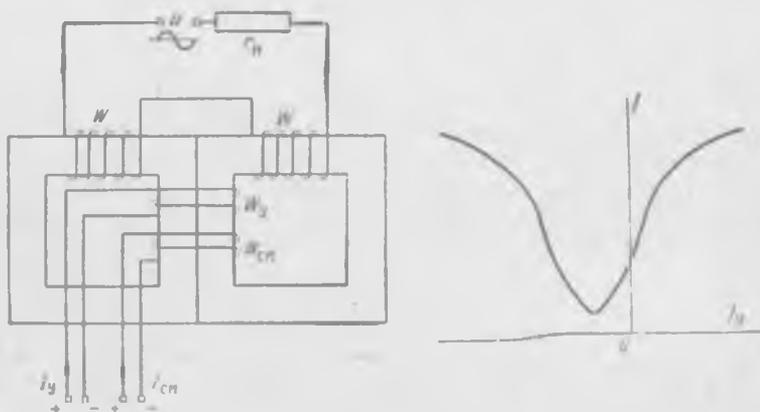


Рис. 6.28

управляющая, обычно наматывается на оба сердечника. По обмотке смещения пропускается неизменный ток. Нагрузочная характеристика усилителя с постоянным смещением показана на рис. 6.28. При увеличении тока управления ток на-

грузки увеличивается, а при изменении полярности — уменьшается.

С помощью нагрузочной характеристики можно подсчитать для магнитного усилителя коэффициент усиления по току k_I и коэффициент усиления по мощности k_P .

Коэффициент усиления по току равен отношению приращения тока нагрузки к приращению тока управления

$$k_I = \frac{\Delta I}{\Delta I_y} \quad (6.14)$$

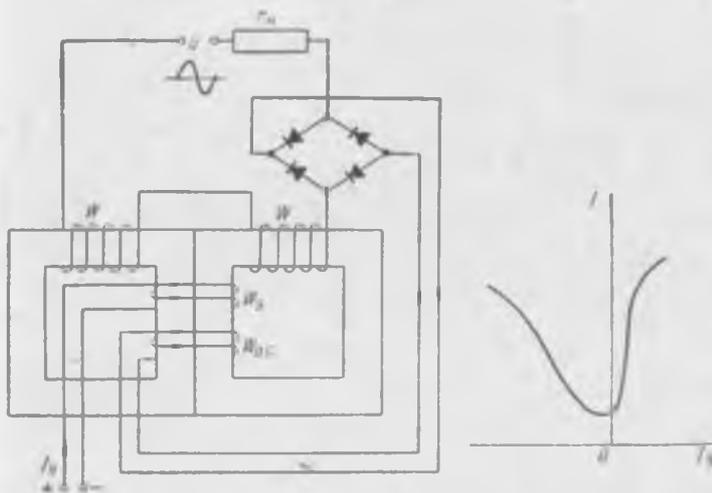


Рис. 6.29

Коэффициент усиления по мощности определяется как отношение приращения мощности на выходе магнитного усилителя к приращению мощности на его входе

$$k_P = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_y} = \frac{\Delta I^2 r_n}{\Delta I_y^2 r_y} = k_I^2 \cdot \frac{r_n}{r_y} \quad (6.15)$$

Коэффициент усиления по мощности для различных усилителей лежит в пределах от десяти до десятков тысяч.

Большие значения коэффициента усиления соответствуют магнитным усилителям с положительной обратной связью. Схема одного из таких усилителей показана на рис. 6.29. Ток нагрузки выпрямляется с помощью мостовой схемы и подается в обмотку обратной связи, которая включена согласно с обмоткой управления и таким образом оказывает дополнительное подмагничивающее действие.

На рис. 6.30 показана схема магнитного усилителя с внутренней обратной связью. Добавочное подмагничивание дости-

гается за счет постоянной составляющей выпрямленного тока нагрузки. Для этой цели в каждую из обмоток переменного тока включают полупроводниковые выпрямители. Усилители с внутренней обратной связью обладают большим коэффициентом усиления.

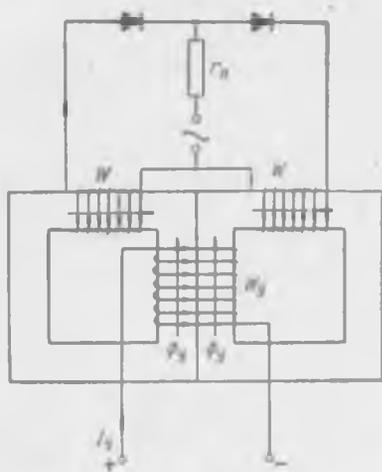


Рис. 6.30



Рис. 6.31

Вопросы для самопроверки

Какова связь между амплитудой синусоидального напряжения катушки и амплитудой потокоцепления?

Какую форму будет иметь кривая тока катушки со стальным сердечником при синусоидальном напряжении?

Какую форму будет иметь кривая напряжения катушки со стальным сердечником при синусоидальном токе? Как по кривой изменения потокоцепления найти закон изменения напряжения?

Где применяются магнитные усилители?

Какова схема простейшего магнитного усилителя?

Каков принцип действия магнитного усилителя?

Какой вид имеет нагрузочная характеристика усилителя?

Для чего в магнитном усилителе устраивается обмотка смещения?

Как определяется коэффициент усиления по току и коэффициент усиления по мощности?

Для чего в магнитном усилителе вводится обратная связь?

§ 6.8. Последовательное соединение катушки со стальным сердечником и конденсатора

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую активное сопротивление r , емкость C и катушку со стальным сердечником L (рис. 6.31), включенную на синусоидальное напряжение. Для удобства расчета данной цепи заменим несинусоидальный ток и несинусоидальные напряжения на отдель-

ных элементах эквивалентными синусоидами, так чтобы действующее значение несинусоидальной величины было равно действующему значению эквивалентной синусоиды. Такая замена дает возможность строить векторные диаграммы для нелинейных цепей и позволяет использовать расчетные формулы, полученные для линейных цепей.

Опытным путем снимаем вольт-амперные характеристики с отдельных элементов цепи и наносим их на чертеж (рис. 6.32). Строим вольт-амперную характеристику всей цепи

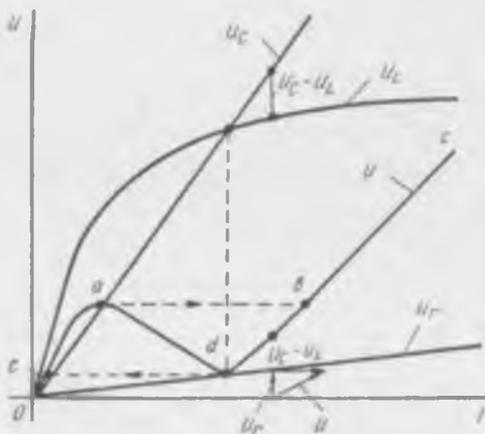


Рис. 6.32

(кривая U), находя для каждого значения тока соответствующее ему напряжение

$$U = \sqrt{U_r^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (6.16)$$

Как видно из рисунка, при плавном увеличении напряжения источника ток сначала плавно увеличивается (участок oa), в точке a происходит скачок тока (участок ab), затем ток снова увеличивается (участок bc). При плавном снижении напряжения ток сначала плавно уменьшается, в точке d происходит скачкообразное уменьшение тока (участок de), затем ток постепенно уменьшается (участок eo).

В отличие от резонанса напряжений в линейных цепях, где явление резонанса возникает при изменении параметров цепи или частоты источника питания, явление феррорезонанса возникает и при изменении величины напряжения сети.

За точкой резонанса (участок bc) значительному изменению приложенного напряжения U соответствует сравнительно малое изменение напряжения на катушке U_L .

Это обстоятельство позволяет использовать феррорезонансную схему рис. 6.31 (особенно при малых r) для стабилизации напряжения, т. е. для получения практически постоянного напряжения на зажимах катушки при значительных изменениях напряжения сети.

Вопросы для самопроверки

Что дает замена реальных несинусоидальных кривых напряжения и тока эквивалентными синусоидами?

Как определяется вольт-амперная характеристика всей феррорезонансной цепи?

Как изменяется ток в феррорезонансной цепи при плавном увеличении (снижении) напряжения сети?

Чем отличается явление феррорезонанса от явления резонанса в линейных цепях?

Почему схему рис. 6.31 можно использовать для стабилизации напряжения?

ГЛАВА 7

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

§ 7.1. Возникновение переходных процессов и законы коммутации

Коммутацией электрической цепи называют включение или отключение ветвей, короткие замыкания отдельных участков, различного рода переключения, внезапное изменение параметров цепи и т. д.

В результате коммутации в электрической цепи возникает переходный процесс, т. е. процесс перехода из одного состояния в другое, который сопровождается неперiodическим изменением напряжений и токов. Может оказаться, что напряжение

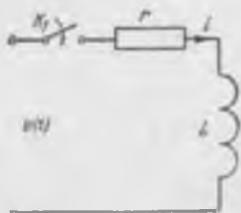


Рис. 7.1

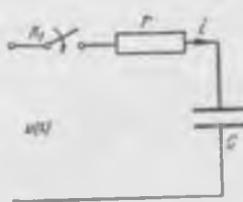


Рис. 7.2

на отдельных участках цепи в переходном режиме превышает значение напряжения в установившемся режиме, создавая опасность пробоя изоляции соответствующего оборудования. Изучение переходных процессов в такой цепи позволяет выбрать электротехническое оборудование с учетом возможных перенапряжений.

Сформулируем два закона коммутации:

А. Ток, протекающий через индуктивную катушку, не может измениться скачком. Так, в цепи с индуктивной катушкой (рис. 7.1) ток до включения ключа K_1 был равен нулю. В момент включения ключа, т. е. в момент коммутации, ток будет также равен нулю. Если предположить наличие скачка тока в момент

коммутации, тогда э. д. с. самоиндукции катушки $e = -L \frac{di}{dt}$ будет равна бесконечности, что лишено физического смысла.

Б. Напряжение на емкости не может изменяться скачком. Так, если в цепи с емкостью (рис. 7.2) напряжение на конденсаторе до коммутации было равно нулю (конденсатор не заряжен), то в момент коммутации это напряжение также будет равно нулю.

Если предположить наличие скачка напряжения на конденсаторе в момент коммутации, то ток конденсатора $i = C \frac{du_C}{dt}$ будет равен бесконечности, что противоречит физическому смыслу.

§ 7.2. Общие принципы расчета переходных процессов

Рассмотрим электрическую цепь (рис. 7.3), подключенную к источнику с напряжением $u(t)$. На основании второго закона Кирхгофа в любой момент времени имеем

$$u_r + u_L + u_C = u(t)$$

или

$$ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = u(t). \quad (7.1)$$

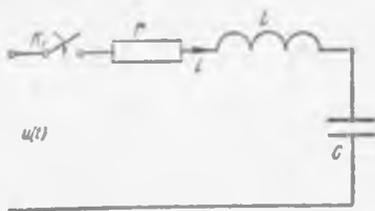


Рис. 7.3

Это уравнение описывает закон изменения тока в любой момент времени, начиная от переходного режима и кончая установившимся, принужденным режимом. Для последнего уравнение (7.1) примет следующий вид:

$$i_{np}r + L \frac{di_{np}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_{np} dt = u(t), \quad (7.2)$$

где i_{np} — принужденный, установившийся ток.

Вычтем из уравнения (7.1) уравнение (7.2)

$$(i - i_{np})r + L \frac{d(i - i_{np})}{dt} + \frac{1}{C} \int (i - i_{np}) dt = 0. \quad (7.3)$$

Обозначим разность $i - i_{\text{пр}}$ через $i_{\text{св}}$, тогда

$$i - i_{\text{пр}} = i_{\text{св}}; \quad (7.4)$$

$$i_{\text{св}} \cdot r + L \frac{di_{\text{св}}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_{\text{св}} dt = 0, \quad (7.5)$$

где $i_{\text{св}}$ — свободная составляющая тока.

Отсюда вытекает общий порядок расчета переходных процессов:

А. Составляем дифференциальное уравнение без правой части для свободных составляющих тока или напряжения, аналогичное уравнению (7.5). Решая это уравнение, находим $i_{\text{св}}$ или $u_{\text{св}}$.

Б. Находим принужденные составляющие токов или напряжений, пользуясь обычными методами расчета электрических цепей постоянного или переменного тока.

В. Находим переходный ток из равенства (7.4) как сумму принужденной и свободной составляющей тока

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}. \quad (7.6)$$

§ 7.3. Короткое замыкание цепи r, L

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при коротком замыкании цепи r, L (рис. 7.4). До замыкания ключа K ток в цепи r, L был равен

$$I = \frac{U}{r}.$$

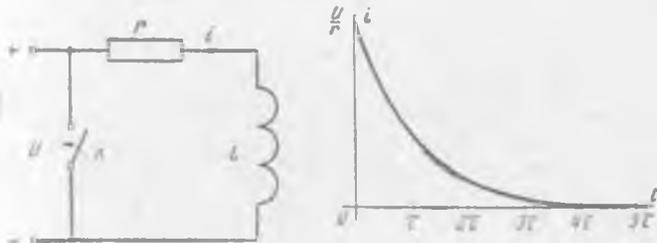


Рис. 7.4

В момент коммутации значение тока остается тем же, что и в момент, предшествующий коммутации:

$$i(0) = \frac{U}{r}.$$

В общем случае переходный ток будет состоять из принужденной и свободной составляющей

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}.$$

Принужденный ток при коротком замыкании цепи r, L равен нулю

$$i_{\text{пр}} = 0.$$

Для определения свободной составляющей тока записываем дифференциальное уравнение

$$L \frac{di_{\text{св}}}{dt} + i_{\text{св}} \cdot r = 0$$

или

$$\frac{di_{\text{св}}}{dt} + \frac{r}{L} i_{\text{св}} = 0. \quad (7.7)$$

Общее решение такого уравнения записывается в виде

$$i_{\text{св}} = Ae^{pt}, \quad (7.8)$$

где A — постоянная интегрирования;

p — корень характеристического уравнения.

Для дифференциального уравнения (7.7) характеристическое уравнение будет иметь следующий вид:

$$p + \frac{r}{L} = 0, \quad (7.9)$$

откуда

$$p = -\frac{r}{L} = -\frac{1}{\tau}, \quad (7.10)$$

где $\tau = \frac{L}{r}$ имеет размерность времени и называется поэтому постоянной времени.

Переходный ток будет равен

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.11)$$

Постоянную A определяем из начальных условий. Для этого выражение (7.11) записываем для момента времени $t=0$:

$$i(0) = A.$$

Но $i(0) = \frac{U}{r}$, следовательно, $A = \frac{U}{r}$.

Окончательно получим выражение для тока

$$i = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.12)$$

Для построения кривой переходного тока удобно задаваться следующими моментами времени: $t = \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$.

На рис. 7.4 изображена кривая тока переходного процесса.

Как видно из рисунка, переходный процесс практически заканчивается при $t = 4\tau$.

§ 7.4. Включение цепи r, L на постоянное напряжение

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при включении цепи (см. рис. 7.1) на постоянное напряжение. В момент коммутации значение тока будет тем же, что и в момент, предшествующий коммутации, т. е. $i(0) = 0$.

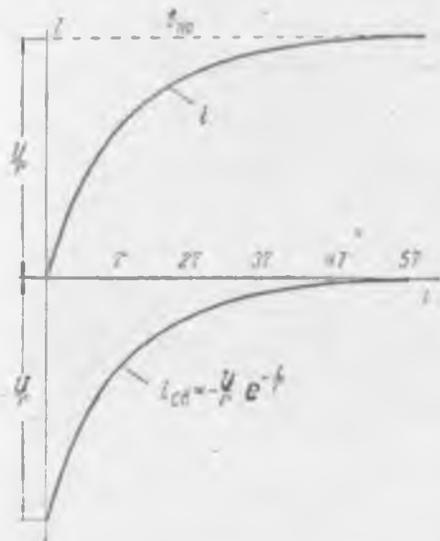


Рис. 7.5

Ток переходного процесса будет равен

$$i = i_{пр} + i_{св} = \frac{U}{r} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.13)$$

Для определения постоянной A записываем выражение (7.13) для момента времени $t=0$:

$$i(0) = \frac{U}{r} + A,$$

Откуда

$$A = -\frac{U}{r} + i(0) = -\frac{U}{r}.$$

Окончательно получим выражение для тока

$$i = \frac{U}{r} - \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (7.14)$$

На рис. 7.5 изображена кривая переходного тока и ее составляющие.

§ 7.5. Включение цепи r, L на синусоидальное напряжение

Пусть цепь r, L (см. рис. 7.1) подключается к источнику синусоидального напряжения

$$u(t) = u = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

В момент коммутации ток в такой цепи равен нулю

$$i(0) = 0.$$

Ток переходного процесса запишется

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = i_{\text{пр}} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.15)$$

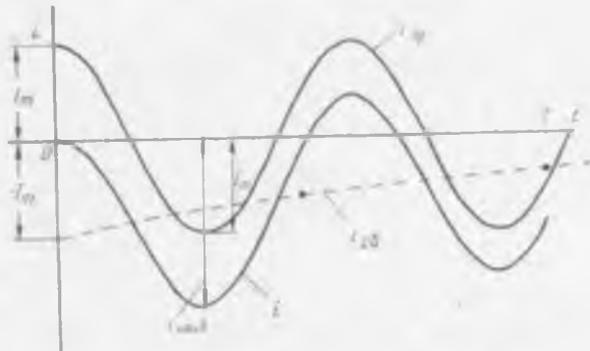


Рис. 7.6

Принужденная составляющая тока будет изменяться по синусоидальному закону

$$i_{\text{пр}} = \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \psi - \varphi) = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (7.16)$$

где $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{r}$.

Для определения постоянной A записываем выражение (7.15) для момента времени $t=0$:

$$i(0) = i_{\text{пр}}(0) + A,$$

откуда

$$A = i(0) - i_{\text{пр}}(0) = -i_{\text{пр}}(0).$$

Окончательно получим выражение для тока переходного режима

$$i = i_{\text{пр}} - i_{\text{пр}}(0) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.17)$$

где

$$i_{i.p}(0) = I_m \sin(\psi - \varphi).$$

Анализ выражения (7.17) показывает, что свободная составляющая тока отсутствует в случае, когда $\psi - \varphi = 0$ и свободный ток имеет наибольшее значение, когда

$$\psi - \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

В последнем случае переходный ток будет равен

$$i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - I_m e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.18)$$

На рис. 7.6 показан ток переходного процесса и его составляющие. Как видно из рисунка, наибольшее значение переходного тока почти вдвое больше амплитуды принужденного тока.

Вопросы для самопроверки

- Что мы подразумеваем под коммутацией электрической цепи?
- Какой процесс возникает в результате коммутации и чем он характерен?
- Назовите законы коммутации?
- Как находится свободная составляющая тока?
- Как находится принужденная составляющая тока?
- Как находится переходный ток?
- Как записывается дифференциальное уравнение для свободной составляющей тока при коротком замыкании цепи r, L ?
- Как определяется постоянная времени цепи r, L ?
- Как определяется постоянная интегрирования A ?
- Запишите выражение для тока переходного процесса при включении цепи r, L на постоянное напряжение?
- Запишите выражение для переходного тока при включении цепи r, L на переменное напряжение?
- При каком условии в такой цепи переходный процесс отсутствует?

§ 7.6. Короткое замыкание цепи r, C

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при коротком замыкании цепи r, C (рис. 7.7). Пусть до замыкания ключа напряжение на конденсаторе было равно U . Тогда в момент коммутации напряжение на конденсаторе останется тем же, что и в момент, предшествующий коммутации, т. е.

$$u_C(0) = U.$$

В общем случае напряжение конденсатора будет равно сумме принужденной и свободной составляющей

$$u_C = u_{Cпр} + u_{Cсв}.$$

При коротком замыкании цепи r, C принужденное, установившееся напряжение на конденсаторе будет равно нулю

$$u_{Cпр} = 0.$$

Для определения свободной составляющей напряжения записываем дифференциальное уравнение

$$i_{CВ}r + u_{CВ} = 0$$

или

$$rC \frac{du_{CВ}}{dt} + u_{CВ} = 0. \quad (7.19)$$

Общее решение такого уравнения будет

$$u_{CВ} = Ae^{pt}, \quad (7.20)$$

где A — постоянная интегрирования;

p — корень характеристического уравнения.

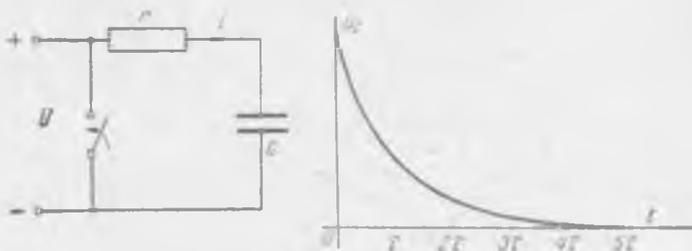


Рис. 7.7

Для дифференциального уравнения (7.19) характеристическое уравнение будет иметь вид

$$rCp + 1 = 0, \quad (7.21)$$

откуда

$$p = -\frac{1}{rC} = -\frac{1}{\tau}, \quad (7.22)$$

где $\tau = rC$ — постоянная времени.

Напряжение на конденсаторе в переходном режиме будет равно

$$u_C = u_{Cпр} + u_{Cсв} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.23)$$

Постоянную A определяем из начальных условий. Для этого рассматриваем начальный момент времени, тогда

$$u_C(0) = A,$$

но $u_C(0) = U$, следовательно, $A = U$.

Окончательно получим выражение для напряжения конденсатора

$$u_C = Ue^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.24)$$

На рис. 7.7 показан закон изменения напряжения на конденсаторе при коротком замыкании цепи r, C .

§ 7.7. Включение цепи r, C на постоянное напряжение

При включении цепи r, C (см. рис. 7.2) на постоянное напряжение значение напряжения u_C в момент коммутации будет тем же, что и в момент, предшествующий коммутации. Если до включения ключа конденсатор был не заряжен, то в момент коммутации $u_C(0) = 0$.

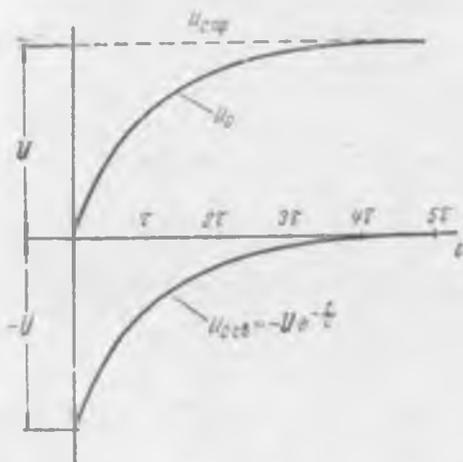


Рис. 7.8

Процесс изменения свободной составляющей напряжения описывается уравнением (7.19). Поэтому напряжение на конденсаторе в переходном режиме будет равно

$$u_C = u_{Cпр} + u_{Cсв} = U + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.25)$$

Для определения A рассмотрим выражение (7.25) для момента времени $t=0$:

$$u_C(0) = U + A,$$

откуда

$$A = u_C(0) - U = -U.$$

Окончательно получим выражение для напряжения конденсатора в виде

$$u_C = U - Ue^{-\frac{t}{\tau}} = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (7.26)$$

На рис. 7.8 изображена кривая напряжения u_C и ее составляющие.

§ 7.8. Короткое замыкание цепи r, L, C .

При коротком замыкании цепи r, L, C (рис. 7.9) происходит разряд конденсатора на сопротивление r и индуктивность L .

В общем случае напряжение на конденсаторе состоит из принужденной и свободной составляющих

$$u_C = u_{Cпр} + u_{Cсв}.$$

Принужденная составляющая напряжения равна нулю

$$u_{Cпр} = 0.$$

Для определения свободной составляющей напряжения составляем дифференциальное уравнение

$$L \frac{di_{Cсв}}{dt} + ri_{Cсв} + u_{Cсв} = 0. \quad (7.27)$$

Подставляем значение свободной составляющей тока

$$i_{Cсв} = C \frac{du_{Cсв}}{dt};$$

$$LC \frac{d^2 u_{Cсв}}{dt^2} + rC \frac{du_{Cсв}}{dt} + u_{Cсв} = 0$$

или

$$\frac{d^2 u_{Cсв}}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{du_{Cсв}}{dt} + \frac{1}{LC} u_{Cсв} = 0. \quad (7.28)$$

Закон изменения свободной составляющей напряжения будет зависеть от вида корней характеристического уравнения

$$p^2 + \frac{r}{L} p + \frac{1}{LC} = 0, \quad (7.29)$$

откуда

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (7.30)$$

или

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \quad (7.31)$$

если ввести обозначения

$$\delta = \frac{r}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (7.32)$$

Случай $\delta \geq \omega_0$ соответствует аперiodическому характеру процесса, а случай $\delta < \omega_0$ — колебательному.

§ 7.9. Колебательный разряд конденсатора

Рассмотрим колебательный разряд конденсатора, с которым чаще приходится встречаться на практике.

При $\delta < \omega_0$ корни характеристического уравнения получаются комплексными

$$\rho_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm j\omega, \quad (7.33)$$

где

$$j = +\sqrt{-1}, \text{ а } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}. \quad (7.34)$$

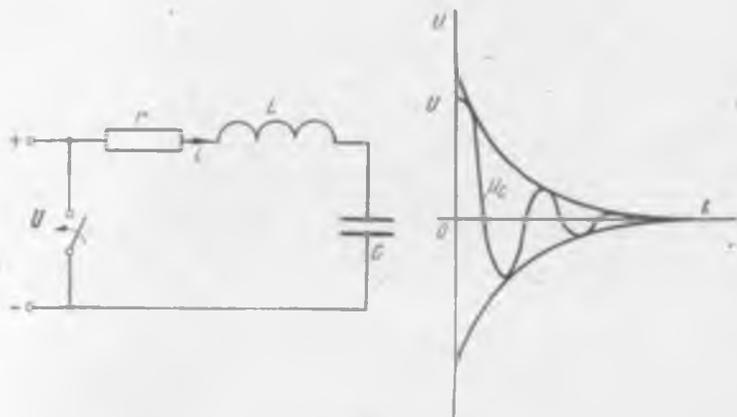


Рис. 7.9

Решение дифференциального уравнения (7.28) отыскивается в виде

$$u_{\text{св}} = A_1 e^{-\delta t} \cos \omega t + A_2 e^{-\delta t} \sin \omega t. \quad (7.35)$$

Так как принужденная составляющая напряжения равна нулю, то

$$u_C = u_{\text{св}} = A_1 e^{-\delta t} \cos \omega t + A_2 e^{-\delta t} \sin \omega t. \quad (7.36)$$

Постоянные интегрирования найдем из начальных условий при $t=0$:

$$u_C(0) = A_1,$$

но $u_C(0) = U$, следовательно, $A_1 = U$.

Для определения постоянной A_2 запишем выражение для переходного тока

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C (-A_1 \delta e^{-\delta t} \cos \omega t - A_1 \omega e^{-\delta t} \sin \omega t - \\ - A_2 \delta e^{-\delta t} \sin \omega t + A_2 \omega e^{-\delta t} \cos \omega t).$$

В начальный момент времени, когда $t=0$:

$$i(0) = -A_1\delta + A_2\omega.$$

Так как $i(0)=0$, то

$$A_2 = A_1 \cdot \frac{\delta}{\omega} = U \cdot \frac{\delta}{\omega}.$$

Окончательно напряжение на конденсаторе будет изменяться по следующему закону:

$$u_c = Ue^{-\delta t} \cos \omega t + U \frac{\delta}{\omega} e^{-\delta t} \sin \omega t. \quad (7.37)$$

По выражению (7.37) построена кривая изменения напряжения на конденсаторе (рис. 7.9). Как видно из рисунка, процесс разряда конденсатора представляет собой затухающие колебания с угловой частотой

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}.$$

В случае, когда $\delta=0$,

$$u_c = U \cos \omega t, \quad (7.38)$$

т. е. напряжение конденсатора изменяется по гармоническому закону с угловой частотой $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и при этом не затухает.

Мы рассмотрели классический метод расчета переходных процессов. На практике весьма часто пользуются операторным методом расчета, сведения о котором можно найти в любом учебнике по курсу «Теоретические основы электротехники».

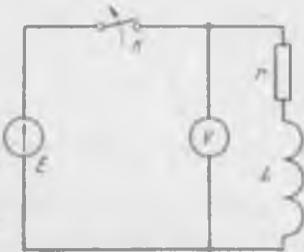


Рис. 7.10

Задачи. 7.1. К зажимам индуктивной катушки $r=100$ ом, $L=10$ мГн подключен вольтметр (рис. 7.10). Сопротивление вольтметра $r_v=3000$ ом, $E=100$ в. Найти, чему будет равно напряжение на зажимах вольтметра в момент размыкания рубильника, если допустить, что размыкание произойдет мгновенно и электрическая дуга не возникнет.

Решение. До размыкания рубильника через катушку протекал ток

$$i = \frac{E}{r} = \frac{100}{100} = 1 \text{ а.}$$

В момент коммутации ток катушки будет иметь то же значение, что и до коммутации, т. е. $i(0)=1$ а. Этот ток протекает через вольтметр и создает на нем напряжение

$$u(0) = i(0) \cdot r_v = 1 \cdot 3000 = 3000 \text{ в.}$$

Протекание большого тока через катушку вольтметра может привести к выходу прибора из строя. Поэтому, прежде чем разомкнуть рубильник в цепи рис. 7.10, сначала отключают вольтметр.

7.2. Цепь, состоящая из последовательного соединения r , L , включается на постоянное напряжение $U=100$ в. Определить ток цепи в момент времени $t=\tau$, где τ — постоянная времени цепи; $r=100$ ом, $L=1$ гн.

Ответ: $i=0,632$ а.

7.3. Для условия предыдущей задачи построить кривую тока в функции времени $i=f(t)$, задаваясь $t=\tau$, 2τ , 3τ , 4τ .

7.4. Цепь, содержащая последовательное соединение r и C ($r=2000$ ом, $C=0,5$ мкф), включается на постоянное напряжение $U=120$ в. Определить время, в течение которого напряжение на конденсаторе достигнет 80 в.

Решение. Определяем постоянную времени для данной цепи

$$\tau = rC = 2000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 10^{-3} \text{ сек.}$$

Напряжение конденсатора будет изменяться по закону

$$u_C = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Подставляем данные из условия задачи и решаем полученное уравнение относительно t :

$$80 = 120 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

откуда

$$1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{2}{3} \text{ и } e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{1}{3}$$

или

$$e^{+\frac{t}{\tau}} = 3.$$

Логарифмируем правую и левую часть $\frac{t}{\tau} \lg e = \lg 3$, откуда

$$t = \tau \frac{\lg 3}{\lg e} = 10^{-3} \cdot \frac{0,477}{0,434} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

7.5. Определить время, в течение которого напряжение на заряженном конденсаторе емкостью $C=2$ мкф упадет от начального напряжения 400 в до напряжения 200 в, если конденсатор разряжается через сопротивление $r=1000$ ом.

Ответ: $t=1,39 \cdot 10^{-3}$ сек.

7.6. Цепь, содержащая последовательное соединение r , L , C , включается на постоянное напряжение $U=220$ в. Определить характер переходного процесса в такой цепи, если $r=100$ ом, $L=1$ гн, $C=1$ мкф.

Ответ: переходный процесс носит колебательный характер.

Вопросы для самопроверки

Запишите дифференциальное уравнение для свободной составляющей напряжения конденсатора при коротком замыкании цепи r , C .

Чему равна постоянная времени для цепи r , C ?

Запишите выражение для напряжения конденсатора при коротком замыкании цепи r , C .

По какому закону будет изменяться напряжение конденсатора при включении цепи r, C на постоянное напряжение?

Составьте дифференциальное уравнение для случая короткого замыкания цепи r, L, C .

Для данного дифференциального уравнения запишите характеристическое уравнение.

В каком виде отыскивается решение дифференциального уравнения в случае колебательного процесса?

Как определяются постоянные интегрирования?

В каком случае колебательный процесс будет незатухающим?

ГЛАВА 8

ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 8.1. Общие сведения

Трансформаторы состоят из стального сердечника и двух (или больше) обмоток, охватывающих этот сердечник. Они служат для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.

Надобность в таком преобразовании электрической энергии возникает очень часто и поэтому трансформатор — это один из наиболее употребительных аппаратов. Передача энергии на расстояние сверх нескольких километров может осуществляться только при высоком напряжении. Повышение напряжения на электростанции и понижение его до практически удобных величин у потребителя достигается с помощью трансформаторов. Таким образом, все потребители электроэнергии питаются через трансформаторы. Большинство электрических установок и приборов содержат трансформаторы. Так, например, в радиоприемнике аноды ламп иногда требуют напряжения 250 в, а их нити накала — 6 в. Эти напряжения создаются трансформатором, установленным в радиоприемнике, который обычно потребляет из сети энергию при напряжении 220 в, а выдает ее при указанных напряжениях.

Трансформаторы позволяют выполнять требования техники безопасности: для работы в сырых местах, например внутри котла, пользуются лампочками и электроинструментом на $36 \div 12$ в; это напряжение получают от так называемого котельного трансформатора. Кроме того, трансформаторы позволяют, когда это является необходимым, изолировать одну электрическую цепь от другой (оставляя между ними только магнитную связь).

Развитие современной электрификации требует производства большого количества как крупногабаритных, так и мало-мощных трансформаторов.

Например, для передачи электроэнергии от гидроэлектростанций требуются трансформаторы на очень высокие напряжения и притом таких размеров, которые лимитируются железнородож-

ными габаритами. Передача энергии производится в основном переменным током, напряжение которого можно менять трансформаторами. Постоянный ток удобен для передачи энергии, но встречаются большие трудности при его трансформировании и распределении. В связи с многократной трансформацией электроэнергии мощность трансформаторов, используемых в нашем народном хозяйстве, больше чем в 3 раза превышает мощность всех генераторов, установленных на электростанциях.

§ 8.2. Принцип действия трансформатора. Э. д. с., наводимые в трансформаторах, и коэффициент трансформации

На рис. 8.1 представлены упрощенная схема устройства трансформатора и условное обозначение его на чертежах. Здесь C — стальной сердечник, который охватывается первич-

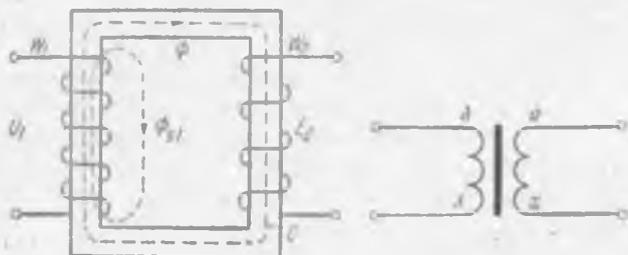


Рис. 8.1

ной обмоткой из изолированного медного провода с числом витков ω_1 и вторичной обмоткой с числом витков ω_2 .

Только для упрощения чертежа эти обмотки показаны на разных стержнях сердечника. На самом деле они обязательно размещаются на одном стержне (см. § 8.8).

К зажимам первичной обмотки прикладывается напряжение сети U_1 , которое вызывает в этой обмотке ток i_1 .

В § 6.5 рассмотрена катушка со стальным сердечником. Так же, как и в этой катушке, ток i_1 вызывает в сердечнике трансформатора синусоидально меняющийся магнитный поток, который можно выразить как

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t, \quad (8.1)$$

где Φ_m — амплитуда магнитного потока;

$\omega = 2\pi f$ — угловая частота;

f — частота;

t — время.

Этот поток пересекает обе обмотки и наводит в них электродвижущие силы (э. д. с.)

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

где e — мгновенное значение э. д. с.

После подстановки (8.1)

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -w \frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt} = \omega w \Phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t.$$

Действующее значение этой э. д. с. выражается формулой

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \Phi_m w}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \cdot \Phi_m w = 4,44 B_m \cdot S \cdot f \cdot w,$$

где B_m — амплитуда магнитной индукции в сердечнике, исчисляемая в тесла;

S — поперечное сечение сердечника, m^2 .

Переменный магнитный поток

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t$$

наводит э. д. с.

$$e = E_m \sin \omega t = E_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

т. е. э. д. с. отстает от вызывающего ее магнитного потока на 90° .

Действующие значения э. д. с. в первичной и вторичной обмотках соответственно выражаются:

$$E_1 = 4,44 \Phi_m \cdot f \cdot w_1;$$

$$E_2 = 4,44 \Phi_m \cdot f \cdot w_2.$$

Каждое из этих соотношений называется уравнением трансформаторной э. д. с.

Отношение этих э. д. с.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

равно отношению чисел витков и называется коэффициентом трансформации (он показывает, во сколько раз трансформатор меняет напряжение). Этот коэффициент чаще всего записывают не в виде частного, а в виде дроби

$$k = 10/0,4,$$

где 10 ($k\theta$) — напряжение первичной,

а 0,4 ($k\theta$) — напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Как для понижающих (которые понижают напряжение), так и для повышающих трансформаторов в числителе коэффициента трансформации указывают большее из обоих напряжений. Если k зажимам вторичной обмотки трансформатора.

тора подключить потребителя электроэнергии, например осветительные лампы, то по обеим обмоткам трансформатора потекут токи нагрузки.

При полной нагрузке трансформатора его к. п. д. становится относительно большим (например, 98%). Поэтому при нагрузках от 50 до 100% от номинальной можно считать, что мощность, потребляемая первичной обмоткой из сети P_1 , и мощность, отдаваемая вторичной обмоткой P_2 , приблизительно равны, т. е.

$$P_1 \approx P_2. \quad (8.2)$$

Если пренебречь небольшим различием коэффициентов мощности в обеих обмотках, то (8.2) можно переписать

$$U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \approx U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi,$$

откуда следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1},$$

т. е. величины токов в обмотках обратно пропорциональны числам витков. Необходимо иметь в виду, что эта пропорция справедлива только при нагрузках, близких к номинальной мощности трансформатора.

Таким образом, принцип действия трансформатора заключается в том, что напряжение, приложенное к первичной обмотке, создает в сердечнике магнитный поток, который пропорционален вызывающему его первичному напряжению. Этот магнитный поток наводит в обмотках электродвижущие силы, пропорциональные числам витков. Поэтому вторичную обмотку можно выполнить так, чтобы получать от нее энергию при необходимом напряжении.

§ 8.3. Холостой ход трансформатора

Режим работы трансформатора без вторичной нагрузки (когда цепь вторичной обмотки разомкнута) называется холостым ходом трансформатора.

На рис. 8.2, а представлена векторная диаграмма этого режима. Здесь U_1 — вектор напряжения питающей сети, которое приложено к первичной обмотке трансформатора. Обычно это напряжение изменяется во времени по синусоиде и поэтому вызывает в сердечнике синусоидальный магнитный поток Φ . Для возбуждения этого потока из сети по первичной обмотке протекает ток холостого хода трансформатора $I_{x.x}$, состоящий из активной $I_{a.x.x}$ и реактивной $I_{p.x.x}$ составляющих. Упрощенно можно считать, что реактивная составляющая $I_{p.x.x}$ намагничивает сердечник, а активная составляющая $I_{a.x.x}$ покрывает потери энергии на гистерезис и вихревые токи.

возникающие при периодическом перемагничивании стали. Потери энергии в сердечнике зависят от его объема, магнитной индукции, частоты перемагничивания и сорта стали. Чем больше эти потери, тем больше активная составляющая тока холостого хода трансформатора $I_{а.х.х}$ и тем большим оказывается угол потерь α .

Ток холостого хода $I_{х.х}$ имеет несинусоидальную форму, но этим часто пренебрегают и рассматривают его как синусоидальный.

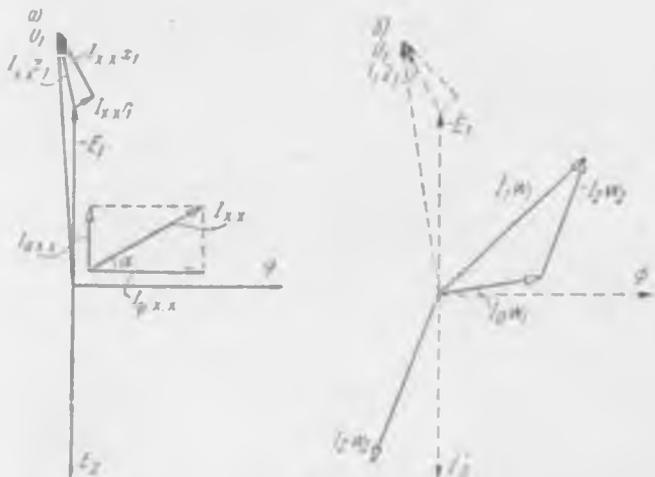


Рис. 82

Поток Φ наводит во вторичной обмотке э. д. с. E_2 , отстающую от него на 90° , а в первичной — противоэлектродвижущую силу E_1 , которая в основном уравнивает приложенное напряжение U_1 . Хотя противоэлектродвижущая сила E_1 тоже отстает от потока Φ на 90° , ее поворачивают на 180° и откладывают так, как это показано на рис. 8.2, а, т. е. откладывают вектор $-E_1$. Этот поворот делается для удобства сравнения противоэлектродвижущей силы E_1 с напряжением U_1 .

Обмотки трансформатора обладают активным сопротивлением, зависящим от материала и размеров провода, и реактивным сопротивлением, которое создается магнитными потоками рассеяния, т. е. потоками Φ_p , замыкающимися, помимо стали, через воздух (см. рис. 8.1).

Поток рассеяния первичной обмотки Φ_{p1} вызывает в этой обмотке э. д. с.

$$E_{p1} = 4,44 \Phi_{p1m} \cdot f \cdot w_1 = -U_{p1},$$

которая пропорциональна току I_1 в первичной обмотке.

На преодоление этой э. д. с. затрачивается некоторая часть напряжения сети

$$\dot{U}_{p1} = j \cdot \dot{I}_1 \cdot x_1,$$

где x_1 — реактивное сопротивление первичной обмотки.

Ток $I_{x,x}$, протекая по активному сопротивлению r_1 первичной обмотки, создает на нем активное (связанное с выделением тепла) падение напряжения $I_{x,x} \cdot r_1$, вектор которого совпадает по фазе с вектором $I_{x,x}$. Проходя по реактивному сопротивлению x_1 первичной обмотки, ток $I_{x,x}$ вызывает реактивное падение напряжения $I_{x,x} \cdot x_1$, которое опережает ток $I_{x,x}$ на 90° .

Согласно второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{x,x}(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{x,x}Z_1,$$

т. е. приложенное напряжение \dot{U}_1 преодолевает противоэлектродвижущую силу E_1 и падение напряжения в первичной обмотке.

Падением напряжения в обмотке за его малостью часто пренебрегают и считают, что

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 \Phi_m \cdot f \cdot w_1, \quad (8.3)$$

т. е. что приложенное напряжение в основном уравновешивается противоэлектродвижущей силой E_1 .

Если считать, что к первичной обмотке сеть подводит стабильное, неменяющееся напряжение $U_1 = \text{const}$, что часто в самом деле имеет место, то из формулы (8.3) следует, что магнитный поток в сердечнике Φ тоже можно считать приблизительно постоянным.

Нагрев первичной обмотки обуславливается всей величиной тока в этой обмотке. Нагрев стального сердечника, как это отмечалось выше, связан только с активной составляющей $I_{a,x,x}$ тока холостого хода, которая совпадает по фазе с противоэлектродвижущей силой — E_1 .

Для вычисления активной составляющей тока холостого хода надо располагать величиной потерь энергии $P_{x,x}$ на перемагничивание стального сердечника при действующей в нем магнитной индукции B_m .

Удельные потери в одном килограмме конкретного сорта стали в зависимости от индукции даются в справочниках, а при отсутствии таких данных можно ориентировочно считать, что при индукциях от 1 до $1,7 \text{ в} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ мощность этих потерь P_0 составляет от 1 до 3 *вт* на каждый килограмм веса сердечника.

Активная составляющая тока холостого хода определяется как

$$I_{a.x.x} = \frac{P_0 \cdot G}{E_1}, \quad (8.4)$$

где P_0 — удельные потери в стали, *вт/кг*;

G — вес сердечника, *кг*;

E_1 — противоэлектродвижущая сила в первичной обмотке, *в*.

Вес сердечника определяется по его размерам и удельному весу, равному $7,5 \text{ г/см}^3$ (74000 н/м^3).

Реактивная составляющая тока холостого хода определяется по формуле

$$I_{p.x.x} = \frac{H_m \cdot l_{cp}}{\sqrt{2} \cdot w_1}, \quad (8.5)$$

где H_m — напряженность магнитного поля;

l_{cp} — длина средней силовой линии сердечника;

w_1 — число витков первичной обмотки.

Намагничивающая сила (н. с.) отыскивается по кривой намагничивания для конкретного сорта стали. За отсутствием такой кривой можно ориентировочно считать, что для индукций $1-1,7 \text{ в} \cdot \text{сек/м}^2$ н. с. составляет $100 + 1000 \text{ а/м}$.

Так как напряженность поля, а значит, и ток отыскиваются при амплитудном значении индукции, то для получения действующего значения тока в знаменатель (8.5) вводится $\sqrt{2}$.

Ток холостого хода определяется по формуле

$$I_{xx} = \sqrt{I_{a.x.x}^2 + I_{p.x.x}^2} \quad (8.6)$$

и составляет $3-10\%$ от номинального тока трансформатора. Чем мощнее трансформатор, тем относительно меньше его ток холостого хода.

§ 8.4. Рабочий режим трансформатора

✓ Рабочий режим трансформатора характеризуется тем, что от его вторичной обмотки питается нагрузка. В этом режиме н. с. трансформатора создается токами обеих обмоток

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1 \approx I_{x.x} w_1, \quad (8.7)$$

где $I_1 w_1$ — н. с. первичной обмотки,

$I_2 w_2$ — н. с. вторичной обмотки;

$I_0 w_1$ — результирующая н. с., которая очень близка к н. с. холостого хода.

На рис. 8.2, б представлена векторная диаграмма н. с. трансформатора с коэффициентом трансформации $\frac{w_1}{w_2} = 1$, которая иллюстрирует уравнение (8.7).

Здесь показана н. с. $I_1\omega_1$ и $I_2\omega_2$, которые в сумме образуют н. с. $\dot{I}_0\omega_1$, вызывающую магнитный поток Φ .

Вектор I_1Z_1 падения напряжения в первичной обмотке, вызванного всем током I_1 , показан в сильно преувеличенном виде: обычно этот вектор составляет лишь несколько процентов (например, 3%) от вектора U_1 . Если пренебречь вектором I_1Z_1 за его малостью, то можно считать, что

$$U_1 = E_1, \quad (8.8)$$

т. е. противоэлектродвижущая сила E_1 равна питающему напряжению U_1 . Из уравнения (8.8) следует, что магнитный поток Φ и вызывающая его н. с. $I_0\omega_1$ должны в рабочем режиме трансформатора быть такими же, как и при холостом ходе, т. е.

$$\dot{I}_0\omega_1 = \dot{I}_{x.x} \cdot \omega_1.$$

С этим допущением из формулы (8.7) получается так называемое уравнение н. с.

$$\dot{I}_1 \cdot \omega_1 + \dot{I}_2 \omega_2 = \dot{I}_{x.x} \cdot \omega_1, \quad (8.9)$$

из которого следует, что при любой нагрузке трансформатора сумма н. с. всех его обмоток равна почти постоянной величине — н. с. холостого хода. Это следует из того, что приложенное к трансформатору напряжение U_1 должно вызывать почти равную себе противоэлектродвижущую силу E_1 . Для создания этой противоэлектродвижущей силы E_1 необходим почти постоянный поток Φ ; для создания этого потока требуется н. с. $I_{x.x} \cdot \omega_1$.

Поэтому н. с. первичной обмотки $I_1\omega_1$ состоит, как это видно из векторной диаграммы (см. рис. 8.2, б), из двух слагаемых: н. с. холостого хода $\dot{I}_{x.x}\omega_1$ и н. с. — $I_2\omega_2$, которая уравновешивает размагничивающее действие тока вторичной нагрузки $\dot{I}_2\omega_2$.

Всякое изменение вторичного тока I_2 , а значит, и вторичной н. с. $I_2\omega_2$ вызывает в первичной такое же изменение составляющей — $I_2\omega_2$, потому что иначе наступило бы изменение магнитного потока Φ и было бы нарушено приближительное равенство (8.8), что невозможно, так как это противоречило бы второму закону Кирхгофа.

Если трансформатор загружен больше, чем на 50% своей номинальной мощности, то часто пренебрегают н. с. холостого хода за ее малостью, и уравнение (8.9) приобретает следующий вид:

$$\dot{I}_1 \cdot \omega_1 + \dot{I}_2 \cdot \omega_2 = \dot{I}_{x.x} \cdot \omega_1 = 0.$$

В этом случае для модулей токов в обмотках получается соотношение

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_2}{w_1}, \quad (8.10)$$

т. е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков.

Вопросы для самопроверки

- Назначение трансформатора.
- Каково устройство трансформатора?
- Можно ли размещать первичную и вторичную катушки трансформатора на разных стержнях магнитопровода?
- Как выражаются э. д. с., наводимые в обмотках трансформатора?
- Что такое коэффициент трансформации?
- В чем заключается принцип действия трансформатора?
- Что такое режим холостого хода трансформатора?
- Начертите векторную диаграмму холостого хода трансформатора.
- Чем уравнивается напряжение, приложенное к первичной обмотке трансформатора?
- От чего зависит величина магнитного потока в сердечнике трансформатора?
- Чем определяется нагрев трансформатора?
- Как определяется активная составляющая тока холостого хода?
- Как определяется реактивная составляющая тока холостого хода?
- Как определяется и. с., создающая магнитный поток в сердечнике?
- Почему выражение реактивной составляющей для тока холостого хода содержит $\sqrt{2}$?
- Как определяется ток холостого хода?
- Начертите векторную диаграмму и. с. трансформатора, работающего под нагрузкой.
- Что такое уравнение и. с.?
- Из чего складывается и. с. первичной обмотки?
- Почему изменение тока во вторичной обмотке вызывает изменение первичного тока?
- Каково соотношение между токами обеих обмоток в загруженном трансформаторе?

§ 8.5. Приведенный трансформатор

Для удобства расчетов, связанных с трансформаторами, и удобства построения векторных диаграмм вместо реального трансформатора часто рассматривают условный, эквивалентный, приведенный трансформатор, т. е. такой, у которого обе обмотки имеют одинаковое число витков. Чтобы привести трансформатор к числу витков первичной обмотки, принимают, что приведенное число витков вторичной обмотки w'_2 равно w_1 .

Отсюда следует, что в обеих обмотках будут наводиться одинаковые э. д. с., т. е. приведенная э. д. с. E'_2 во вторичной обмотке равна E_1 :

$$E'_2 = E_1 \frac{w_1}{w_2} = E_1, \quad (8.11)$$

Если пренебречь током холостого хода, то приведенный вторичный ток I_2^* равен первичному току I_1 :

$$I_2^* = I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_1. \quad (8.12)$$

Приведение трансформатора к одному числу витков не должно, однако, изменять мощности потерь в его сопротивлениях. Потери мощности в активном сопротивлении r_2 равны

$$P_2 = I_2^2 r_2.$$

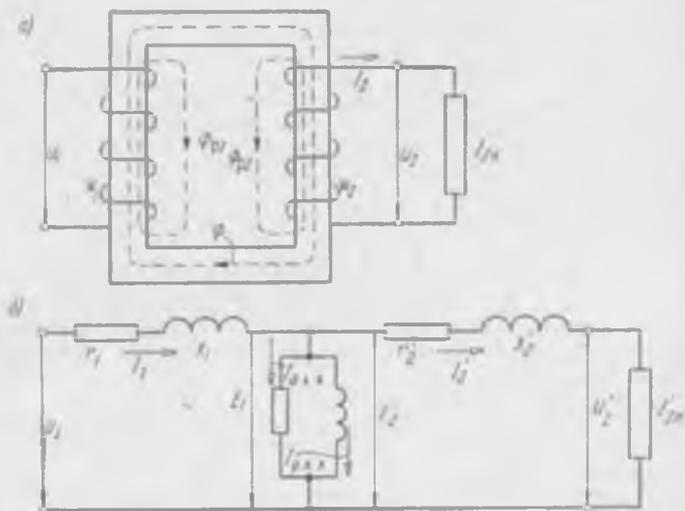


Рис. 8.3

Приведенный ток I_2' изменился (например, уменьшился) в w_2/w_1 раз. Чтобы мощность P_2 осталась неизменной, необходимо, чтобы приведенное сопротивление r_2' изменилось (увеличилось) в $(w_1/w_2)^2$ раз, т. е. мощность

$$P_2 = I_2'^2 r_2' = (I_2 \frac{w_2}{w_1})^2 \cdot r_2' \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2,$$

откуда

$$r_2' = r_2 \frac{I_2^2}{(I_2')^2} = r_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (8.13)$$

На рис. 8.3, а представлен трансформатор под нагрузкой. (Обозначения те же, что и на рис. 8.1.) Ток I_2 вторичной обмотки зависит от сопротивления нагрузки $Z_{2н}$ и вызывает магнитный поток рассеяния $\Phi_{р2}$, замыкающийся по воздуху.

Хотя э. д. с., наводимые потоками рассеяния в обмотках, относительно очень малы, но они определяют собой важную характеристику трансформатора: изменение напряжения в зависимости от его нагрузки.

В § 8.3 показано, что поток Φ_{p1} создает в первичной обмотке реактивное сопротивление x_1 ; аналогично этому поток Φ_{p2} вызывает во вторичной обмотке ее реактивное сопротивление x_2 . Чтобы привести это сопротивление к числу витков первичной обмотки, исходят из постоянства реактивной мощности $I_2^2 x_2$ до и после приведения. По аналогии с (8.13), приведенное реактивное сопротивление вторичной цепи выразится уравнением

$$x_2' = x_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (8.14)$$

§ 8.6. Схема замещения трансформатора

После того как трансформатор приведен к одному (например, первичному) числу витков, его можно для расчета представить схемой замещения, которая приведена на рис. 8.3, б. Здесь $Z'_{2н}$ — приведенное сопротивление вторичной нагрузки трансформатора, к которой приложено вторичное напряжение U'_2 ; r'_2 и x'_2 — соответственно активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки. Так как трансформатор приведен к одному числу витков, то

$$\omega_2' = \omega_1 \text{ и } E'_2 = E_1.$$

Поэтому обе обмотки на схеме замещения можно объединить и представить ветками, по которым замыкаются составляющие тока холостого хода трансформатора $I_{а.х.х}$ и $I_{р.х.х}$.

Удобство построения векторной диаграммы приведенного трансформатора состоит в том, что при любом коэффициенте трансформации векторы E_1 и E'_2 имеют одинаковую длину и, кроме того, можно опускать обозначения чисел витков. Расчет приведенного трансформатора проще тем, что магнитная связь между обмотками заменена электрической и поэтому можно суммировать сопротивления первичной и вторичной цепей.

§ 8.7. Векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой

На рис. 8.2, б представлена упрощенная векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой, иллюстрирующая отношение между токами в обмотках. На рис. 8.4, а приведена та же диаграмма в более полном виде. Она иллюстрирует

работу трансформатора и базируется на его схеме замещения (рис. 8.3, б) и уравнении

$$U_1 = I_1(r_1 + jx_1) + I'_2(Z'_2 + Z'_{2\text{н}}).$$

Построение этой практически полной векторной диаграммы (см. рис. 8.4, а) удобно начинать с вектора вторичной н. с. $I'_2\omega'_2$, который откладывается в произвольном направлении.

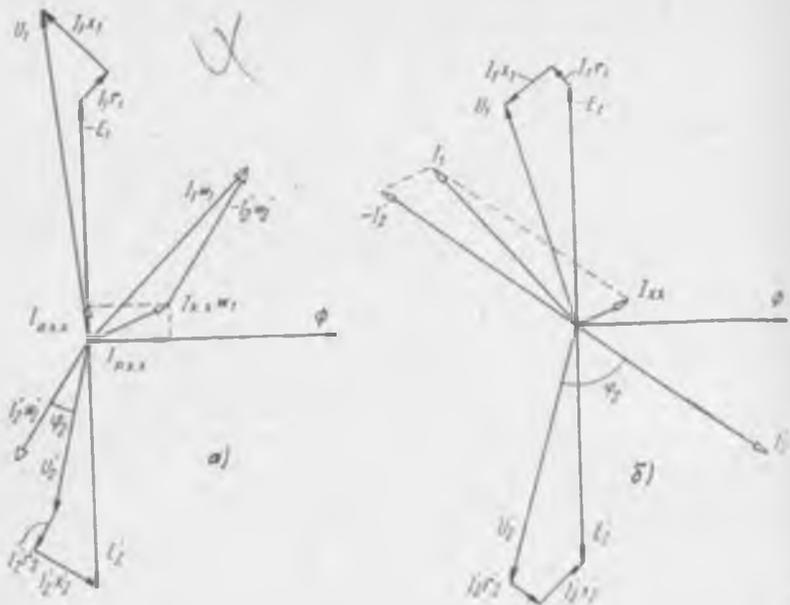


Рис. 8.4

Под углом φ_2 , зависящим от характера вторичной нагрузки (при чисто активной нагрузке угол $\varphi_2 = 0$), откладывается вектор вторичного напряжения

$$\dot{U}'_2 = I'_2 Z'_{2\text{н}},$$

к нему добавляются падения напряжения на сопротивлениях вторичной обмотки $I'_2 r'_2$ и $I'_2 x'_2$ ($I'_2 r'_2$ откладывается параллельно вектору тока I'_2). Как видно из схемы замещения (см. рис. 8.3, б), сумма этих напряжений образует э. д. с. E'_2 . Другими словами, чтобы приложить к нагрузке напряжение U'_2 , требуется во вторичной обмотке навести э. д. с. E'_2 . Затем откладывается вектор магнитного потока Φ , наводящий э. д. с. E'_2 и опережающий ее на 90° (§ 8.2).

Тот же поток в первичной обмотке наводит э. д. с. E_1 , которая условно откладывается под углом 180° к вектору E'_2 (§ 8.3). Чтобы навести в сердечнике поток Φ , первичная об-

мотка потребляет из сети ток холостого хода $I_{x,x}$, состоящий из активной $I_{a,x,x}$ и реактивной $I_{p,x,x}$ составляющих; чтобы уравновесить размагничивающее действие вторичной н. с. $I'_2 w'_2$, первичная обмотка потребляет из сети ток — I'_2 и создает подмагничивающую н. с. — $I'_2 w'_2$. В целом первичная обмотка создает н. с. $I_1 w_1$. Так как $w'_2 = w_1$, то векторную диаграмму приведенного трансформатора можно строить, опуская обозначения чисел витков, т. е. оставляя только токи. Ток I_1 , протекая по первичной обмотке, вызывает падения напряжений $I_1 r_1$ и $I_1 x_1$, которые в сумме с э. д. с. E_1 уравновешивают приложенное к трансформатору напряжение сети U_1 .

После построения векторной диаграммы ее обычно поворачивают так, чтобы направить вектор магнитного потока Φ горизонтально направо.

§ 8.8. Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке

Если в векторной диаграмме (см. рис. 8.4, а) положить сопротивления обмоток $r = x = 0$, то в этом случае окажется, что вторичное напряжение U'_2 будет равно первичному U_1 , т. е. в таком идеальном трансформаторе не будет внутренней потери напряжения.

В реальном трансформаторе часть подводимого к нему напряжения теряется в виде $I r$ и $I x$ и поэтому в большинстве случаев в приведенном трансформаторе

$$U'_2 < U_1,$$

как это показано на диаграмме рис. 8.4, а.

Чем больше сопротивления обмоток r_1 , r_2 , x_1 , x_2 и чем больше ток нагрузки I_2 , тем (в большинстве случаев) больше будет потеря напряжения, т. е. тем меньшим окажется вторичное напряжение U_2 .

Для снижения реактивного сопротивления конструктор располагает первичную и вторичную обмотки на одном стержне магнитопровода.

Но величина напряжения U_2 зависит еще и от характера нагрузки. Так, на рис. 8.4, б показана векторная диаграмма трансформатора, нагруженного на емкость. Такая нагрузка практически встречается очень редко. Как видно из этой диаграммы, емкостная нагрузка может повысить вторичное напряжение U_2 так, что оно в приведенном трансформаторе даже превысит первичное.

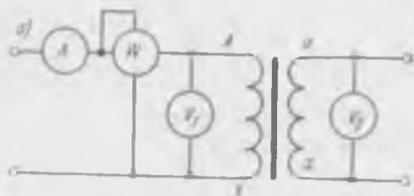
Для оценки потери напряжения пользуются так называемым процентным изменением напряжения трансформатора

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} 100\%. \quad (8.15)$$

Нестабильность вторичного напряжения при изменениях нагрузки создает для потребителя в некоторых случаях большие неудобства.

§ 8.9. Испытание трансформаторов

Для основных испытаний трансформаторы подвергаются опытам холостого хода и короткого замыкания. В опыте холостого хода, схема которого представлена на рис. 8.5, а, вторичная обмотка остается разомкнутой и отношение показаний вольтметров U_1 и U_2 в обеих обмотках определяет его коэффициент трансформации.



Ваттметр W в цепи первичной обмотки показывает потребление мощности трансформатором в режиме холостого хода, т. е. мощность потерь энергии в стали сердечника P_0G (см. § 8.3.). Расходом энергии на нагрев обмотки в этом опыте пренебрегают за его малостью. Амперметр A показывает величину тока холостого хода $I_{х.х.}$

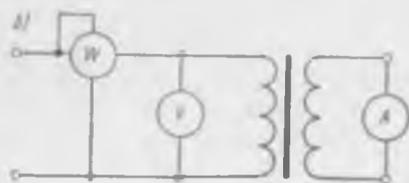


Рис. 8.5

В опыте короткого замыкания, схема которого представлена на рис. 8.5, б, вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко. К первичной обмотке подводится напряжение короткого замыкания $U_{к.з.н.}$, которое вызывает в обмотках номинальные токи. Это напряжение $U_{к.з.н.}$ значительно (например, в 20 раз) меньше номинального напряжения трансформатора U_n (опыт проводится при пониженном напряжении во избежание опасного перегрева трансформатора).

По результатам опыта короткого замыкания определяется так называемое напряжение короткого замыкания

$$U_k = \frac{U_{к.з.н.}}{U_n} 100\%, \quad (8.16)$$

которое указывается на паспорте трансформатора и является мерой внутреннего падения напряжения в нем.

Ваттметр в цепи первичной обмотки в опыте короткого

замыкания указывает мощность потерь энергии на нагрев обмоток трансформатора

$$P_k = I_1^2 \cdot r_1 (I_2')^2 \cdot r_2'. \quad (8.17)$$

Нагревом стального сердечника в этом опыте пренебрегают (очень мал магнитный поток).

§ 8.10. К. п. д. трансформаторов

К. п. д. трансформаторов выражается формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{0G} + P_k}, \quad (8.18)$$

где P_2 — активная мощность, отданная нагрузке;

P_{0G} — мощность потерь энергии в стали сердечника, вызванных его перемагничиванием; их называют постоянными, потому что эти потери не зависят от нагрузки трансформатора;

P_k — мощность потерь энергии в обмотках трансформатора; их называют переменными потерями.

Если нагрузка трансформатора меняется, то максимум к. п. д. чаще всего наступает при нагрузке в 75% от номинальной; у мощных трансформаторов этот максимальный к. п. д. превышает, как уже отмечалось, 99%.

Вопросы для самопроверки

Какой трансформатор называется приведенным?

Как вычисляется сопротивление нагрузки вторичной цепи трансформатора, приведенное к первичной обмотке?

Какова роль потоков рассеяния в трансформаторе?

Начертите схему замещения трансформатора.

Зачем трансформаторы приводят к одному числу витков?

Начертите векторную диаграмму трансформатора под нагрузкой.

Почему вторичное напряжение трансформатора меняется с нагрузкой?

Постройте векторную диаграмму трансформатора при емкостной нагрузке.

Что такое процентное изменение напряжения трансформатора?

Начертите схему опыта холостого хода трансформатора.

Что показывает ваттметр в этом опыте?

Начертите схему опыта короткого замыкания.

Что такое напряжение короткого замыкания в процентах?

Что показывает ваттметр в опыте короткого замыкания?

Как выражается к. п. д. трансформатора?

§ 8.11. Трехфазные трансформаторы

В электрических сетях пользуются трехфазным трансформатором. Его устройство поясняется рис. 8.6, а. По трехфазному сердечнику трансформатора замыкаются магнитные потоки

всех трех фаз; сумма этих трех потоков (при равномерной нагрузке всех фаз) равна нулю (см. § 5.2). Поэтому поток каждой фазы замыкается по остальным двум стержням. Такой сердечник дешевле трех однофазных. На каждый стержень сердечника

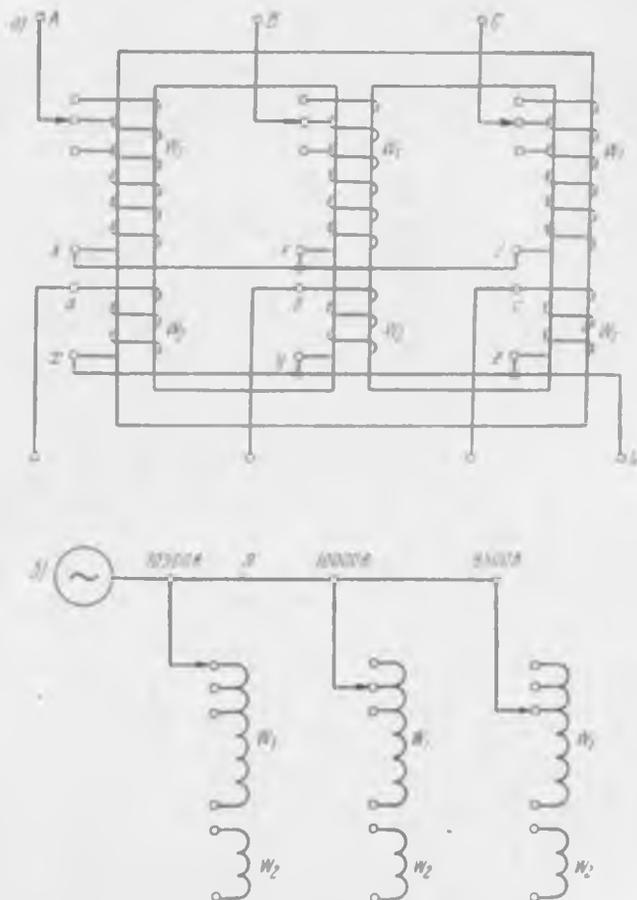


Рис. 8.6.

насажены первичная обмотка с числом витков w_1 и вторичная с числом витков w_2 . Первичные обмотки разных фаз соединяются звездой или треугольником, вторичные также соединяются между собой. Схема соединений обмоток на рис. 8.6, а относится к так называемой группе соединений Y/Y_0-12 , где Y — соединение первичных обмоток в звезду; Y_0 — соединение вторичных обмоток в звезду с выведенной нулевой точкой;

12 — условно указывает, что векторы напряжений первичной и вторичной обмоток в этом трансформаторе совпадают по фазе, как стрелки часов в полдень.

Группа, обозначенная $Y/\Delta-11$, указывает на соединение обмоток низшего напряжения в треугольник и на то, что угол сдвига фаз между напряжениями такой же, как в 11 часов стрелками часовой и минутной стрелками.

Группа Y/Y_0 применяется, в частности, для питания потребителей с осветительной нагрузкой, а группой Y/Δ пользуются для очищения кривой напряжения от 3-й гармонической.

Стандартные трансформаторы изготавливаются мощностью 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500 и т. д. киловольт-ампер.

Из каждой фазы первичной обмотки делается по три вывода для регулирования напряжения на $\pm 5\%$. Рис. 8.6, б поясняет эту систему регулирования. Здесь L — линия, питающая трех потребителей; генератор создает в начале линии напряжение 10 500 в (из-за падения напряжения в линии в ее середине действует напряжение в 10 000 в, а в конце — 9500 в); w_1 — первичная, а w_2 — вторичная обмотки одной фазы трансформатора (остальные фазы не показаны).

Допустим, что трансформаторы рассчитаны так, что номинальному напряжению в 10 000 в соответствует в первичной обмотке 10 000 витков. Чтобы получить неизменное напряжение во вторичной обмотке, у всех потребителей надо в начале линии увеличить число витков первичной обмотки до 10 500, в середине линии оставить 10 000 витков, а у трансформатора в конце линии снизить число витков до 9500, как это показано на рис. 8.6, б. Если поддерживать отношение $U_1/w_1 = \text{const}$, то из уравнения (8.3) следует, что U_2 будет оставаться приблизительно неизменным.

§ 8.12. Автотрансформаторы

На рис. 8.7 представлена схема автотрансформатора, одна из обмоток которого, например вторичная, составляет часть другой, в данном случае первичной.

При той же номинальной мощности автотрансформатор получается более дешевым, чем трансформатор с отдельными обмотками; чем ближе коэффициент трансформации к единице, тем ниже оказывается стоимость автотрансформатора.

Допустим, что на рис. 8.7 дана схема автотрансформатора, у которого $w_1 = 200$ витков, $w_2 = 100$ витков и который потребляет из сети ток $I_1 = 5$ а, а нагрузку питает током $I_2 = 10$ а (на этом рисунке показано соответствующее токораспределение). Питание той же нагрузки трансформатором требует отдельной первичной обмотки с количеством $w_1 = 200$

витков, рассчитанных на ток в 5 а , и отдельной вторичной обмотки такого же веса, как первичная. Автотрансформатор, как это видно из рис. 8.7, позволяет сэкономить всю вторичную обмотку трансформатора и сократить окно в стальном сердечнике.

Недостатком автотрансформатора является электрическая связь (отсутствие изоляции) между первичной и вторичной цепями, что резко ограничивает область его применения.

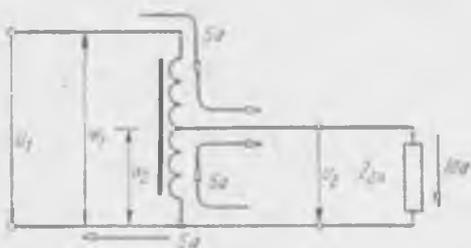


Рис. 8.7

Эти аппараты применяются в основном в тех случаях, когда необходимый коэффициент трансформации приближается к единице.

§ 8.13. Многообмоточные трансформаторы

Многообмоточными трансформаторами называются такие, которые содержат несколько вторичных обмоток. Примером может служить силовой трансформатор в радиоприемнике, содержащий три вторичных обмотки (анодную и две накальных).

Ток в первичной обмотке такого трансформатора определяется из уравнения и. с. (8.9), где вместо $I_2 w_2$ должна быть геометрическая сумма н.с. всех вторичных обмоток.

§ 8.14. Параллельная работа трансформаторов

Крупные промышленные предприятия обычно питаются электроэнергией не через один, а через несколько трансформаторов, включенных параллельно. Такая система питания позволяет выводить один из трансформаторов в профилактический ремонт без полного отключения предприятия.

На рис. 8.8 показано параллельное включение двух однофазных трансформаторов. Их первичные обмотки $A-X$ включены параллельно в питающую сеть, а вторичные $a-x$, так же параллельно включенные обмотки, питают нагрузку.

Включать параллельно можно только такие трехфазные трансформаторы, которые удовлетворяют следующим условиям:

- а) идентичность их группы соединения;
- б) равенство их номинальных э. д. с. и напряжений;
- в) приблизительное равенство их напряжений короткого замыкания.

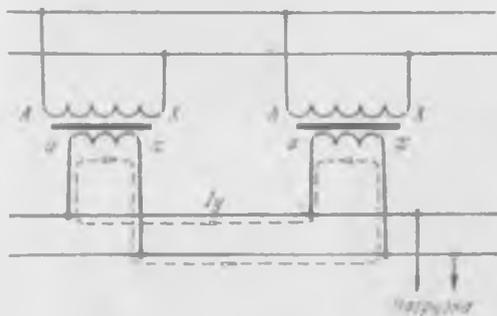


Рис. 8.8

Параллельное включение трансформаторов, не удовлетворяющих этим условиям, вызвало бы уравнивательные токи I_u (см. рис. 8.8) между трансформаторами и их перегрев.

§ 8.15. Охлаждение трансформатора

Потери энергии в сердечнике и обмотках трансформатора выделяются в виде тепла, которое должно быть отведено от трансформатора во избежание его перегрева. Чем больше потери энергии в трансформаторе и чем хуже условия его охлаждения, тем большими должны быть габариты этого трансформатора.

В зависимости от способа охлаждения различают:

- а) сухие трансформаторы, охлаждаемые окружающим воздухом;
- б) масляные трансформаторы с естественным охлаждением (рис. 8.9, а);
- в) масляные трансформаторы с искусственным охлаждением.

Масляные трансформаторы погружаются в стальной бак (на рис. 8.9, б часть бака вырезана) с так называемым трансформаторным маслом, которое является продуктом перегонки нефти, и по своим свойствам родственно смазочным маслам и керосину. Масло в трансформаторах увеличивает электрическую прочность изоляции обмоток и улучшает его охлаждение.

Поэтому габариты масляного трансформатора при прочих равных условиях меньше, чем у сухого.

В масляных трансформаторах с естественным охлаждением тепло от стенок бака передается окружающему воздуху за счет естественной вентиляции камеры, в которой установлен трансформатор.

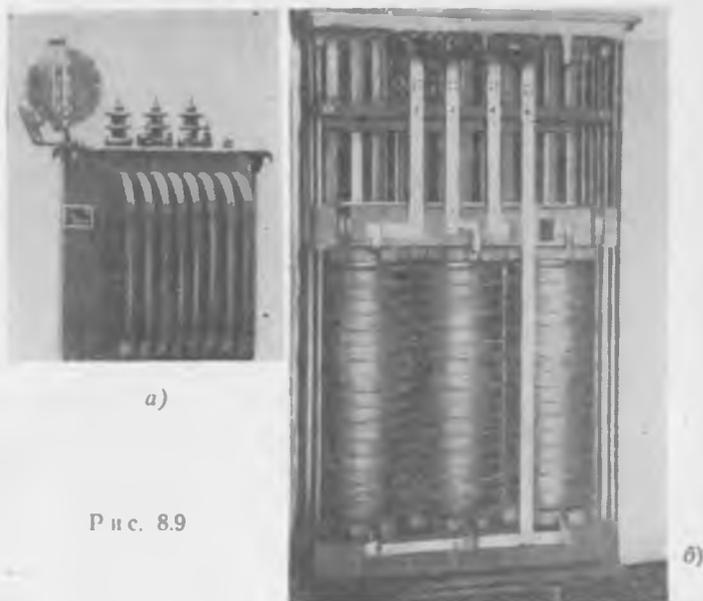


Рис. 8.9

Масляные трансформаторы с искусственным охлаждением имеют специальное оборудование для обдувки элементов бака вентиляторами.

Над баком масляного трансформатора располагается так называемый расширитель, в который выходит избыток масла из бака, если в связи с нагревом масло увеличит свой объем. На расширителе устанавливается указатель уровня масла. С течением времени масло увлажняется, поэтому его периодически испытывают и суют.

Задачи. 8.1. Не учитывая экономические соображения ориентировочно рассчитать трансформатор мощностью $S=268$ ва с первичным напряжением $U_1=220$ в и вторичным $U_2=110$ в. Приблизительно оценить в нем потерю напряжения и к. п. д. при полной нагрузке с $\cos\varphi_2=0,866$.

Решение. Данный расчет не учитывает экономических соображений, а служит только для иллюстрации соотношений между размерами, потерей напряжения и другими техническими параметрами трансформатора. Для такого «прикидочного» расчета необходимо задаться некоторыми величинами, которым можно придать, например, следующие значения:

$$\text{индукция в сердечнике } B = 1 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2},$$

удельное сопротивление провода обмотки $\rho = 0,017$ (медь);
коэффициент заполнения окна трансформатора медью $k_M = 0,25$ (остальная часть площади окна заполняется изоляцией, воздухом и каркасом обмотки);

допустимая плотность тока в обмотке $\Delta I = 3 \text{ а/мм}^2$ (для плохих условий охлаждения $\Delta I = 2 \text{ а/мм}^2$, а для хороших — 5 а/мм^2).

Потери на перемагничивание стали могут составить (см. § 8.3)

$$P_0 = 2 \text{ вт/кг.}$$

Для упрощения расчета можно принять, что реактивное сопротивление обмотки в три раза больше активного, т. е.

$$x = 3 r,$$

хотя это допущение может иногда привести к значительным ошибкам.

Площадь поперечного сечения сердечника S_{Fe} можно ориентировочно выбрать исходя из мощности трансформатора S :

$$S_{Fe} = \sqrt{S} = \sqrt{268} = 16 \text{ см}^2 = 4 \times 4 \text{ см}^2,$$

т. е. выбрать квадратную форму поперечного сечения сердечника со стороны квадрата в 4 см.

Если положить, что $E_1 = U_1$ (см. § 8.3), то числа витков обмоток найдем по формулам:

$$w_1 = \frac{U_1}{4,44 B_m \cdot S_{Fe} f} = \frac{220}{4,44 \cdot 1 \cdot 0,0016 \cdot 50} = 620 \text{ витков};$$

$$w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1} = 620 \frac{110}{220} = 310 \text{ витков.}$$

После приведения к числу витков первичной обмотки получим

$$w'_2 = w_1 = 620 \text{ витков.}$$

Так как коэффициент мощности, с которым будет работать трансформатор, не известен, то мощность трансформатора оценивается в вольт-амперах (а не в ваттах).

Номинальные токи в обмотках (пренебрегая потерями в трансформаторе и током холостого хода)

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{268}{220} = 1,22 \text{ а}; \quad I_2 = \frac{S}{U_2} = \frac{268}{110} = 2,44 \text{ а};$$

$$I'_2 = 1,22 \text{ а.}$$

Поперечное сечение провода обмоток

$$s_1 = \frac{I_1}{\Delta I} = \frac{1,22}{3} = 0,4 \text{ мм}^2; \quad s_2 = \frac{2,44}{3} = 0,8 \text{ мм}^2.$$

Площадь окна трансформатора S_0 должна быть в $1/k_M$ (т. е. в 4 раза) больше площади металла катушек в окне

$$S_0 = \frac{s_1 w_1 + s_2 w'_2}{k_M} = \frac{0,4 \cdot 620 + 0,8 \cdot 310}{0,25} = 2000 \text{ мм}^2.$$

Произвольно выбираем высоту окна ($a = 55 \text{ мм}$), чтобы она была несколько больше ширины b :

$$b = \frac{S_0}{a} = \frac{2000}{55} = 36 \text{ мм.}$$

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{a.x.x} = \frac{P_0 G}{U_1} = \frac{6,24}{220} = 0,028 \text{ а.}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода (8.5)

$$I_{p.x.x} = \frac{H_m \cdot I_{cp}}{\sqrt{2} \cdot \omega_1} = \frac{200 \cdot 0,26}{\sqrt{2} \cdot 620} = 0,06 \text{ а.}$$

где H_m найдено по кривой намагничивания (рис. 8.11), а воздушный зазор в магнитопроводе принят пренебрежительно малым.

По полученным составляющим вычисляем ток холостого хода (8.6)

$$I_{x.x} = \sqrt{I_{a.x.x}^2 + I_{p.x.x}^2} = \sqrt{0,028^2 + 0,06^2} = 0,066 \text{ а.}$$

Потеря напряжения в трансформаторе может быть установлена графически по векторной диаграмме рис. 8.11.

В произвольном направлении откладываем вектор $I'_2 = 1,22 \text{ а}$, под углом $\varphi_2 = \arccos 0,866$ — вектор $U'_2 = 220 \text{ в}$, к последнему добавляются падения напряжения во вторичной обмотке:

$$I'_2 r'_2 = 1,22 \cdot 6,33 = 7,65 \text{ в;}$$

$$I'_2 x'_2 = 3 \cdot 7,65 = 23 \text{ в.}$$

Сумма этих трех напряжений, т. е. э. д. с. E'_2 , будет равной 236 в. Откладываем ток $I_{x.x}$, к которому добавляем ток $-I'_2$. Их сумма образует вектор I_1 , равный 1,27 а. Откладываем вектор $-E_1$, т. е. вектор E'_2 , повернутый на 180° . К вектору $-E_1$ добавляем падения напряжения в первичной обмотке:

$$I_1 r_1 = 1,27 \cdot 6,33 = 8 \text{ в;}$$

$$I_1 x_1 = 3 \cdot 8 = 24 \text{ в.}$$

Сумма этих напряжений образует первичное напряжение $U_1 = 256 \text{ в}$.

Потеря напряжения внутри трансформатора составит (8.15)

$$U_k = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} 100\% = \frac{256 - 220}{256} 100\% = 14\%.$$

Но к рассчитанному трансформатору прикладывается U_1 не 256 в, а только 220 в. Чтобы получить во вторичной обмотке требуемое напряжение в 220 в, необходимо увеличить число витков вторичной обмотки на 14%, т. е. выбрать

$$\omega_2 = 310 \cdot 1,14 = 352 \text{ витка}$$

и соответственно увеличить окно трансформатора.

Для расчета к. п. д. необходимо определить потери энергии в меди и стали.

Потери энергии в стали

$$P_0 G = 2 \cdot 3,12 = 6,24 \text{ вт.}$$

Потери в обеих обмотках (8.17)

$$P_k = I_1^2 r_1 + (I'_2)^2 r'_2 = 1,27^2 \cdot 6,33 + 1,22^2 \cdot 6,33 = 19,7 \text{ вт.}$$

К. п. д. при заданной выше нагрузке (8.18) будет

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_0 G + P_k} = \frac{110 \cdot 2,44 \cdot 0,866}{110 \cdot 2,44 \cdot 0,866 + 6,24 + 19,7} = 0,9.$$

8.2. Выбрать сечение сердечника в 32 см^2 . Остальные исходные данные те же, что и в задаче 8.1.

Определить число витков обеих обмоток трансформатора.

Ответ: 310 и 155 витков.

8.3. По данным предыдущей задачи определить площадь окна трансформатора.

Ответ: 10 см².

8.4. По данным предыдущей задачи закончить ориентировочный расчет трансформатора и определить потерю напряжения в нем и его к. п. д.

Ответ: $U_k = 9\%$, к. п. д. = 0.9.

Вопросы для самопроверки

Как устроен трехфазный трансформатор?

Как регулируется напряжение в трехфазных трансформаторах?

Каковы преимущества и недостатки автотрансформатора по сравнению с трансформатором?

Запишите уравнение н. с. для многообмоточного трансформатора.

Какое преимущество питания потребителя через несколько параллельно включенных трансформаторов вместо одного общего?

Каковы условия, разрешающие параллельную работу трансформаторов?

Чем определяются габариты трансформатора?

Перечислите системы охлаждения трансформаторов.

Для чего нужен расширитель на трансформаторе?

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ

§ 9.1. Общие сведения

Развитие электроизмерительной техники является одним из важных условий научно-технического прогресса. В настоящее время монтаж, наладка и эксплуатация оборудования практически во всех областях науки и техники невозможны без применения разнообразных электронизмерительных приборов.

Разработка и исследование машин и устройств обычно требуют экспериментальных исследований, которые осуществляются с помощью измерительной аппаратуры. Особенно велика познавательная роль измерений в электротехнике, потому что опытное восприятие электрических явлений без применения измерительных приборов затрудняется отсутствием у человека соответствующих органов, которые позволяли бы «ощущать» воздействие электрических величин. Электроизмерительные приборы — это наши электрические «глаза» и «уши».

§ 9.2. Основные определения

Измерение — это познавательный процесс сравнения измеряемой величины с однородной, принятой за единицу.

Измерительная аппаратура — это совокупность технических средств измерения. Она состоит из мер, измерительных приборов и измерительных приспособлений.

Меры — это овеществленные единицы измерения; например, гиря с надписью 1 кг является мерой массы; мерой электрического напряжения является так называемый нормальный элемент.

Измерительные приборы служат для сравнения измеряемой величины с мерой и подразделяются на приборы с непосредственным отсчетом и сравнения. Первые имеют заранее градуированную шкалу, и поэтому измерение этими приборами обходится без непосредственного применения мер, вторые

позволяют сравнить измеряемую величину с мерой. Так, пружинные весы с проградуированной шкалой и стрелочный амперметр — это приборы с непосредственным отсчетом, а чашечные весы и мост для измерения сопротивлений — это приборы сравнения. Приборы с непосредственным отсчетом удобнее в эксплуатации, зато приборы сравнения позволяют получать более точные результаты измерения.

Такому делению приборов соответствуют и два основных метода измерений: непосредственного отсчета (измерение амперметром) и сравнения (измерение мостом).

Измерительные приспособления включают в себя вспомогательные элементы (например, источники питания) и измерительные преобразователи, которые образуют обширную группу специальных элементов измерительных схем и устройств. К преобразователям относятся также измерительные трансформаторы, делители тока и напряжения, активные сопротивления, дроссели и т. д.

§ 9.3. Погрешности

При оценке результата всякого измерения следует исходить из того, что он не точен, т. е. отличается от действительного значения измеряемой величины, и поэтому характеризуется той или иной погрешностью.

Для определения погрешностей какого-либо амперметра его включают последовательно с более точным или, как его называют, образцовым прибором.

Пусть при каком-то токе, протекающем через эти приборы, показание проверяемого амперметра (измеренное значение) будет $A_{и}$, а образцового — A . Показание последнего принимается за действительное значение тока в цепи.

Абсолютной погрешностью проверяемого прибора (так же, как и меры) называется

$$P_a = A_{и} - A.$$

Та же величина, взятая с обратным знаком, т. е.

$$-P_a = A - A_{и},$$

называется поправкой.

Относительной погрешностью в процентах, которая характеризует качество (точность) измерительной операции, но не характеризует качество прибора, называется

$$P_o = \frac{P_a}{A} 100\%.$$

Приведенной погрешностью в процентах, которая характеризует качество прибора, но не характеризует измерительную операцию, называется

$$П_{п} = \frac{П_{а}}{А_{м}} \cdot 100\%,$$

где A_m — наибольшее значение измеряемой величины по шкале проверяемого прибора (т. е. длина шкалы в тех же единицах, что и $П_a$).

Если проверка прибора заканчивается наложением на него клейма как свидетельства его пригодности, то такая проверка называется *поверкой*.

§ 9.4. Приборы магнитоэлектрической системы

На рис. 9.1 схематически показано устройство вольтметра магнитоэлектрической системы в двух проекциях. Здесь 1 — постоянный магнит, 2 — полюсные наконечники этого магнита; 3 — неподвижный стальной цилиндр, назначением которого является создать во всех точках воздушного зазора

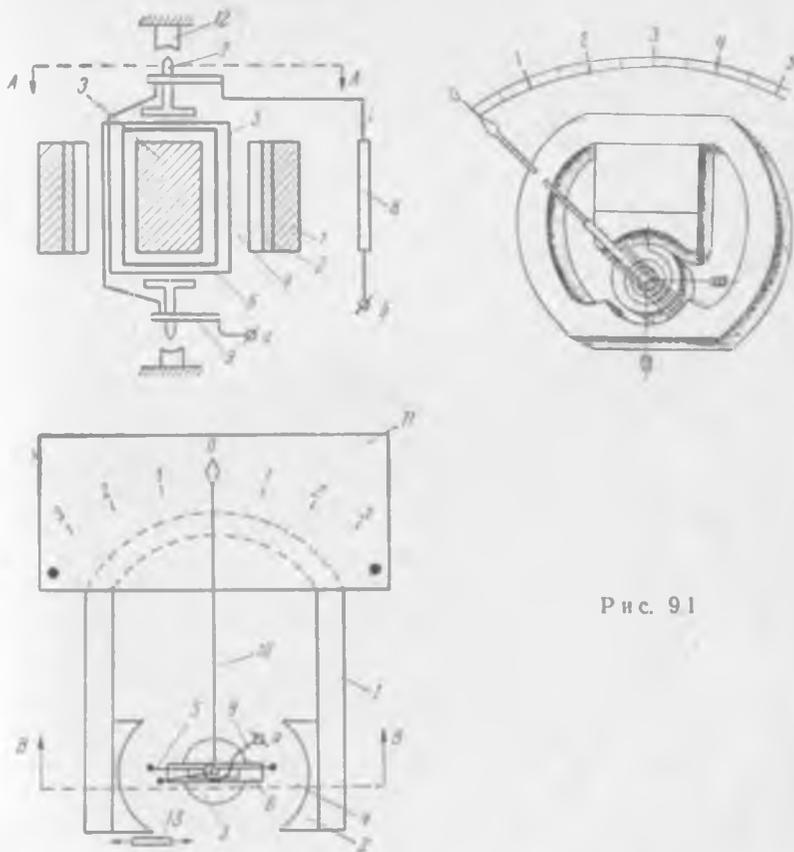


Рис. 9.1

4 однородное и радиально направленное магнитное поле. В зазоре 4 размещена катушка 5, намотанная изолированным проводом на алюминиевом каркасе 6 прямоугольной формы (ее иногда называют рамкой). К катушке приклеены полуоси или керны 7, что обеспечивает возможность ее поворота в воздушном зазоре.

Подвижная катушка 5 через добавочное сопротивление 8 включена под измеряемое напряжение. Ток в катушке пропорционален напряжению, поэтому он может являться мерой измеряемого напряжения; измерение напряжения заменяется измерением тока.

От зажимов а, б к катушке прибора измеряемый ток подводится через спиральные пружины 9, которые создают противодействующий момент $M_{пр}$ и стремятся удержать рамку в таком положении, при котором стрелка 10, скрепленная с рамкой, указывает нулевую отметку шкалы 11. (На этом рисунке некоторые детали, например шкала 11, показаны только в одной проекции; кроме того, надо представить себе зазор 4 более узким, а обмотку 5 — плотно намотанной на каркас 6.)

Измеряемый ток в проводах подвижной катушки (рамки) механически взаимодействует с магнитным потоком и вызывает усилие, которое стремится повернуть рамку, т. е. возникает вращающий момент $M_{вр}$. Так как индукция магнитного поля в воздушном зазоре постоянна, то вращающий момент будет пропорционален току, т. е.

$$M_{вр} = kI,$$

где I — измеряемый ток;

k — коэффициент пропорциональности.

Противодействующий момент пропорционален углу закручивания пружин 9

$$M_{пр} = W\alpha,$$

где α — угол поворота рамки;

W — удельный противодействующий момент, характеризующий жесткость пружины.

Для положения статического равновесия подвижной части прибора, т. е. при установившемся состоянии,

$$M_{пр} = M_{вр}$$

или

$$W\alpha = kI.$$

Отсюда можно определить угол отклонения подвижной системы, вызываемый измеряемым током:

$$\alpha = \frac{k}{W} I. \quad (9.1)$$

Таким образом, пренебрегая некоторыми осложняющими обстоятельствами, можно считать, что каждому значению измеряемого тока будет соответствовать пропорциональный и однозначный угол отклонения стрелки вольтметра от нулевой отметки шкалы и, следовательно, шкала прибора будет равномерной.

В реальных приборах из-за влияния трения отклонение стрелки может оказаться неоднозначным, т. е. при одном и том же приложенном напряжении показания вольтметра при повторных измерениях могут несколько отличаться друг от друга.

Для снижения трения концы полуосей, или керны 7, имеют иглообразную форму и опираются на подпятники из твердого камня 12. В некоторых случаях подвижная система прибора крепится на растяжках (см. § 9.5).

Алюминиевый каркас 6 имеет два назначения:

а) увеличивает механическую прочность (жесткость) подвижной катушки 5;

б) успокаивает колебания подвижной системы прибора около положения равновесия.

Движение каркаса 6 как замкнутого витка в поле магнита 1 вызывает в этом каркасе вихревые токи, которые по принципу Ленца успокаивают (тормозят) его колебания.

На рис. 9.1 представлена одна из конструкций прибора магнитоэлектрической системы в аксонометрии.

§ 9.5. Общие детали устройства приборов с непосредственным отсчетом

Большая часть измерительных механизмов в приборах с непосредственным отсчетом содержит следующие общие узлы и детали: ось, керны и подпятники (рис. 9.2, а); пружину противодействия с нулькорректором (рис. 9.2, б, е); успокоитель (рис. 9.2, в, г); стрелку с противовесом (рис. 9.2, д, е); шкалу; корпус; крепежные детали.

Ось 1 подвижной системы кончается с обеих сторон стальными остриями, или кернами 3, которые опираются на подпятники из твердого камня 2 (агат, рубин и т. д.).

В большинстве приборов с непосредственным отсчетом противодействующий момент создается пружиной противодействия 5 в форме плоской спирали из бронзовой (а не стальной) ленты. В некоторых приборах (например, в рассмотренных выше приборах магнитоэлектрической системы) эти же пружины служат токоподводами к обмоткам подвижных систем.

Внутренний конец спирали жестко соединяется с осью прибора, а внешний крепится к поводку корректора «уста-

новки на нуль» *б* (рис. 9.2, *е*), т. е. регулятора, который выведен на крышку или стенку корпуса прибора и позволяет с помощью отвертки устанавливать стрелку на нулевую отметку шкалы.

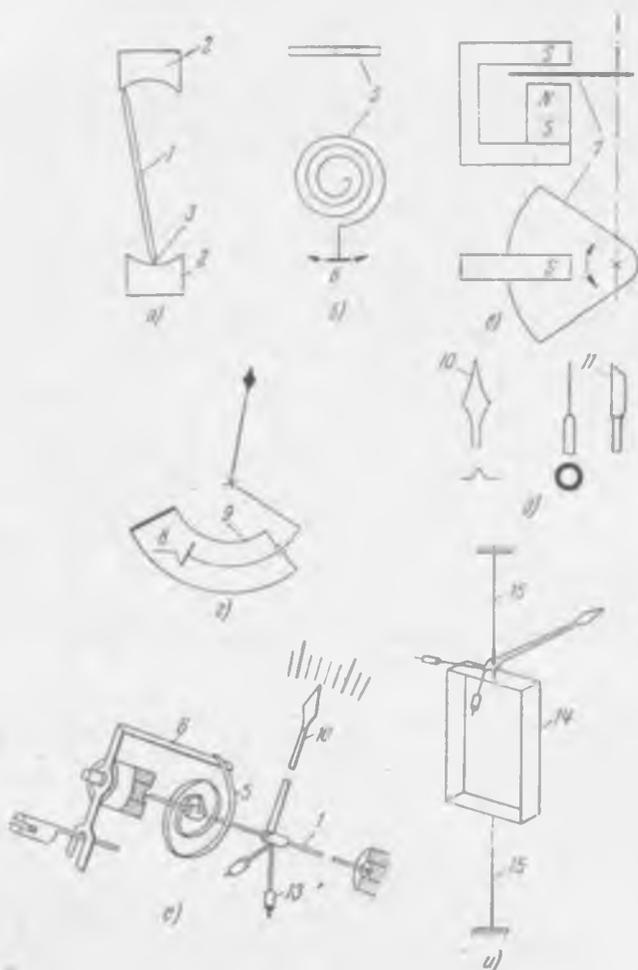


Рис. 9.2

На рис. 9.2, *е* показана ось *1* в сборе с пружиной противодействия *5*, корректором *6* и стрелкой *10*; успокоитель и детали, создающие вращающий момент, не показаны; грузики *13* должны приводить центр тяжести подвижной системы на ее геометрическую ось.

На рис. 9.2, *и* дана схема крепления подвижной катушки

прибора магнитоэлектрической системы 14 на растяжках, т. е. проволочках из бронзы 15. Закручивание растяжек создает противодействующий момент. Момент, создаваемый силами трения в такой системе крепления подвижной части прибора, значительно меньше, чем в системе с подвижной частью, опирающейся на керны.

В логометрах (см. § 9.12) и поляризованных электромагнитных приборах применяются особые методы создания противодействующего момента.

Успокоители необходимы для создания надлежащего момента успокоения колебаний подвижной части прибора. Конструктивно успокоители подразделяются на магнитоиндукционные и воздушные.

В § 9.4 упоминался алюминиевый каркас прибора магнитоэлектрической системы 6 (см. рис. 9.1, а), который вращается в воздушном зазоре магнита и является примером магнитоиндукционного успокоителя. Пока рамка неподвижна, этот каркас никакого момента не создает. При вращении в магнитном поле в нем возникают вихревые токи, тормозящие его движение; чем быстрее движется рамка, тем больше будет момент успокоения.

Обычно магнитоиндукционный успокоитель выполняется в виде алюминиевого сектора 7 (см. рис. 9.2, в), который вращается в магнитном поле постоянного магнита.

Воздушный успокоитель представляет собой поршень 8 (см. рис. 9.2, г), который «ходит» внутри короба 9, не касаясь его стенок, и создает сжатие и разрежение воздуха, тормозящие вращение подвижной системы прибора.

Недостаточное успокоение подвижной системы привело бы к длительным качаниям стрелки около положения равновесия, что затрудняло бы отсчет показаний.

Копьевидные стрелки 10 применяются в менее точных (технических) приборах и облегчают отсчет показаний прибора с больших расстояний (например, 2 м). Ножевидные стрелки 11, наоборот, облегчают отсчет долей деления шкалы, и поэтому их применяют в более точных (лабораторных) приборах. Отсчет показания такой стрелки производится с близкого расстояния (например, 25 см).

Шкалы технических приборов, показания которых отсчитываются издали, выполняются с небольшим количеством толстых линий, которыми отмечают деления; шкалы лабораторных приборов рассматриваются вблизи, и их градуировка наносится многочисленными тонкими линиями.

Наиболее удобны равномерные шкалы, т. е. шкалы с равномерным расположением делений, как и в приборе магнитоэлектрической системы. Однако шкалы приборов других систем в основном оказываются неравномерными.

Шунт имеет токовые зажимы T , через которые подводится измеряемый ток, и потенциальные зажимы P , падение напряжения между которыми подводится к указывающему прибору, играющему таким образом роль милливольтметра. Такое весьма важное разделение контактов исключает влияние случайного сопротивления токовых контактов на показания прибора.

Надобность в шунте вызывается тем, что через спирали и обмотку рамки нельзя пропускать токи больше 50 миллиампер (возможен перегрев). Кроме того, меняя шунты, можно изменить пределы измерения одного и того же прибора и получить таким образом многопредельный амперметр.

Шунты могут выполняться как встроенными в прибор, так и монтируемыми отдельно от него («с наружным шунтом»); в последнем случае на шкале прибора делается надпись «с НШ» и указывается номинальное падение напряжения между потенциальными зажимами шунта, чаще всего 60 или 75 мв.

Для подбора сопротивлений шунта к какому-нибудь показывающему прибору (например, милливольтметру), включенному по схеме рис. 9.3, должно быть известно сопротивление этого прибора

$$r_A = r_p + r_{т.к}$$

и его номинальный ток I_A (или напряжение U_A). (Здесь r_p — сопротивление обмотки подвижной рамки, а $r_{т.к}$ — добавочное сопротивление, встроенное в прибор.)

Измеряемый ток I распределяется между рамкой (ток I_A) и шунтом (ток $I_{ш}$), поэтому необходимое сопротивление шунта будет

$$r_{ш} = r_A \frac{I_A}{I_{ш}} = r_A \frac{I_A}{I - I_A} = r_A \frac{1}{\frac{I}{I_A} - 1} = \frac{r_A}{n - 1},$$

где $n = \frac{I}{I_A} = \frac{r_A}{r_{ш}} + 1$ — так называемый шунтовой коэффициент.

С помощью шунтов можно измерять токи примерно до 5000 а.

Наряду с применением в качестве амперметров приборы магнитоэлектрической системы используются как вольтметры для измерения напряжений от нескольких милливольт до нескольких тысяч вольт. Такой вольтметр (рис. 9.3) состоит из миллиамперметра r_v и добавочного сопротивления r_d , которое выполняется из манганина или константана, т. е. сплавов, сопротивление которых очень мало меняется при колебаниях температуры. Поэтому можно приблизительно считать, что ток через миллиамперметр пропорционален только напряжению

между зажимами вольтметра, и проградуировать его шкалу в единицах измеряемого напряжения.

Расширение пределов измерения вольтметра осуществляется изменением величины добавочного сопротивления, так чтобы при номинальном напряжении через миллиамперметр проходил номинальный ток. Если имеется вольтметр на напряжение U_r (см. рис. 9.3) с сопротивлением r_r и требуется расширить предел его измерения до напряжения U , то необходимое сопротивление определяется по формуле

$$r_d = \frac{U - U_r}{I_v} = \frac{U - I_r r_r}{I_v},$$

где I_r — номинальный ток миллиамперметра.

Изменение сопротивления рамки при колебаниях температуры (в частности, от нагрева измеряемым током) порождает температурную погрешность. Для снижения этой погрешности в схему прибора вводят добавочные сопротивления с нулевым температурным коэффициентом сопротивления. В вольтметрах эта температурная компенсация осуществляется общим добавочным сопротивлением r_d (см. рис. 9.3), а в амперметрах — специальным сопротивлением для температурной компенсации $r_{т.к.}$, которое так же, как и шунт $r_{ш.}$, выполняется только из манганина (константан в паре с медью может создавать термоэлектрические токи).

Еще одной специальной деталью магнитоэлектрического прибора может являться магнитный шунт I_3 (см. рис. 9.1), который позволяет регулировать в узких пределах магнитную индукцию в воздушном зазоре и этим снижать основные погрешности прибора.

Переменный ток частотой больше 30 гц не может вызвать отклонение стрелки магнитоэлектрического прибора (в исключительных случаях может наблюдаться небольшое отклонение: прибор превращается в электромагнитный). Если момент инерции подвижной системы очень мал, то под действием переменного тока возникают ее вибрации и кончик стрелки выглядит «размытым».

При прочих равных условиях чувствительность и точность приборов магнитоэлектрической системы выше, чем у приборов других систем, а собственное потребление энергии сравнительно мало. Поэтому приборы этой системы с подвижной катушкой, опирающейся на керны, получили очень широкое применение и, в частности, используются в качестве:

- а) амперметров и вольтметров постоянного тока;
- б) амперметров и вольтметров переменного тока (что требует добавления к ним специальных преобразователей);
- в) омметров;
- г) логометров;

д) выходных приборов в установках, преобразующих, например, неэлектрические величины в постоянный ток.

Для измерения постоянных токов меньше 10 микроампер используются гальванометрами магнитоэлектрической системы, в которых повышение чувствительности достигается за счет снижения противодействующего момента.

В таких гальванометрах с высокой чувствительностью подвижная катушка не опирается на керны, а подвешивается на проволочке («подвесе») диаметром в сотые доли миллиметра. Закручивание подвеса создает сравнительно малый противодействующий момент и значительно меньшее трение, чем у приборов с кернами.

У гальванометров средней чувствительности рамка крепится на двух растяжках (см. § 9.5).

§ 9.8. Магнитоэлектрические приборы с преобразователями

Чтобы использовать сравнительно высокую чувствительность приборов магнитоэлектрической системы для измерения переменных токов, их включают через полупроводниковые выпрямители, термопреобразователи, электронные лампы.

Включение магнитоэлектрического прибора через обычные схемы одно- или двухполупериодного выпрямителя переменного тока с полупроводниковыми (меднозакисными, германиевыми) диодами позволяет изготовить чувствительный, компактный, портативный (малогабаритный, удобный для переноски), универсальный, многопредельный прибор постоянного и переменного тока. Такие приборы часто называют детекторными.

На рис. 9.4, а представлена упрощенная схема такого прибора. Здесь 1 и 2 — полупроводниковые выпрямители (их называют диодами, вентилями, детекторами). Переключатель П1 позволяет выбрать нужный предел измерения тока или напряжения. Переключатель П2 служит для переключения прибора на постоянный или переменный ток; на рис. 9.4, а он показан в положении для измерения переменных величин. Измеряемое напряжение прикладывается к зажимам а и б и вызывает ток через добавочное сопротивление $z-d$. Этот ток распределяется между универсальным шунтом $v-g$ и измерительным механизмом ИМ через диод 1. Диод 2 предохраняет диод 1 от опасного напряжения обратной полуволны. Сопротивление r замещает прямое сопротивление диода 1 так, чтобы как на постоянном, так и на переменном токе получить одинаковые пределы измерения.

Приборы детекторной системы градуируются в действующих значениях измеряемой величины.

Термопреобразователь (рис. 9.4, б) состоит из нагрева-

теля H , по которому проходит измеряемый ток, и термопары $ТП$, измеряющей температуру нагревателя и создающей э. д. с. пропорционально квадрату тока в нагревателе. Магнитоэлектрический измерительный механизм $ИМ$ измеряет э. д. с. термопары, а его шкала градуируется в величинах измеряемого тока.

Такие термоэлектрические приборы измеряют действующее значение тока независимо от формы его кривой и применяются, в частности, для измерения несинусоидальных токов и токов высокой частоты. Главный недостаток этих приборов — очень низкая перегрузочная способность и зависимость показаний от температуры окружающей среды.

Электронные вольтметры состоят из электронных ламп и магнитоэлектрического измерительного механизма. Их схемы очень разнообразны. На рис. 9.4, в представлена одна из упрощенных схем. Здесь U_x — измеряемое напряжение, прикладываемое между сеткой и катодом лампы, анодный ток которой является функцией от U_x и измеряется механизмом $ИМ$.

Сопротивление $r_{см}$ обеспечивает получение отрицательного потенциала («смещения») на сетке лампы по отношению к катоду; сопротивление r_v передает этот отрицательный потенциал на сетку. Выбор отрицательного потенциала сетки определяет удобную рабочую точку в левой части анодно-сеточной характеристики лампы.

Лампа работает в режиме сеточного детектирования.

Для измерения постоянных напряжений конденсатор C должен быть закорочен выключателем B .

Эти приборы отличаются ничтожным собственным потреблением энергии и очень высокой чувствительностью. Их применяют в тех специальных случаях, где эти свойства являются необходимыми. Измерения напряжений высоких частот производятся почти исключительно приборами этой системы.

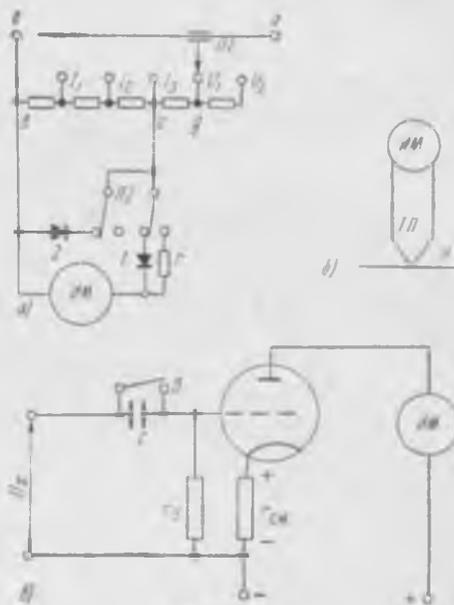


Рис. 9.4

§ 9.9. Электромагнитные приборы

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на втягивании стального сердечника в катушку с измеряемым током.

Устройство такого прибора с плоской катушкой показано на рис. 9.5. В катушку с измеряемым током I втягивается сердечник 3, поворачивая ось 2 со стрелкой 4 и успокоителем 6, 7, 8.

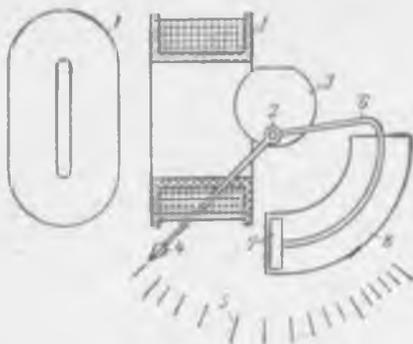


Рис. 9.5

Вращающий момент приборов этой системы можно выразить формулой

$$M_{\text{вр}} = kI^2 \frac{dL}{d\alpha},$$

где I^2 — квадрат измеряемого тока, указывающий на то, что показание прибора определяется действующим значением тока;

$\frac{dL}{d\alpha}$ — величина, характеризующая приращение индуктивности катушки прибора с ростом угла поворота подвижной системы;

k — постоянный коэффициент.

По аналогии с уравнением (9.1) для угла отклонения стрелки получается следующее выражение:

$$\alpha = \frac{kI^2}{W} \frac{dL}{d\alpha},$$

где W — характеристика жесткости пружины противодействия. Квадратичная зависимость вращающего момента от тока приводит к неравномерности шкалы 5 (см. рис. 9.5). Так, например, если принять, что

$$\frac{dL}{d\alpha} = \text{const},$$

то при увеличении измеряемого тока вдвое угол отклонения стрелки возрос бы вчетверо. Такая шкала получилась бы очень неравномерной. Регулируя производную индуктивности по углу поворота выбором формы сердечника, конструктор стремится приблизить шкалу к равномерной.

Приборы электромагнитной системы изготавливаются в основном для частот от 50 до 200 гц.

Кроме приборов с плоской катушкой, показанной на

рис. 9.5, широкое распространение получили приборы с круглой катушкой, основанные на взаимном отталкивании двух намагниченных стальных сердечников; шкалы этих приборов легче приблизить к равномерным.

Приборы с сердечником из обычной электротехнической стали применяются как щитовые амперметры и вольтметры класса точности 1,0—2,5, а приборы с пермаллоевым сердечником — как лабораторные, чаще всего класса 0,5.

Пределы измерения вольтметров электромагнитной системы до 600 в расширяются с помощью добавочных сопротивлений; измерение более высоких напряжений производится с помощью измерительных трансформаторов.

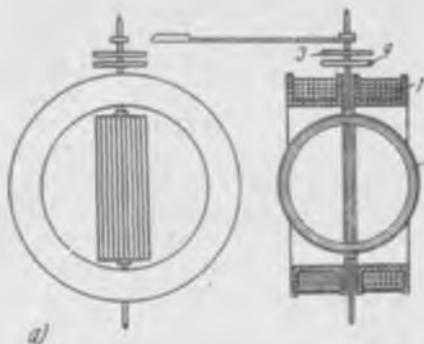
Изготовление вольтметров той же системы с пределом измерения до 10 в и менее затрудняется условиями температурной компенсации (т. е. устранением влияния колебаний температуры на показания прибора). Обмотки лабораторных амперметров могут выполняться из двух половин для переключения на два предела измерения: 2,5 а (при последовательном соединении) и 5 а (при параллельном соединении). Шунтами расширять пределы измерения электромагнитных амперметров нельзя из-за их слишком большого собственного потребления энергии.

Для защиты от влияния внешних магнитных полей, которые могут вызвать искажения показаний прибора, конструктор применяет экранирование или астазирование. В экранированных приборах измерительный механизм заключен в стальной экран, который ослабляет магнитную индукцию внешнего магнитного поля. Астатические приборы содержат два измерительных механизма, действующих на общую ось так, что их вращающие моменты складываются. Собственные магнитные потоки этих механизмов противоположны. Внешнее магнитное поле в равной мере усиливает действие одного потока и ослабляет действие другого, поэтому на результирующий вращающий момент астатического прибора это внешнее поле не влияет. Астазирование применяется только в лабораторных приборах.

Основным достоинством приборов электромагнитной системы является их сравнительно очень высокая перегрузочная способность, обусловленная отсутствием токоведущих частей на подвижной системе. Поэтому большинство щитовых амперметров и вольтметров — приборы электромагнитной системы.

§ 9.10. Электродинамические приборы

Принцип действия приборов электродинамической системы (рис. 9.6,а) основан на взаимодействии магнитных потоков подвижной 2 и неподвижной 1 катушек. Ток к подвижной ка-



тушке подводится через спиральные пружины 3, 4, которые, кроме того, служат для создания противодействующего момента.

Вращающий момент этой системы

$$M_{вр} = k \cdot i_n \cdot I_n \frac{dM_{ин}}{d\alpha}$$

или

$$M_{вр} = k \cdot I_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi \frac{dM_{ин}}{d\alpha},$$

где i_n, I_n — ток в подвижной катушке;

i_n, I_n — ток в неподвижной катушке;

$M_{ин}$ — коэффициент взаимной индукции между катушками;

$\cos \varphi$ — косинус угла сдвига фаз между обоими токами;

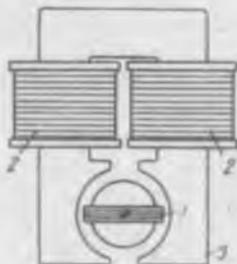
k — постоянный коэффициент.

По аналогии с уравнением 9.1 для угла отклонения стрелки получается следующее выражение:

$$\alpha = \frac{k I_n I_n}{W} \frac{dM_{ин}}{d\alpha} \cos \varphi.$$



б)



в)

Из-за отсутствия стального сердечника погрешности этих приборов на постоянном и переменном токе низкой частоты одинаковы. Поэтому эти приборы проверяют со сравнительно высокой степенью точности на постоянном токе. Их основным достоинством является возможность изготовления приборов высоких классов точности (например, 0,5 или 0,1) для переменного тока.

Рис. 96

Средства защиты от искажающего влияния внешних магнитных полей такие же, как у электромагнитных приборов: экранирование и астазирование.

Приборы электродинамической системы в основном применяются в качестве лабораторных амперметров, вольтметров и ваттметров. На рис. 9.6,б представлен астатический лабораторный ваттметр.

§ 9.11. Ферродинамические приборы

Конструктивно приборы ферродинамической системы (рис. 9.6,в) отличаются от приборов электродинамических только наличием стального сердечника 3, вследствие чего значительно возрастают магнитные потоки катушек 1 и 2.

Вращающий момент выражается принципиально так же, как и для электродинамических приборов.

По сравнению с электродинамическим прибором внесение стального сердечника приводит к снижению точности, но зато улучшает все остальные качества прибора. Повышенные погрешности вызываются нелинейностью кривой намагничивания сердечника, т. е. отсутствием пропорциональности между током и магнитным потоком и тем, что одна катушка наводит э.д.с. электромагнитной индукции в другой катушке.

Приборы ферродинамической системы обычно отличаются от электродинамических более высокой чувствительностью и перегрузочной способностью, а также тем, что в них на подвижную систему действуют большие вращающие моменты при меньшем собственном потреблении энергии. В основном они применяются в качестве щитовых ваттметров и регистрирующих (самопишущих) приборов. В таких самопишущих приборах стрелка снабжается чернильным пером, фиксирующим свое показание на бумажной ленте; преодоление сил трения пера по бумаге требует от измерительного механизма повышенных вращающих моментов.

§ 9.12. Логометры

Логометры служат для измерения отношения двух величин. Они чаще всего изготавливаются как приборы магнитоэлектрической системы, хотя, кроме того, применяются логометры электромагнитной, ферродинамической и других систем.

Подвижная часть логометра магнитоэлектрической системы (рис. 9.7, а) несет на себе две катушки 1 и 2, которые находятся в неравномерном магнитном поле и создают встречные вращающие моменты M_1 и M_2 .

Рис. 9.7,б иллюстрирует зависимость этих моментов от угла поворота подвижной системы. Из-за неравномерности воздуш-

ного зазора индукция в точке B' (см. рис. 9.7, а) оказывается больше индукции в точке B . Поэтому при повороте по часовой стрелке активная сторона первой катушки уходит в область более слабой индукции и момент M_1 падает. Момент M_2 в тех же условиях, наоборот, увеличивается. Если по катушкам протекают токи соответственно I_1 и I_2 , то эти моменты выразятся:

$$M_1 = kI_1B_1 = kI_1f_1(\alpha),$$

$$M_2 = kI_2B_2 = kI_2f_2(\alpha).$$

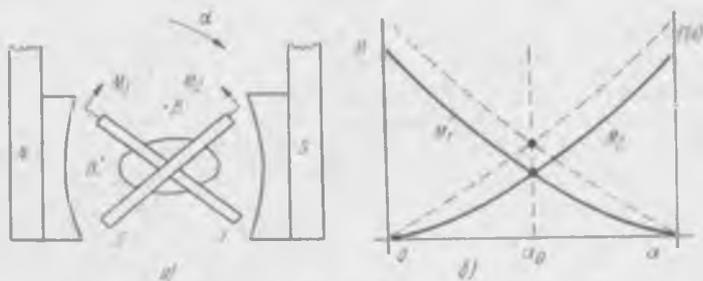


Рис. 9.7

Подвижная система остановится в точке α_0 , для которой

$$M_1 = M_2 \text{ или } I_1f_1(\alpha) = I_2f_2(\alpha),$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f(\alpha),$$

т. е. показания логометра определяются отношением токов в его катушках. Ток к подвижным катушкам подводится через так называемые безмоментные токоподводы с очень малым противодействующим моментом. Поэтому у выключенного прибора подвижная система часто занимает безразличное положение.

Колебания напряжения источника питания, как это видно из рис. 9.7,б (пунктирные линии), практически не влияют на показание логометра, потому что моменты M_1 и M_2 меняются (возрастают) в равной мере. Поэтому логометры широко применяются для измерения сопротивлений.

§ 9.13. Электростатические приборы

Принцип действия приборов электростатической системы основан на электростатическом притяжении пластин конденсатора, из которых одна делается подвижной и связывается со стрелкой.

Вращающий момент такого механизма

$$M = kU^2 \frac{dC}{d\alpha},$$

где U — измеряемое напряжение;

C — емкость между пластинами измерительного механизма;

k — постоянный коэффициент.

Достоинство вольтметров этой системы -- отсутствие (практически) собственного потребления энергии при измерении постоянного и переменного напряжения промышленной частоты. Поэтому ими пользуются для измерения напряжений источников малой мощности с большим внутренним сопротивлением.

Задачи. 9.1. В схеме (рис. 9.3) сопротивление рамки амперметра $r_p = 0,2$ ом и сопротивление $r_{т.к} = 1,8$ ом. Ток полного отклонения измерительного механизма I_M составляет 30 ма. Сопротивление рамки вольтметра $r_v = 50$ ом; ток полного отклонения вольтметра 3 ма.

Найти сопротивление шунта для измерения токов до 300 а.

Найти падение напряжения на шунте U_A при номинальном токе.

Найти добавочное сопротивление r_d для измерения напряжений до 15 в.

Решение. Сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1} = \frac{0,2 + 1,8}{\frac{300}{0,03} - 1} = \frac{2}{9999} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ ома.}$$

Падение напряжения на шунте при номинальном токе (см. рис. 9.3)

$$U_A = I_{ш} \cdot r_{ш} \approx I \cdot r_{ш} = 300 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 60 \text{ мв.}$$

Добавочное сопротивление к вольтметру

$$r_d = \frac{U - I_v r_v}{I_v} = \frac{15 - 0,003 \cdot 50}{0,003} = \frac{14,85}{0,003} = 4950 \text{ ом.}$$

9.2. Определить сопротивление шунта к измерительному механизму с током полного отклонения 5 ма, если $r_p = 3$ ома (см. рис. 9.3), $r_{т.к} = 12$ ом, а ток $I = 15$ ма.

Ответ: 7,5 ом.

9.3. Определить падение напряжения на шунте из условий предыдущей задачи.

Ответ: 75 мв.

9.4. Определить добавочное сопротивление r_d к измерительному механизму с номинальным током 5 ма и сопротивлением $r_v = 15$ ом так, чтобы получить вольтметр на 3 в.

Ответ: 585 ом.

Вопросы для самопроверки

Каковы основные требования к приборам с непосредственным отсчетом?

Что такое основные погрешности?

Что такое класс точности?

Что такое дополнительные погрешности? Почему собственное потребление энергии прибором является нежелательным?

Как расширяются пределы измерения по току приборов магнитоэлектрической системы?

Сколько зажимов на шунте и зачем они нужны?

Чем отличается схема включения амперметра от схемы включения вольтметра?

Как снижают температурную погрешность приборов магнитоэлектрической системы?

Как применяют приборы магнитоэлектрической системы для измерения переменных токов?

Какова схема детекторного прибора?

В каких значениях переменных величин градуируется шкала детекторных приборов?

Как устроен термоэлектрический прибор и для чего он применяется?

Как устроен электронный вольтметр и в каких случаях он применяется?

Как устроен электромагнитный прибор?

Как выражается вращающий момент прибора электромагнитной системы?

Где применяются приборы электромагнитной системы и как расширяют их пределы измерения?

Как защищают эти приборы от внешних магнитных полей?

Как устроены приборы электродинамической системы и для чего они в основном применяются?

Как устроены приборы ферродинамической системы?

Сравните между собой свойства электродинамических и ферродинамических приборов.

Каково назначение логометров?

Как устроен логометр?

Почему показания логометра зависят от отношения токов?

Почему показания логометра слабо зависят от колебаний питающего напряжения?

Как устроен электростатический вольтметр?

В каких случаях он применяется?

§ 9.14. Счетчики электрической энергии

Счетчик электрической энергии переменного тока — это интегрирующий прибор индукционной системы. На рис. 9.8,а представлена схема его включения, а на рис. 9.8,в показан в двух проекциях однофазный счетчик устаревшей конструкции, как более наглядный, чем современные счетчики. На этом рисунке 1 — катушка напряжения, которая включается параллельно нагрузке Z_n и создает в магнитопроводе 2 переменный поток Φ_U , пронизывающий алюминиевый диск 3; 4 — катушка тока, которая включается последовательно с нагрузкой и создает в магнитопроводе 5 поток Φ_I , также пронизывающий диск 3. Совокупность потоков Φ_U и Φ_I образует бегущее поле, увлекающее за собой диск 3. Количество оборотов этого диска подсчитывается счетным механизмом 6 и является мерой энергии, которая поступила в нагрузку за время учета t . На рис. 9.8,б этот счетчик показан в аксонометрии.

Вращающий момент $M_{вр}$, приложенный к диску, выражается формулой

$$M_{вр} = k_1 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cos \varphi = k_2 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = k_2 P,$$

где k — константы;

Φ_U — поток, пропорциональный напряжению на нагрузке U ;

Φ_I — поток, пропорциональный току в нагрузке I ;

φ — угол сдвига фаз между U и I ;

P — мощность нагрузки.

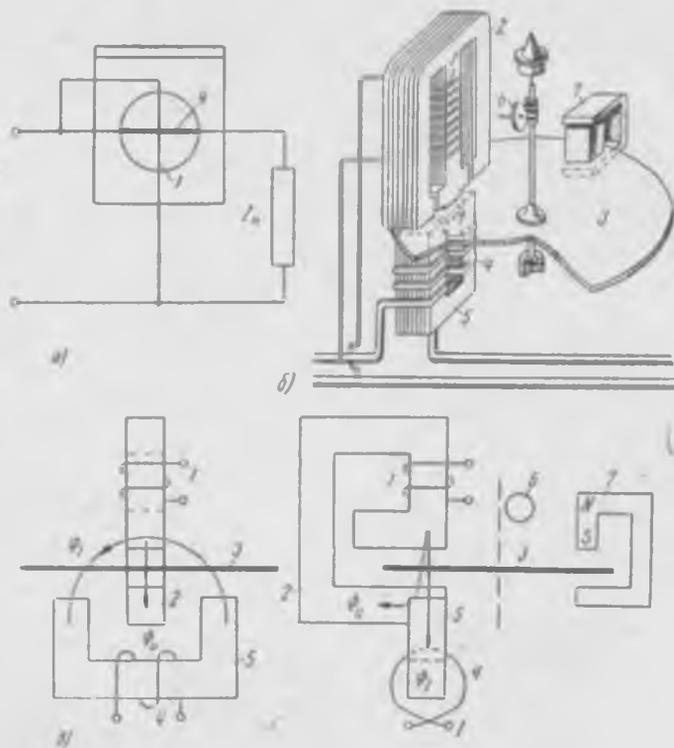


Рис. 9.8

Таким образом, вращающий момент $M_{вп}$ пропорционален мощности нагрузки P и вызывает вращение диска со скоростью v , пропорциональной мощности нагрузки P ,

$$v = \frac{dN}{dt} = k_3 \cdot M_{вп} = k_4 \cdot P,$$

где N — количество оборотов диска за время t .

После интегрирования получаем

$$\int_0^t v dt = N = \int_0^t k_4 \cdot P \cdot dt = k_4 \cdot A,$$

т. е. количество оборотов диска счетчика является мерой энергии A .

На паспорте счетчика указывается так называемое передаточное число

$$n_0 = \frac{N}{A} = \frac{\text{колич. обор.}}{\text{ед. энергии}}$$

или количество оборотов диска, соответствующее $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Для проверки счетчика подсчитывают его постоянную

$$C = \frac{A}{N} = \frac{3600 \cdot 1000}{n_0} = \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{1 \text{ об. диска}}$$

т. е. энергию в ватт-секундах, соответствующую 1 обороту диска ($3600 \cdot 1000$ — это количество ватт-секунд в $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$).

Относительная погрешность счетчика определяется уравнением

$$\Pi_0 = \frac{Cn - Pt}{Pt} 100\%,$$

где n — количество оборотов диска счетчика за время, приближающееся к 1 мин ;

Cn — измеренное значение энергии по счетчику;

P — показание ваттметра, измеряющего мощность нагрузки;

t — продолжительность n оборотов диска счетчика, сек ;

Pt — действительное значение энергии, переданное нагрузке за время t .

Если погрешность счетчика выходит за допустимые пределы, то он подлежит проверке в специальных лабораториях, где его подвергают регулировке. Основным органом этой регулировки является постоянный магнит 7 (на рис. 9.8, в показан только во 2-й проекции), поле которого вызывает в движущемся диске 3 вихревые токи и, следовательно, момент торможения $M_{\text{тор}}$. Для регулировки счетчика перемещают магнит 7 и этим меняют величину $M_{\text{тор}}$. Изменение тормозного момента $M_{\text{тор}}$ влечет за собой изменение скорости вращения диска и позволяет уменьшать погрешности счетчика.

Если счетчик загружен менее чем на $10 \div 20\%$ своей номинальной мощности, то учет энергии будет осуществляться с повышенными погрешностями.

§ 9.15. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяются, во-первых, для выполнения правил техники безопасности, а во-вторых для расширения пределов измерения стандартных 5-амперных и 100-вольтных приборов.

На рис. 9.9. показана схема включения приборов через из-

мерительные трансформаторы в высоковольтную однофазную линию, по которой протекает ток до 500 а под напряжением 10 000 в. (Однофазная линия на рисунке выбрана только для упрощения чертежа, высоковольтные линии обычно выполняются трехфазными.) Непосредственное включение измерительных приборов в эту линию недопустимо, во-первых, по соображениям техники безопасности для обслуживающего персонала, а во-вторых, приборы для непосредственного включения оказались бы очень громоздкими и нетехнологичными, т. е. сложными в смысле их изготовления.

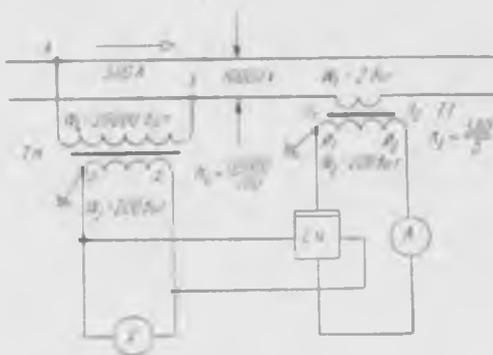


Рис. 9.9

Вольтметр и обмотка напряжения счетчика (рис. 9.9), рассчитанные на напряжение в 100 в, включены через измерительный трансформатор напряжения *ТН*, который понижает напряжение высоковольтной линии в 100 раз; его коэффициент трансформации принято записывать в виде дроби $k_U = \frac{10000}{100}$. Показание приборов, включенных через *ТН*, должно умножаться на его коэффициент трансформации k_U .

Амперметр и обмотка тока счетчика, рассчитанные на 5 а, включены через измерительный трансформатор тока *ТТ*, который питает приборы током в 100 раз меньшим, чем в линии; его коэффициент трансформации принято записывать в виде дроби $k_I = \frac{500}{5}$. Показания приборов должны умножаться на этот коэффициент.

Измерительные трансформаторы изолируют измерительные приборы от высокого напряжения первичной цепи. На случай пробоя между обмотками измерительного трансформатора один конец вторичной обмотки обязательно заземляется, чтобы защитить персонал от опасности высокого напряжения. В зависимости от создаваемых ими погрешностей по углу и по

коэффициенту трансформации измерительные трансформаторы разделяются на классы точности. Счетчики электроэнергии включаются через измерительные трансформаторы класса 0,5, а устройства автоматики — класса 3. Разметка зажимов этих трансформаторов позволяет выбирать правильное направление тока в приборах.

Если бы намагничивающий ток измерительного трансформатора тока равнялся нулю, то его вторичный ток составлял бы

$$I_2 = - \frac{\omega_1}{\omega_2} I_1,$$

где ω — числа витков обмоток;

I — токи в комплексной форме.

В этом случае вторичный ток был бы пропорционален первичному и повернут на 180° .

Наличие намагничивающего тока, нелинейно меняющегося, как при изменении первичного тока, так и сопротивления нагрузки вторичной цепи приводит к непостоянству коэффициента трансформации (погрешность по коэффициенту трансформации) и изменению угла сдвига фаз между токами обеих обмоток (погрешность по углу). Поэтому конструктор стремится снизить намагничивающий ток, в частности, ценой увеличения размеров трансформатора.

Режим работы трансформатора тока близок к короткому замыканию вторичной обмотки. На паспорте измерительного трансформатора тока указывается предельно допустимое сопротивление приборов во вторичной цепи, например $0,8 \text{ ома}$. Слишком большое сопротивление вторичной цепи вызовет возрастание напряжения на зажимах вторичной обмотки, возрастание э.д.с., магнитного потока в сердечнике, намагничивающего тока, погрешностей, и трансформатор тока перестанет удовлетворять требованиям своего класса точности.

Размыкание цепи вторичной обмотки обратило бы весь первичный ток в намагничивающий, что вызвало бы в этой обмотке высокое напряжение, опасное для обслуживающего персонала. Поэтому запрещается размыкать вторичную цепь трансформатора тока под нагрузкой.

Если, например, необходимо выключить амперметр (см. рис. 9.9), а первичная цепь не может быть выключена, то надо сначала замкнуть накоротко точки I_1 и I_2 , а уже после этого выключить амперметр.

Если пренебречь падением напряжения в обмотках трансформатора напряжения, то напряжение на зажимах его вторичной обмотки составит

$$\dot{U}_2 = - \frac{\omega_2}{\omega_1} \dot{U}_1,$$

где U — напряжение между концами его обмоток.

В этом случае вторичное напряжение было бы пропорционально первичному и повернуто на 180° .

Наличие падения напряжения в обмотках приводит к непостоянству отношения U_1/U_2 и изменению угла сдвига фаз между ними, т. е. вызывает погрешности. Поэтому конструктор стремится снизить сопротивление обмоток трансформатора напряжения. На паспорте указывается предельно допустимая мощность вторичной нагрузки, превышение которой вызовет погрешности, выходящие за пределы, разрешенные классом точности данного трансформатора. Режим работы трансформатора напряжения должен быть близок к холостому ходу.

Для измерения постоянных токов больше 5000 а пользуются измерительными трансформаторами постоянного тока с насыщенным сердечником, которые родственны магнитным усилителям (см. § 6.7). Чем больше измеряемый ток, тем больше насыщение сердечника и тем больше вспомогательный переменный ток во вторичной обмотке трансформатора. Амперметр в цепи этого переменного тока градуируется в величинах измеряемого постоянного тока.

§ 9.16. Измерение токов и напряжений

Постоянные токи и напряжения обычно измеряются приборами магнитоэлектрической системы. При этом сами измерительные механизмы рассчитываются на малые пределы измеряемых величин. Расширение пределов измерения амперметров осуществляется шунтами и измерительными трансформаторами постоянного тока, а вольтметров — добавочными сопротивлениями (см. § 9.7).

Переменные токи и напряжения измеряются чаще всего приборами электромагнитной системы. В специальных случаях применяются приборы электродинамической системы (высокая точность), ферродинамической (самопишущие приборы с большим вращающим моментом), детекторной (компактный универсальный прибор), электронной (высокая чувствительность), электростатической (малое собственное потребление энергии).

Расширение пределов измерения на переменном токе достигается измерительными трансформаторами тока и напряжения. Поэтому большинство приборов переменного тока изготавливается на пределы измерения в 5 а и 100 в.

§ 9.17. Измерение мощности и расхода энергии

На рис. 9.8,а показана схема включения однофазного счетчика электрической энергии. Его обмотка тока или последовательная обмотка I включается последовательно с нагрузкой, а

его обмотка напряжения или параллельная обмотка I — параллельно нагрузке.

Измерение мощности и расхода энергии производится по одним и тем же схемам, только расход энергии измеряется счетчиками, а мощность — ваттметрами электродинамической или ферродинамической систем.

Двухэлементные счетчики типа САЗ, предназначенные для учета активной энергии в трехпроводных цепях, имеют две

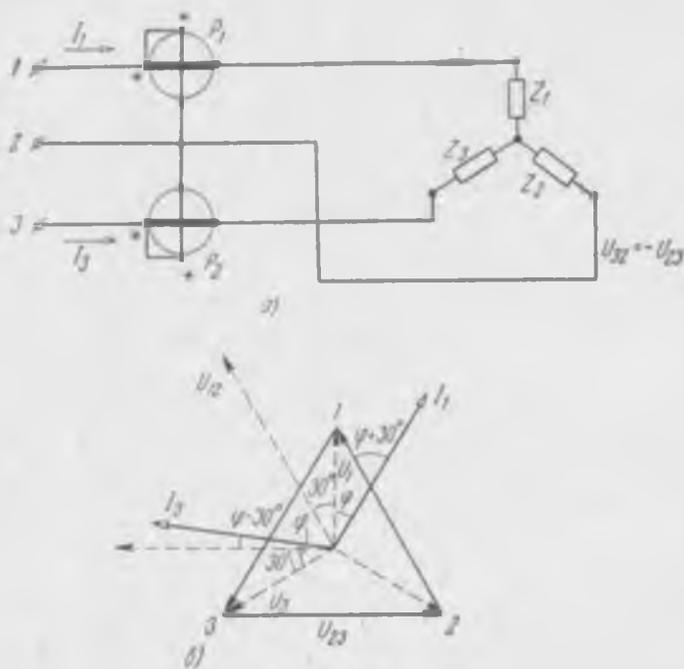


Рис. 9.10

одинаковые магнитные системы с обмотками тока и напряжения, воздействующими на два диска. Оба диска помещены на одну ось, связанную со счетным механизмом, благодаря чему происходит алгебраическое суммирование вращающих моментов обеих систем. Наличие двух дисков позволяет уменьшить взаимное влияние магнитных потоков одного элемента на другой.

По схеме внутренних соединений и включения их в цепь двухэлементные счетчики основаны на методе двух приборов. Если включить два ваттметра в трехфазную цепь по схеме рис. 9.10,а, то они будут учитывать суммарную активную мощность трехфазной цепи, независимо от асимметрии нагрузки.

Мгновенные значения мощности p_1 и p_2 , учитываемые ваттметрами в любой момент времени, определяются:

$$p_1 = u_{12} \cdot i_1;$$

$$p_2 = u_{32} \cdot i_3.$$

Просуммируем левые и правые части этих выражений. После соответствующих преобразований получим, что

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 &= u_{12} \cdot i_1 + u_{32} \cdot i_3 = (u_1 - u_2) i_1 + (u_3 - u_2) i_3 = \\ &= u_1 i_1 + u_2 (-i_1 - i_3) + u_3 i_3 = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3, \end{aligned}$$

так как для трехфазной цепи, согласно первому закону Кирхгофа,

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

или

$$i_2 = -i_1 - i_3.$$

Здесь $u_1 i_1$, $u_2 i_2$, $u_3 i_3$ — мгновенные значения мощностей отдельных фаз.

Таким образом, сумма показаний ваттметров соответствует суммарной мощности трехфазной цепи.

Первый ваттметр показывает мощность

$$P_1 = U_{12} \cdot I_1 \cos(\widehat{U_{12}, I_1}),$$

а второй

$$P_2 = U_{32} \cdot I_3 \cdot \cos(\widehat{U_{32}, I_3}).$$

При равномерной нагрузке всех трех фаз показания ваттметров, как это видно из векторной диаграммы рис. 9.10,б, выражаются:

$$P_1 = U_{12} \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(\varphi + 30^\circ),$$

$$P_2 = U_{32} \cdot I_3 \cos(\varphi - 30^\circ) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(\varphi - 30^\circ).$$

Если сложить и вычесть показания ваттметров, то получим:

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= U_{\text{л}} I_{\text{л}} [\cos(\varphi + 30^\circ) + \cos(\varphi - 30^\circ)] = \\ &= \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = P; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 - P_1 &= U_{\text{л}} I_{\text{л}} [\cos(\varphi - 30^\circ) - \cos(\varphi + 30^\circ)] = \\ &= U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}}. \end{aligned}$$

Разделив эти уравнения одно на другое, можем определить тангенс угла сдвига фаз между токами и напряжениями

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1}$$

Эта формула для определения сдвига фаз применима лишь при синусоидальных токах и полной симметрии токов и напряжений.

Как видно из вышеприведенных уравнений, показания обоих ваттметров при равномерной нагрузке будут одинаковы в случае чисто активной нагрузки, когда сдвиг фаз между напряжением и током в фазах равен нулю ($\varphi=0$).

При индуктивной нагрузке, когда $\varphi=60^\circ$, показания первого ваттметра будут равны нулю, так как $\cos(\varphi+30^\circ)=\cos 90^\circ=0$, а суммарная мощность трехфазной цепи будет определяться показаниями второго ваттметра.

При индуктивной нагрузке, когда $\varphi>60^\circ$, угол $(\varphi+30^\circ)$ будет больше 90° и показание первого ваттметра становится отрицательным.

Так как отклонение подвижной системы ваттметра происходит только в одну сторону (вправо), то одну из обмоток в этом случае надо переключить (поменять ее концы местами).

После этого активная мощность трехфазной цепи определяется разностью показаний обоих ваттметров:

$$P = P_2 - P_1$$

и

$$\lg \varphi = \sqrt{3} \frac{P_2 + P_1}{P_2 - P_1}$$

Таким образом, в самом общем случае суммарная активная мощность трехфазной цепи определяется алгебраической суммой показаний ваттметров, а показания двухэлементного счетчика соответствуют активной энергии, потребляемой в трехпроводной цепи трехфазного тока.

Для измерения активной мощности и энергии в четырехпроводных системах трехфазного тока метод двух приборов не пригоден, так как он не учитывает часть мощности и энергии, потребляемой в данном случае однофазным приемником, включаемым между второй фазой и нулевым проводом, потому что для четырехпроводной системы

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_0 = 0$$

или

$$i_2 \neq (-i_1 - i_3).$$

Поэтому измерение мощности в четырехпроводных цепях требует применения трех приборов (ваттметров или трехэлементного счетчика), включаемых в цепь фазных токов и фазных напряжений.

Для измерения энергии в трехфазных четырехпроводных системах применяют трехэлементные счетчики индукционной системы типа СА4. Эти счетчики состоят из трех одинаковых магнитных систем с обмотками тока и напряжения, помещен-

ных в общий корпус и действующих на одну подвижную часть с двумя или тремя дисками.

Для измерения реактивной энергии в трех- и четырехпроводных системах применяют соответственно счетчики: двухэлементные, двухдисковые типа СРЗ и трехэлементные двух или трехдисковые типа СР4, соединяемые по специальным схемам.

На рис. 9.11, а показана схема включения трехэлементного счетчика для измерения расхода активной энергии в четырехпроводных трехфазных системах. На рис. 9.11, б представлена одна из схем включения трехэлементного счетчика для измерения расхода реактивной энергии.

Расход энергии в цепях постоянного тока измеряется счетчиком электродинамической системы.

Лабораторные ваттметры электродинамической системы часто выполняются многопредельными, например на 2,5 и 5 а, на 30, 150 и 300 в.

В этом случае шкала делится, например, на 150 делений и отсчет показаний требует вычисления цены деления

$$^{\circ}с = \frac{U_n I_n}{a_m},$$

где U_n — номинальное напряжение выбранного предела измерения ваттметра;

I_n — номинальный ток;

a_m — число делений всей шкалы.

Если на шкале ваттметра обозначена единица измерения, например W , то шкала проградуирована непосредственно в этих единицах, т. е. в ваттах. Если на шкале указано назначение прибора, например «ваттметр», то измеряемая величина P должна определяться как произведение цены деления $^{\circ}с$ на указанное стрелкой количество делений a , т. е.

$$P = ^{\circ}с a.$$

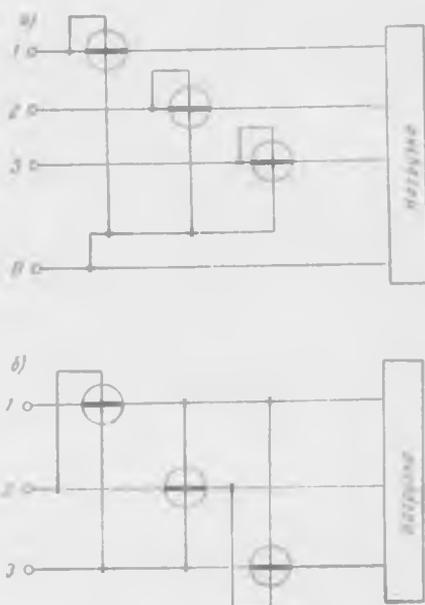


Рис. 9.11

Мощность постоянного тока может быть измерена электродинамическим ваттметром или найдена как произведение показаний амперметра и вольтметра.

На рис. 9.12 показана схема включения двухэлементного счетчика в трехпроводную систему трехфазного тока через измерительные трансформаторы. Показание счетчика S_{Σ} при

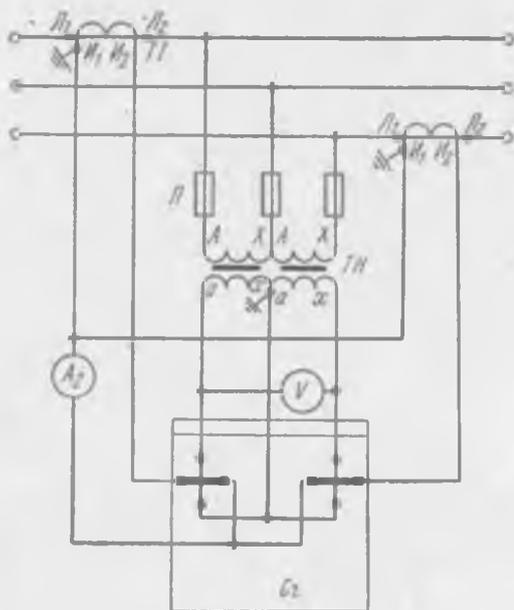


Рис. 9.12

этом умножается на коэффициенты трансформации трансформатора тока $ТТ$ и трансформатора напряжения $ТН$, который включается через предохранители $П$.

Задачи. 9.5. Для проверки счетчика применен ваттметр с номинальным напряжением 300 в, номинальным током 5 а и шкалой, разбитой на 150 делений. Этот ваттметр показывает 99 делений шкалы. С помощью секундомера отсчитана длительность 30 оборотов диска счетчика, которая составила 59 сек. Передаточное число счетчика 1800 оборотов диска на 1 квт·ч.

Определить погрешность счетчика.
Решение. Постоянная счетчика

$$C = \frac{3600 \cdot 1000}{n_0} = \frac{3600 \cdot 1000}{1800} = 2000 \frac{\text{вт сек}}{1 \text{ об. диска}}$$

Цена деления ваттметра

$$c_c = \frac{U_m \cdot I_m}{a_m} = \frac{300 \cdot 5}{150} = 10 \frac{\text{вт}}{\text{дел}}$$

Мощность по ваттметру

$$P = \cos \alpha = 10 \cdot 99 = 990 \text{ вт.}$$

Погрешность счетчика

$$\Pi_0 = \frac{C_{\Pi} - P_I}{P_I} 100 = \frac{2000 \cdot 30 - 990 \cdot 59}{990 \cdot 59} 100 = 2,76\%.$$

9.6. Передаточное число счетчика 1200 оборотов диска на 1 квт·ч. Какова его постоянная?

$$\text{Ответ: } 3000 \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{1 \text{ об} \cdot \text{диска}}$$

9.7. Постоянная счетчика 2000 $\frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{1 \text{ об}}$ 30 оборотов диска счетчика длится 60 сек.
Какова мощность нагрузки?

$$\text{Ответ: } 1 \text{ квт.}$$

9.8. Шкала ваттметра содержит 150 делений, и он включен так, что его номинальное напряжение составляет 150 в, а номинальный ток 2,5 а. Какова мощность нагрузки, если стрелка ваттметра показывает 70 делений шкалы?

$$\text{Ответ: } 175 \text{ вт.}$$

Вопросы для самопроверки

- Как устроен счетчик?
- От чего зависит вращающий момент счетчика?
- Что в счетчике является мерой учтенной энергии?
- Что такое передаточное число?
- Что такое постоянная счетчика?
- Как выражается относительная погрешность счетчика?
- Как включаются измерительные трансформаторы?
- В чем причина погрешностей трансформатора тока?
- В каком режиме должен работать трансформатор тока?
- Почему нельзя размыкать вторичную обмотку трансформатора тока под нагрузкой?
- В чем причина погрешностей трансформатора напряжения?
- Как измеряются большие постоянные токи?
- Как расширяются пределы измерения на постоянном токе?
- Как расширяются пределы измерения на переменном токе?
- Покажите схему включения однофазного счетчика
- Как измеряется мощность в трехпроводных трехфазных системах?
- Докажите, что схема двух ваттметров измеряет мощность трехфазной системы.
- Как определить тангенс угла сдвига фаз трехфазной системы по показаниям двух ваттметров?
- Почему метод двух ваттметров не пригоден в четырехпроводной системе?
- Покажите схему счетчика для четырехпроводной системы.
- Как определяется цена деления шкалы прибора?
- Покажите схему включения двухэлементного счетчика через измерительные трансформаторы. Как при этом определяется расход энергии?

§ 9.18. Измерение частоты

Измерение промышленной частоты, которая обычно близка к 50 гц, осуществляется стрелочными или вибрационными частотомерами (герцметрами). Стрелочный частотомер в основном представляет собой логометр переменного тока, который сравнивает ток через конденсатор с током через сопротивление (например, при повышении частоты ток через емкость увеличится); шкала логометра градуируется непосредственно в герцах.

Вибрационный частотомер состоит из набора стальных язычков или вибраторов. Интервал частот от 45 до 55 гц разбивается на 20 ступенек, а язычки механически настраивают на каждую из этих частот. Если возбудить этот комплект язычков измеряемой частотой, то один из язычков (оказавшийся в резонансе) начнет вибрировать и этим укажет измеряемую частоту.

§ 9.19. Регистрирующие приборы

Регистрирующие приборы можно условно разделить на три группы: низкой частоты, промышленной частоты и высокой частоты. Первые записывают текущие значения величин, меняющихся с частотой от 5 гц и ниже (например, регистрирующий вольтметр на электростанции); вторые — это вибраторные или светолучевые осциллографы для регистрации процессов, протекающих с частотой от 5000 гц и ниже. Эти осциллографы чаще всего используются в цепях промышленной частоты (50 гц) для исследования переходных процессов. Приборы высокой частоты — это электронные осциллографы для регистрации явлений с частотой от 10^9 гц и меньше.

Приборы низкой частоты принято называть с а м о п и ш у щ и м и. Их можно подразделить на два типа: приборы, в которых запись связана с трением пера по бумаге, что требует от измерительного механизма повышенного вращающего момента; приборы, в которых запись осуществляется без трения. Примером последних может служить милливольтметр для точечной регистрации э.д.с. термопары, в котором стрелка периодически прижимается к бумаге, оставляя на ней точку.

Световой луч светолучевого осциллографа гораздо ярче луча электронного осциллографа, что является весьма существенным для удобства фотографирования. Поэтому в технике промышленной частоты в основном пользуются светолучевым, а не электронным осциллографом.

От светолучевого осциллографа требуется неискаженная запись кривых тока, напряжения и мощности, которые в общем случае могут быть несинусоидальными, т. е. содержать

колебания разных частот. Его основной частью является вибратор, который обычно выполняется в виде тугонатянутой проволоочной петли, помещенной в магнитное поле. Измеряемый ток, проходя по петле, вызывает ее колебания, которые световым лучом экспонируют движущуюся фотопленку.

Основной частью электронных осциллографов является электроннолучевая трубка (рис. 9.13), состоящая из электронной пушки (катод K и анод A) и устройства, отклоняющего электронный луч. Это устройство чаще всего состоит из двух конденсаторов. К пластинам Π_1 одного из них прикладывается измеряемое напряжение, которое вызывает отклонение

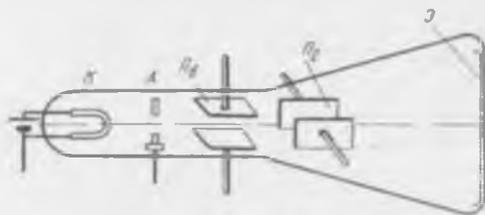


Рис. 9.13

луча по вертикали. К пластинам Π_2 второго конденсатора прикладывается вспомогательное напряжение, которое вызывает перемещение луча по горизонтали или, другими словами, осуществляет развертку изображения на экране \mathcal{E} во времени. Это вспомогательное напряжение обычно имеет пилообразную форму и может быть периодическим или импульсным. Периодическое напряжение развертки позволяет наблюдать на экране «неподвижное» изображение периодических процессов. Импульсное напряжение развертки применяется для фотографирования импульсных явлений.

§ 9.20. Измерение сопротивлений

Простейшими приборами для измерения сопротивлений являются омметры (рис. 9.14,а). Это компактный прибор, состоящий из батареи от карманного фонаря B , миллиамперметра и балластного сопротивления r_6 . При постоянстве напряжения батареи ток в цепи зависел бы только от измеряемого сопротивления r_x , в величинах которого градуируется шкала миллиамперметра. Нестабильность напряжения батареи вызывает погрешности измерения сопротивлений омметром.

На рис. 9.14,б показана схема мегомметра с логометрическим показывающим прибором \mathcal{L} для измерения сопротивления изоляции R_x . В § 9.12 отмечалось, что показание логометров определяется отношением токов I_1 и I_2 и поэтому не за-

висит от напряжения и скорости вращения ручки генератора (ген.), питающего этот переносный прибор.

Для измерения с большей точностью пользуются мостами и методом амперметра-вольтметра по закону Ома.

Одинарные мосты постоянного тока наиболее целесообразно применять для измерения сопротивлений примерно от 4 до 50 000 ом; они характеризуются своей чувствительностью:

$$S_m = \frac{dI_r}{dr_x},$$

где I_r — ток через нулевой гальванометр;

r_x — измеряемое сопротивление в уравновешенном мосте.



Рис. 9.14

Чувствительность часто определяют при изменении r_x на 1 %.

Измерение сопротивлений, меньших, чем примерно 4 ома, производится двойными мостами с включением измеряемого сопротивления четырьмя (а не двумя) зажимами.

§ 9.21. Электрические измерения неэлектрических величин

Электрические методы измерения неэлектрических величин в большинстве случаев удобнее неэлектрических методов. Для иллюстрации этого можно в качестве примера сравнить измерение температуры ртутным термометром и электрическим пирометром, состоящим из термопары и милливольтметра. Отсчет показания по шкале милливольтметра удобнее, чем по шкале ртутного термометра; электрический пирометр позволяет регулировать его чувствительность и отличается меньшей инерционностью, т. е. позволяет фиксировать быстроменяющиеся температуры. Показание пирометра проще

передать на расстояние (дистанционное измерение, телеизмерение) и автоматически регистрировать, чем показание ртутного термометра. Электрические величины удобнее для математической обработки результатов измерения, централизованного сбора информации (диспетчерские пункты), управления производственным процессом.

Одной из основных частей устройств для электрического измерения неэлектрических величин является измерительный преобразователь или датчик, преобразующий измеряемую величину в электрическую (например, упоминавшаяся уже термомпара, которая преобразует измеряемую разность температур в пропорциональную ей э. д. с.).

Такие преобразователи, основанные на разнообразных физических явлениях, разработаны для почти всех неэлектрических величин.

Кроме термомпары, электрические датчики температуры можно образовать на реостатном, оптическом и других принципах. Нагрев реостатного датчика (термометра сопротивления) вызывает изменение его сопротивления по закону

$$r_{гор} = r_{хол} [1 + \alpha (t_{гор} - t_{хол})],$$

где $r_{гор}$ — сопротивление датчика в нагретом состоянии;

$r_{хол}$ — сопротивление датчика при низкой температуре (например, 20°);

α — температурный коэффициент изменения сопротивления;

$t_{хол}$ — температура холодного состояния (например, 20°);

$t_{гор}$ — искомая температура нагрева.

Прибор, измеряющий сопротивление $r_{гор}$, может быть градуирован непосредственно в величинах $t_{гор}$. Термометром сопротивления может явиться проволочная спираль, обмотка электрической машины, полупроводниковый термистор. Оптический пирометр позволяет измерять температуры нагретых тел по цвету или яркости их излучения. Датчики для измерения неэлектрических величин являются входными элементами устройств автоматизации производственных процессов.

Различают датчики параметрические, в которых изменяется величина сопротивления, индуктивности или емкости, и генераторные, в которых возникает напряжение.

Примером параметрического датчика температуры является упоминавшийся уже термометр сопротивления, а примером генераторного датчика может служить термомпара.

Датчики характеризуются своей чувствительностью

$$S = \frac{dy}{dx}.$$

где y — выходная величина (функция), например термоэлектродвижущая сила термопары;

x — входная величина (аргумент), в данном примере — измеряемая температура.

Для измерения усилий, деформаций и малых перемещений пользуются тензомерами — плоскими проволочными спиральями, сопротивление которых зависит от их сжатия или растяжения. Тензомеры размещают так, чтобы подвергнуть их сжатию измеряемым усилием или растяжению в соответствии с исследуемой деформацией и по изменению их сопротивления определяют искомые величины.

Для тех же целей пользуются индуктивным датчиком, т. е. катушкой на стальном сердечнике с воздушным зазором. Измеряемая величина (например, вес или сила) меняет зазор, а значит, и индуктивность катушки. Прибор, измеряющий эту индуктивность, может быть проградуирован в единицах измеряемой величины.

К параметрическим датчикам относятся также и ионизационные, у которых интенсивность проникающего излучения зависит от свойств исследуемой среды или толщины полуфабриката. Так, измеряя интенсивность излучения, прошедшего сквозь движущуюся резиновую ленту, можно непрерывно контролировать толщину ее бесконтактным методом.

К генераторным датчикам, кроме термопары, относятся индукционные датчики, пьезокристаллы, датчики Холла, фотоэлементы, электрохимические датчики и др.

В индукционных датчиках индуцируется напряжение, как это имеет место в тахогенераторе, т. е. во вращающейся микромашине постоянного или переменного тока, которая преобразует скорость вращения в э. д. с.

При сжатии пьезокристалла (например, кварца) вдоль одной из его осей на концах другой оси возникают электрические заряды. Такие пьезодатчики служат для преобразования переменных усилий в напряжения. Датчики Холла — это статические (без подвижных частей) полупроводниковые преобразователи магнитного потока в э. д. с.

В электрохимических датчиках возникает э. д. с., зависящая от химического состава входящих в них веществ, которая позволяет производить количественный химанализ.

§ 9.22. Условные обозначения измерительных приборов

На рис. 9.15 приведены условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы и вспомогательные части: 1 — магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой; 2 — магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками; 3 — магнитоэлектрический прибор с

подвижным магнитом; 4 — магнито-электрический логометр с подвижным магнитом; 5 — электромагнитный прибор; 6 — электромагнитный логометр; 7 — электромагнитный поляризованный прибор; 8 — электродинамический прибор; 9 — электродинамический логометр; 10 — ферродинамический прибор; 11 — ферродинамический логометр; 12 — индукционный прибор; 13 — индукционный логометр; 14 — магнитоиндукционный прибор; 15 — электростатический прибор; 16 — вибрационный прибор (язычковый); 17 — тепловой прибор (с нагреваемой проволокой); 18 — биметаллический прибор; 19 — термопреобразователь изолированный; 20 — термопреобразователь неизолированный; 21 — выпрямитель полупроводниковый; 22 — выпрямитель электромеханический; 23 — электронный преобразователь; 24 — преобразователь вибрационно-импульсный; 25 — компенсационный преобразователь; 26 — термоэлектрический прибор (с изолированным преобразователем и магнитоэлектрическим измерительным механизмом); 27 — выпрямительный прибор (с полупроводниковым выпрямителем и измерительным механизмом с подвижным магнитом); 28 — электронный прибор с электростатическим измерительным механизмом; 29 — вибрационно-импульсный прибор с магнитоэлектрическим измерительным механизмом; 30 — защита от внешних магнитных полей (I категория защищенности); 31 — защита от внешних электрических полей (I категория защищенности); 32 — значение частоты f_k , до которой напряженность испытательного магнитного поля равна 400 ав/м (например, $f_k=600$ гц).

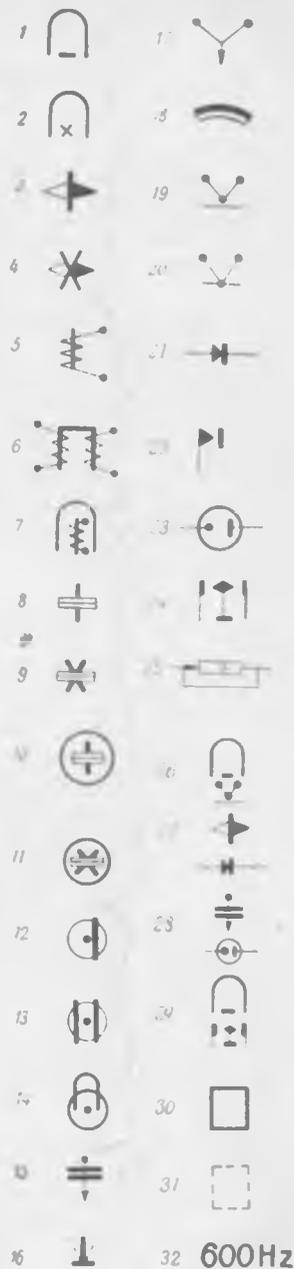


Рис. 9.15

В приложении 6 приведены условные обозначения измерительных приборов и их частей на схемах.

Вопросы для самопроверки

- Какими приборами измеряется промышленная частота?
- Как подразделяются регистрирующие приборы?
- В чем преимущество светолучевого осциллографа перед электронным?
- Каковы основные части светолучевого и электронного осциллографов?
- Чем проще всего измерить сопротивление?
- Как выражается чувствительность мостов?
- Чем измеряются малые сопротивления?
- В чем преимущества электрических методов измерения перед неэлектрическими?
- Как подразделяются датчики?
- Как выражается чувствительность датчиков?
- Приведите примеры датчиков.
- Как обозначается электромагнитный прибор?

ГЛАВА 10

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

§ 10.1. Общие сведения

Асинхронные машины применяются главным образом в качестве двигателей. Из общего количества электрических двигателей, эксплуатируемых в народном хозяйстве, на асинхронные приходится около 95%. Поэтому в настоящей главе основное внимание уделяется трехфазному асинхронному двигателю. Имеют практическое значение и некоторые другие режимы работы асинхронных машин.

Первый асинхронный двигатель трехфазного тока был построен в 1889 г. М. О. Доливо-Добровольским. В 1891 г. этот двигатель демонстрировался на промышленной выставке во Франкфурте-на-Майне. Простота конструкции и небольшая стоимость, хорошие эксплуатационные показатели асинхронного двигателя явились толчком к переводу электроснабжения на систему трехфазного переменного тока. Раньше основное применение имел постоянный ток. Переход на переменный ток давал также возможность благоприятного решения назревшей к тому времени задачи осуществления дальних передач электроэнергии. В основе работы асинхронного двигателя лежит вращающееся магнитное поле, образуемое трехфазным (в общем случае многофазным) переменным током.

§ 10.2. Устройство трехфазного асинхронного двигателя

Двигатель состоит из магнитопровода, или магнитной цепи, обмоток и механических частей. Неподвижную часть двигателя называют статором, вращающуюся часть — ротором. Магнитопровод, обмотки и механические части размещаются как на статоре, так и на роторе.

Магнитная цепь. Магнитная цепь предназначена для размещения главного магнитного поля двигателя. Она состоит

из стальных сердечников статора и ротора и воздушного зазора между ними, которые образуют замкнутый путь для магнитного потока. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечники собираются из штампованных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаковым покрытием.

Собранный сердечник статора 1 (рис. 10.1) имеет вид полого цилиндра с пазами на внутренней поверхности для укладки обмотки. Он крепится в корпусе двигателя. Сердечник ротора 2 имеет форму цилиндра с центральным отверстием для вала и с пазами для обмотки на внешней поверхности. Он



Рис. 10.1

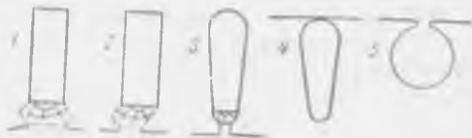


Рис. 10.2

крепится на валу и размещается внутри сердечника статора. Воздушный зазор между ними является частью магнитной цепи. Так как воздух обладает значительно большим магнитным сопротивлением, чем сталь, то воздушный зазор стремятся делать как можно меньшим. Чем меньше зазор, тем легче получить хорошие характеристики двигателя. Однако он должен быть достаточным, для того чтобы вращающийся ротор не задевал за статор. У современных машин зазор составляет 0,25—1,5 мм. Большие значения зазора принимаются для крупных двигателей.

Размеры сердечников статора и ротора, как и в целом двигателя, определяются в основном номинальными параметрами двигателя. Общий вид магнитопровода в сечении приведен на рис. 10.1. Формы пазов статора 1, 2, 3 и ротора 4 и 5 даны на рис. 10.2. Для крепления обмотки в открытых или частично открытых пазах применяются клинья из дерева или пластмассы.

Обмотки статора и ротора. Обмотка статора питается трехфазным переменным током и служит для создания вращающегося магнитного поля. Она должна обеспечить наибольший поток при возможно меньшей намагничивающей силе, распределение индукции поля в зазоре должно быть по возможности синусоидальным. Эти и некоторые другие требования

определяют конструкцию обмотки статора, которая состоит из трех отдельных одинаковых фазных обмоток, пространственно смещенных друг относительно друга по окружности статора. Основным элементом каждой из них является секция (рис. 10.3), которая может быть многovitковой и одновитковой. Количество секций в фазных обмотках одинаково.

Секции своими активными сторонами (участки ab и cd) укладываются в пазы. Если в каждом пазу укладывается только одна сторона одной секции, то такую обмотку называют однослойной. При этом общее число секций вдвое меньше числа пазов, так как каждая секция занимает два паза. Если же в пазу укладываются активные стороны двух



Рис. 10.3

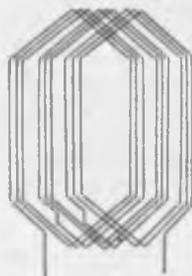


Рис. 10.4

секций (в два слоя), то обмотка называется двухслойной. Общее число секций такой обмотки равно числу пазов статора. Те части секций, которые по торцам сердечника оказываются вне паза (участка ac и bd), называются лобовыми. Для того чтобы лобовые части обмоток статора не задевали за вращающийся ротор, их отгибают на сторону и для придания жесткости скрепляют между собой.

Секции, принадлежащие одной фазе и уложенные в соседних пазах, образуют катушечную группу (рис. 10.4). Число секций в катушечной группе бывает различным, обычно не более пяти. Количество катушечных групп фазной обмотки определяет число пар полюсов p магнитного поля статора. Секции в пределах каждой катушечной группы соединяются друг с другом последовательно. Катушечные группы, из которых составляется фазная обмотка, соединяются как последовательно, так и параллельно. На рис. 10.5, а представлена развернутая схема однослойной обмотки четырехполюсного статора ($p=2$) с последовательным, а на рис. 10.5, б с параллельным соединением катушечных групп.

Вращающееся поле воздействует на обмотку статора. Вследствие электромагнитной индукции в каждом ее проводнике и в

каждой фазной обмотке индуцируется переменная э. д. с. За время поворота поля на угол, соответствующий двум полюсам статора, э. д. с. в обмотках совершает полный цикл своих изменений. Это соответствует времени периода T или изменению фазы э. д. с. на угол $\alpha = 360^\circ$. Поворот же поля в простран-

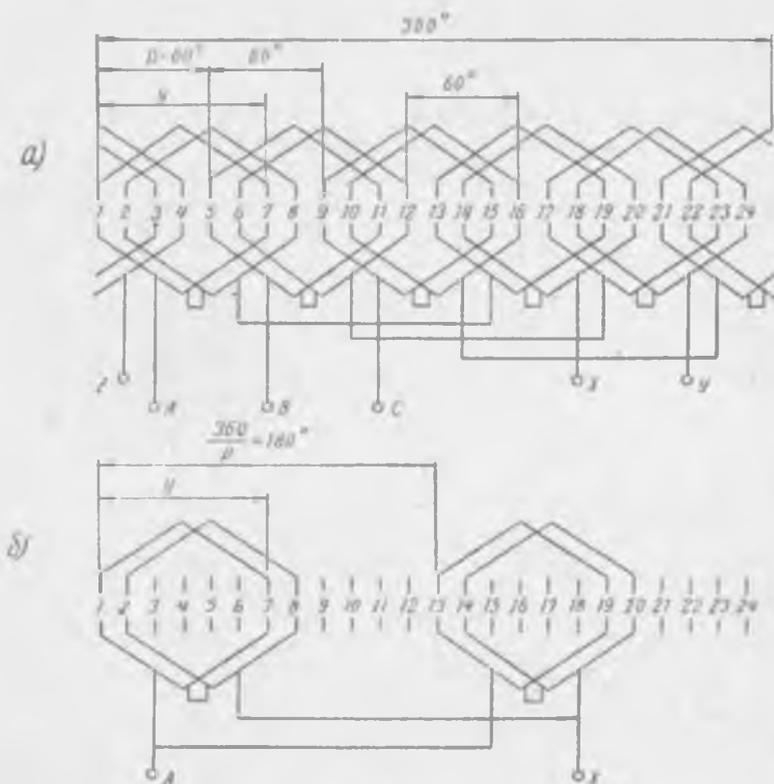


Рис. 105

стве за время T составит лишь угол $\beta = \frac{360^\circ}{p}$, где p — число пар полюсов статора.

Отсюда вытекает, что при пространственном смещении обмоток по окружности статора на некоторый угол β э. д. с. их будут иметь фазовый сдвиг на угол $\alpha = \beta \cdot p$. Таким образом, геометрическому углу β (смещение обмоток) соответствует в p раз больший электрический угол α (сдвиг фаз) и наоборот.

Так как в симметричной трехфазной системе напряжения и э. д. с. фаз смещены по фазе на угол $\alpha = 120^\circ$, то для этого

необходимо, чтобы фазные обмотки были смещены пространственно по окружности статора на угол $\beta = \frac{\alpha}{p} = \frac{120^\circ}{p}$.

Это означает, что каждому проводнику (секции, катушечной группе) первой фазной обмотки должен соответствовать аналогичный проводник (секция, катушечная группа) второй обмотки, смещенный по окружности статора на угол $\beta = \frac{120^\circ}{p}$.

Точно также третьей — по отношению ко второй (см. рис. 10.5). Такое пространственное смещение фазных обмоток является обязательным при выполнении обмотки статора. Поскольку двигатели изготавливаются с различным числом пар полюсов p , то при выполнении обмоток статора применяют соответственно различное пространственное смещение фазных обмоток. Однако фазные обмотки оказываются при этом в равных условиях по отношению к магнитопроводу, они представляют симметричную систему.

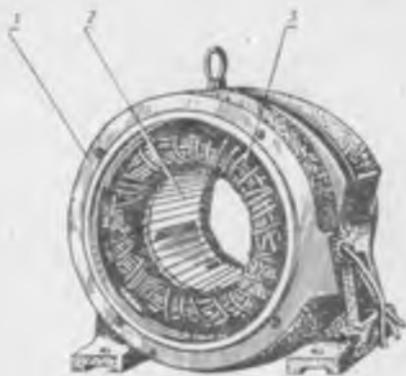


Рис. 10.6

Фазовый сдвиг между их э. д. с. будет равен углу

$$\alpha = \beta p = \frac{120}{p} p = 120^\circ.$$

Расстояние между активными сторонами одной секции называется шагом обмотки. Шаг обмотки, выраженный числом пазов, $y \leq \frac{Z}{2p}$, где Z — общее число пазов статора.

При $y = \frac{Z}{2p}$ шаг называется диаметральной, при $y < \frac{Z}{2p}$ — укороченным. На рис. 10.5 дана схема обмотки с диаметральной шагом

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6.$$

Обмотка статора изготавливается из изолированного медного или алюминиевого провода. Статор в собранном виде показан на рис. 10.6 (1 — станина; 2 — сердечник; 3 — обмотка).

Обмотка ротора бывает двух видов. В зависимости от ее

вида асинхронные двигатели разделяются на два основных типа — короткозамкнутые и с контактными кольцами.

У короткозамкнутых двигателей обмотка ротора имеет вид беличьей клетки (рис. 10.7). Медные или алюминиевые изолированные стержни укладываются в пазах сердечника. По

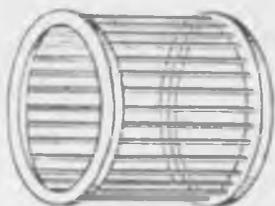


Рис. 10.7

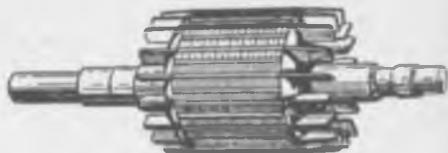


Рис. 10.8

торцам ротора с обеих сторон стержни соединяются между собой замыкающими кольцами. Выводов такая обмотка не имеет, она замкнута сама на себя. При изготовлении ее из алюминия собранный сердечник ротора размещается в литейной форме, которая заливается расплавленным металлом. Заодно со стержнями отливают замыкающие кольца и часто в виде выступающих приливов на них вентиляционные лопатки, которые необходимы для охлаждения работающего двига-

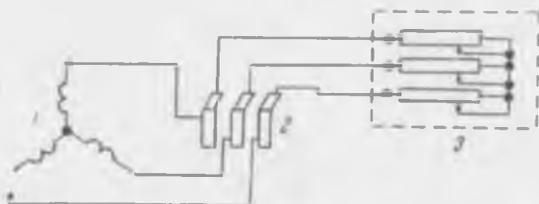


Рис. 10.9

теля (рис. 10.8). Из-за простой конструкции ротора короткозамкнутый асинхронный двигатель является наиболее распространенным.

Ротор с контактными кольцами называется еще фазным. Его обмотка выполняется по типу статорной, т. е. она состоит также из трех отдельных фазных обмоток из изолированного обмоточного провода, смещенных друг относительно друга по окружности ротора на угол $\beta = \frac{120^\circ}{p}$.

Фазные обмотки 1 соединяются обычно в звезду без вывода нулевой точки, вторые их концы присоединяются к трем контактными кольцами 2 на валу (рис. 10.9). Контактные коль-

ца делаются из стали или меди, они изолируются друг от друга и от вала. Через щетки, закрепленные неподвижно, обмотка такого ротора на время пуска замыкается на пусковой реостат 3. С разгоном двигателя пусковой реостат выводится и в рабочем режиме обмотка ротора 1 оказывается замкнутой сама на себя. В этом случае он подобен короткозамкнутому. Иногда такой двигатель имеет приспособление, с помощью которого после пуска контактные кольца 2 замыкаются между собой, а щетки приподнимаются.

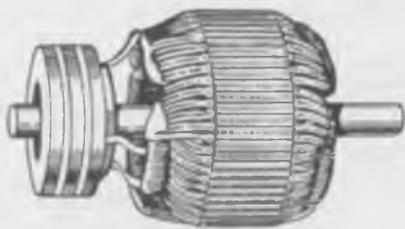


Рис. 10.10

Общий вид собранного ротора с контактными кольцами показан на рис. 10.10. Двигатель с контактными кольцами сложнее короткозамкнутого, стоимость его примерно на 20—30% выше. Применяется он реже

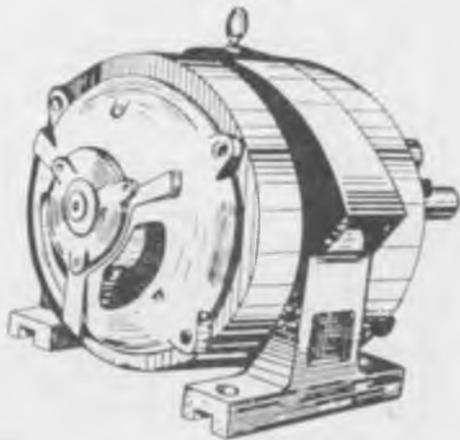


Рис. 10.11

Механические части. К механическим частям относятся корпус, подшипниковые щиты, вал и другие детали, которые необходимы для сборки и монтажа двигателя, для защиты от механических повреждений и т. п.

Внутри корпуса размещается сердечник статора с обмотками, по торцам к нему крепятся подшипниковые щиты, являющиеся несущими конструкциями для вала ротора. Корпус и щиты отливаются из чугуна или стали. Для двигателей

небольших мощностей их отливают из алюминиевого сплава. Очень крупные двигатели снабжаются фундаментной плитой с отдельными стойками для подшипников вала. Форма корпуса и щитов в значительной мере определяется условиями работы, для которых предназначается двигатель.

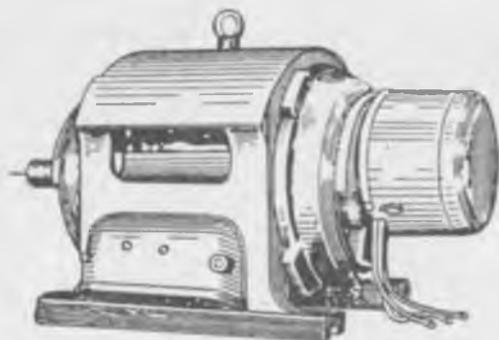


Рис. 10.12

Общий вид короткозамкнутого асинхронного двигателя приведен на рис. 10.11, а двигателя с контактными кольцами — на рис. 10.12.

§ 10.3. Схемы соединений обмоток статора. Разметка выводов

Начала фазных обмоток обозначаются $C1$, $C2$, $C3$; концы — $C4$, $C5$, $C6$. Для включения двигателя в сеть обмотки статора соединяются в звезду или треугольник. Вопрос о схеме решается в зависимости от линейного напряжения сети и номинального фазного напряжения обмоток статора. Указания об этом приводятся в паспорте двигателя. При схеме звезда все три конца фазных обмоток $C4$, $C5$, $C6$ соединяются в нулевую точку, при схеме треугольника соединяются между собой попарно начала и концы соседних фаз: $C1-C6$, $C2-C4$, $C3-C5$. Сеть присоединяется в первом случае к трем началам $C1$, $C2$, $C3$, во втором — к общим точкам $C1-C6$, $C2-C4$, $C3-C5$.

Понятия «начало» и «конец» фазных обмоток условны, однако они необходимы для правильного соединения обмоток в схеме. Для одной из фазных обмоток можно произвольно выбрать ее начало ($C1$), но после этого для двух других за начала следует принимать такие их выводы, идя от которых обмотки наматываются в том же, что и первая, направлениях. У собранного двигателя установить таким образом одноименность выводов практически невозможно. При отсутствии обо-

значений выводов статора для их разметки можно воспользоваться опытом. Один из таких опытов состоит в следующем.

Если две обмотки статора соединить последовательно, то возможны два варианта включения — согласное, когда соединены начало и конец (рис. 10.13, а), и встречное, когда обмотки соединены своими концами или началами (рис. 10.13, б). Результирующий магнитный поток обеих обмоток $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ будет по-разному ориентирован относительно третьей обмотки. В первом случае она будет пронизываться результирующим потоком, который индуцирует в ней э.д.с. Вольтметр на

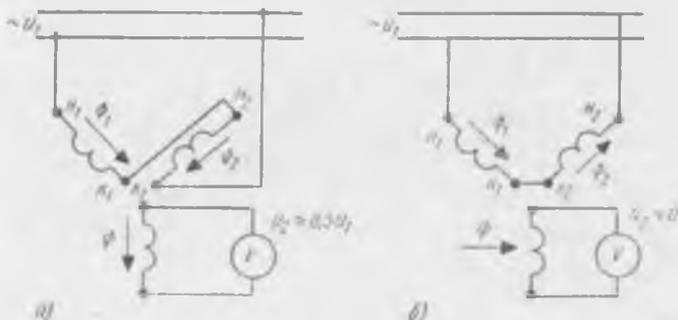


Рис. 10.13

ее зажимах измерит напряжение U_2 , равное примерно половине подведенного U_1 . Во втором случае результирующий поток замкнется в плоскости третьей обмотки — вольтметр покажет нуль.

Таким образом, по показаниям вольтметра устанавливаются одноименные зажимы первых двух обмоток. После разметки одна из них меняется местом с третьей и опыт повторяется для определения одноименных зажимов третьей обмотки. При проведении опыта следует пользоваться пониженным напряжением ($U_1 \approx 0,3 U_{ном}$).

Вопросы для самопроверки

Как выполняется магнитопровод асинхронного двигателя?

Принцип выполнения обмотки статора асинхронного двигателя.

Понятие об электрическом угле. Соотношение между электрическим и геометрическим углами.

Как выполняется обмотка ротора короткозамкнутого двигателя?

Устройство обмотки ротора двигателя с контактными кольцами.

Какие механические детали используются для сборки и монтажа асинхронного двигателя?

Как выбирается схема соединений обмоток статора и как установить одноименные выводы фазных обмоток статора?

§ 10.4. Принцип действия асинхронного двигателя

Фазные обмотки статора смещены друг относительно друга на угол $\beta = \frac{120}{p}$, что соответствует 120 электрическим градусам. При включении в питающую сеть трехфазный ток в них создает вращающееся магнитное поле (см. § 5.5).

Скорость вращения поля определяется частотой переменного тока и числом пар полюсов статора p . За один период переменного тока T магнитное поле поворачивается на 360

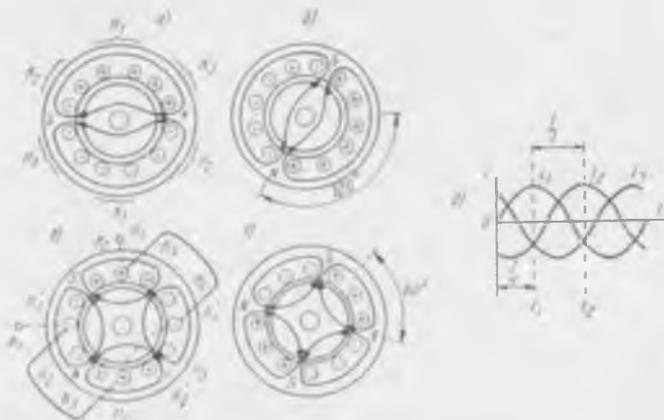


Рис. 10.14

электрических градусов. Так как окружность статора соответствует $p \cdot 360$ электрическим градусам, то один полный оборот поле статора совершает за время pT секунд. Следовательно, число оборотов за минуту, или скорость вращения магнитного поля статора, равны

$$n_1 = \frac{60}{T \cdot p} = \frac{f_1 60}{p}, \quad (10.1)$$

где f_1 — частота тока питающей сети.

Число пар полюсов статора зависит от конструкции его обмотки. На рис. 10.14, а изображен в сечении двухполюсный статор ($p=1$). Каждая из его фазных обмоток состоит из одной катушечной группы из двух секций и занимает 4 паза.

Распределение обмоток по пазам указано обозначениями H_1-K_1 , H_2-K_2 , H_3-K_3 , где H — относится к начальным, а K — конечным сторонам секций. Фазные обмотки смещены пространственно на угол $\beta = 120^\circ$, что при $p=1$ соответствует $\alpha = \beta \cdot p = 120$ электрическим градусам.

На рис. 10.14, в показан четырехполюсный статор ($p=2$). Его фазные обмотки выполнены иначе. Каждая из них имеет две катушечные группы (по одной секции в группе). Пространственно они смещены на угол $\beta=60^\circ$ и по-прежнему на $\alpha=\beta \cdot p=60 \cdot 2=120$ электрических градусов. Конечная сторона первой катушки обозначена K_1' ; начальная второй — H_1' . Для первой фазы показана также схема соединений. В сечениях проводников (см. рис. 10.14, а, в) даны направления токов в момент времени $t_1=\frac{T}{4}$ (рис. 10.14, д). За положительное принято направление тока от начала к концу.

На рис. 10.14, б, г указаны направления токов и положение полюсов статора для момента времени $t_2=\frac{T}{4}+\frac{T}{3}$.

Сравнение рис. 10.14, а и 10.14, в показывает, что число пар полюсов статора зависит от конструкции обмотки. Из сравнения рис. 10.14 (а, б, в, г) следует зависимость скорости вращения поля от частоты и числа пар полюсов.

Так, в первом случае (см. рис. 10.14, а и б) за время $t_2 - t_1 = \frac{T}{3}$ поле совершает поворот на 120° , а во втором при $p=2$ (рис. 10.14, в и г) за то же время — лишь на 60° . Соответственно время полного оборота поля при $p=1$ будет равно периоду T , при $p=2 - 2T$.

Частота тока питающей сети обычно постоянна. Число пар полюсов статора для данной его конструкции является также постоянным. Поэтому скорость вращения магнитного поля есть величина постоянная. Ее называют синхронной скоростью. При стандартной частоте тока $f_1=50$ гц можно выполнить статор на следующие синхронные скорости:

p	1	2	3	4
n , об/мин	3000	1500	1000	750 и т. д.

Направление вращения магнитного поля определяется порядком следования фаз. Для того чтобы изменить направление вращения поля, необходимо поменять местами два из трех проводов питающей сети.

Вращающееся магнитное поле статора воздействует на обмотки статора и ротора, индуцирует в них э.д.с. Э.д.с. статора, являясь по своей природе э.д.с. самоиндукции, противодействует приложенному напряжению сети и ограничивает ток в обмотке статора. Ее роль аналогична роли э.д.с. первичной обмотки трансформатора. Э.д.с., индуцируемая в обмотке ротора, является э.д.с. взаимной индукции подобно вторичной э.д.с. трансформатора. При замкнутой цепи ротора (у короткозамкнутых двигателей цепь ротора всегда замкнута) она вызывает ток ротора. Последний, механически взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создает вращающую

ния скорости вращения при изменениях нагрузки. Он обладает жесткой механической характеристикой вида кривой 2.

Задачи. 10.1. Шестиполосный двигатель при номинальной нагрузке работает со скольжением $s=4\%$. Частота сети $f_1=50$ гц.

Определить скорость вращения двигателя.

Решение. Число пар полюсов $p = \frac{6}{2} = 3$; синхронная скорость

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Скорость вращения ротора

$$n_2 = n_1(1-s) = 1000(1-0,04) = 960 \text{ об/мин.}$$

10.2. Скорость вращения асинхронного двигателя при номинальной нагрузке составляет 2850 об/мин, при холостом ходе — 2940 об/мин.

Определить скольжение при нагрузке и холостом ходе; $f_1=50$ гц.

Решение. Синхронная скорость для данного двигателя $n_1 = 3000$ об/мин (ближайшая большая).

Скольжение при нагрузке

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 = \frac{3000 - 2850}{3000} \cdot 100 = 5\%$$

при холостом ходе

$$s = \frac{3000 - 2940}{3000} \cdot 100 = 2\%$$

Вопросы для самопроверки

От чего зависит скорость вращения магнитного поля? Чем определяется число пар полюсов двигателя?

Как создается вращающий момент асинхронного двигателя и почему ротор не может самостоятельно достичь синхронной скорости вращения?

Как определяется скольжение и скорость вращения ротора и как влияет на асинхронный двигатель изменение нагрузки на валу?

Что понимают под механической характеристикой двигателя и какого вида механическая характеристика свойственна асинхронному двигателю?

§ 10.5. Э. д. с. статора и ротора. Частота тока ротора

Вращающееся магнитное поле в каждой из обмоток статора и ротора индуцирует переменную э.д.с. За счет распределения обмотки по пазам (катушечная группа содержит несколько секций, размещаемых в соседних пазах), а также иногда за счет выбора шага (укороченный шаг) добиваются по возможности синусоидального распределения индукции магнитного поля в зазоре вдоль полюсного деления или зоны. Этим обеспечивается практически синусоидальная форма кривых э. д. с. в обмотках. При этом условный действующее значение э. д. с. обмоток статора и ротора можно выразить такой же формулой, как и э. д. с. обмоток трансформатора (см. § 8.2).

Следует учесть, однако, что вследствие распределения обмотки э. д. с. отдельных ее секций (на



Рис. 10.16

рис. 10.16 E' , E'' , E''') имеют различные фазы и их необходимо складывать векторно. Поэтому общая э. д. с. фазной обмотки будет меньше арифметической суммы э. д. с. отдельных секций.

Подобный эффект имеет место также при укороченном шаге. Для учета этого обстоятельства в формулу э.д.с. двигателя вводится обмоточный коэффициент k , который принимается меньшим или равным единице. Таким образом, э.д.с. фазной обмотки статора определяется формулой

$$E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 k_1 \Phi, \quad (10.4)$$

где f_1 — частота тока статора;

ω_1 — число витков фазной обмотки;

k_1 — обмоточный коэффициент статора ($k_1 = 0,9—0,95$);

Φ — магнитный поток вращающегося поля.

Аналогичной формулой определяется э.д.с. фазы ротора

$$E_2 = 4,44 f_2 \omega_2 k_2 \Phi, \quad (10.5)$$

где f_2 — частота тока ротора;

ω_2 — число витков фазы ротора;

k_2 — обмоточный коэффициент ротора.

В случае короткозамкнутого ротора $k_2 = 1$.

Магнитное поле, вращаясь в пространстве с синхронной скоростью n_1 , относительно вращающегося ротора имеет скорость

$$n_s = n_1 - n_2 \text{ об/мин.}$$

За каждый оборот поля относительно ротора фаза его э.д.с. изменяется на $p \cdot 360$ электрических градусов, что соответствует p полным периодам э.д.с. Количество периодов в секунду, т. е. частота э.д.с. ротора, при этом оказывается равной

$$f_2 = \frac{n_s p}{60}.$$

Учитывая (10.3) и (10.1), получим

$$f_2 = \frac{n_s p}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 \cdot s, \quad (10.6)$$

т. е. частота э.д.с. ротора, а следовательно, и величина э.д.с. E_2 (10.5) пропорциональны скольжению. Наибольшей частота ротора будет в начальный момент пуска, когда $s = 1$. При этом она равна частоте питающей сети f_1 . С разгоном двигателя убывает скольжение и уменьшается частота тока ротора. В рабочем режиме двигателя, питаемого током частотой $f_1 = 50$ гц, частота тока ротора составляет $1 \div 2$ гц. При $s = 1$, $f_2 = f_1$ и э.д.с. неподвижного ротора

$$E_{2н} = 4,44 f_1 \omega_2 k_2 \Phi. \quad (10.7)$$

Вводя $E_{2н}$ в формулу (10.5), э.д.с. вращающегося ротора можно записать так:

$$E_2 = E_{2н} \cdot s. \quad (10.8)$$

Э.д.с. E_2 , как и ее частота, с разгоном ротора уменьшается. Отношение э.д.с. статора E_1 (10.4) к э.д.с. неподвижного ротора $E_{2н}$ (10.7) называют коэффициентом трансформации э.д.с. асинхронного двигателя, который равен

$$\chi k_e = \frac{E_1}{E_{2н}} = \frac{\omega_1 k_1}{\omega_2 k_2}. \quad (10.9)$$

Э.д.с. статора и ротора E_1 и E_2 создаются главным вращающимся потоком, являющимся для них общим. Этот поток замыкается через воздушный зазор между статором и ротором. Помимо главного потока, каждая из обмоток создает



Рис. 10.17

поток, сцепляющийся лишь с ней самой. Этот поток называется потоком рассеяния. Последний замыкается через пазы (рис. 10.17), а также вокруг лобовых частей обмоток. Учитывая, что потоки рассеяния проходят в основном по воздуху, можно считать их пропорциональными токам в обмотках. Потоки рассеяния индуктируют в обмотках статора и ротора э.д.с. рассеяния E_{p1} и E_{p2} . Эти э.д.с. могут быть учтены как индуктивные падения напряжения в обмотках:

$$E_{p1} = -I_1 x_1 = -I_1 \omega L_1; \quad (10.10)$$

$$E_{p2} = -I_2 x_2 = -I_2 \omega L_2, \quad (10.11)$$

где I_1 и I_2 — токи статора и ротора;

x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления статорной и роторной обмоток;

L_1 и L_2 — индуктивности рассеяния статора и ротора.

Так как мы исходим из пропорциональной зависимости между потоками рассеяния и токами, их создающими, то индуктивности рассеяния L_1 и L_2 являются величинами постоянными. Они зависят от конструктивных особенностей обмоток, формы пазов статора и ротора. Поскольку частота ротора не остается постоянной, а зависит от скольжения, зависимым от скольжения оказывается и индуктивное сопротивление ротора

$$x_2 = \omega L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 L_2 \cdot s$$

или

$$x_2 = x_{2н} \cdot s, \quad (10.12)$$

где $x_{2н} = 2\pi f_1 L_2$ — индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора (при $s = 1$).

§ 10.6. Уравнения электрического равновесия статора и ротора. Ток ротора

Э.д.с. каждой фазной обмотки статора уравновешиваются приложенным напряжением сети U_1 . Кроме того, за счет напряжения сети покрывается падение напряжения в активном сопротивлении обмотки статора r_1 , создаваемое током статора I_1 и равное $I_1 r_1$. На основании этого можно записать уравнение напряжений или, иначе говоря, уравнение электрического равновесия статора:

$$\bar{U}_1 + \bar{E}_1 + \bar{E}_{p1} - \bar{I}_1 r_1 = 0$$

или

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 - \bar{E}_{p1} + \bar{I}_1 r_1. \quad (10.13)$$

По фазе э.д.с. E_1 отстает от вращающегося потока на четверть периода или на угол 90° . Э.д.с. рассеяния E_{p1} отстает на угол 90° от тока I_1 . Активное падение напряжения $I_1 r_1$ совпадает с током по фазе.

Так как $E_{p1} = -I_1 x_1$,

то

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 r_1 + \bar{I}_1 x_1 \quad (10.14)$$

или

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 z_1, \quad (10.15)$$

где $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ — полное сопротивление фазы статора.

В комплексной форме уравнение электрического равновесия статора принимает вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1. \quad (10.16)$$

Оно такое же, как и для первичной обмотки трансформатора. Сопротивление фазных обмоток статора z_1 обычно невелико и приближенно можно пренебречь падением напряжения $I_1 z_1$. Тогда с учетом (10.4)

$$U_1 \approx E_1 \equiv \Phi. \quad (10.17)$$

Следовательно, при $U_1 = \text{const}$ и $\Phi \approx \text{const}$, т. е. при постоянном напряжении сети, вращающийся магнитный поток является практически постоянным, не зависящим от нагрузки. Это действительно при не слишком больших токах статора.

Вращающийся магнитный поток индуцирует в фазах ротора э.д.с. E_2 , которая вызывает ток I_2 . Ток ротора создает

поток рассеяния, э.д.с. рассеяния $E_{p2} = -I_2 x_2$ и падение напряжения в активном сопротивлении ротора $I_2 r_2$.

Таким образом, уравнение электрического равновесия ротора имеет вид

$$\bar{E}_2 + \bar{E}_{p2} = \bar{I}_2 r_2$$

или

$$\bar{E}_2 = \bar{I}_2 r_2 + \bar{I}_2 x_2 = \bar{I}_2 z_2, \quad (10.18)$$

где $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$ — полное сопротивление фазы ротора.

В комплексной записи

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 (r_2 + jx_2) = \dot{I}_2 Z_2. \quad (10.19)$$

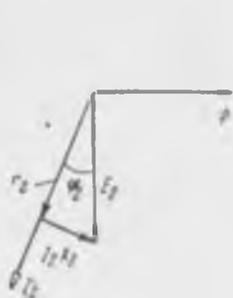


Рис. 10.18

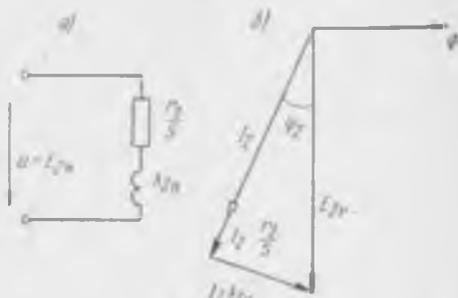


Рис. 10.19

Этому уравнению отвечает векторная диаграмма ротора, изображенная на рис. 10.18. Из уравнения напряжений ток ротора равен

$$I_2 = \frac{E_2}{z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}. \quad (10.20)$$

Величины E_2 и x_2 зависят от скольжения. Учитывая, что $E_2 = E_{2n} \cdot s$ и $x_2 = x_{2n} \cdot s$ (10.6, 10.8), получим

$$I_2 = \frac{E_{2n} \cdot s}{\sqrt{r_2^2 + x_{2n}^2 s^2}} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_{2n}^2}}. \quad (10.21)$$

В этой формуле переменной, зависимой от нагрузки величиной является скольжение s . Формула показывает, что ток ротора будет максимальным при максимальном скольжении, т. е. в начальный момент пуска двигателя, когда $s=1$. С уменьшением скольжения ток ротора снижается. Уменьшение его будет проходить медленнее, чем э.д.с. E_2 .

Как правило, $r_2 < x_{2n}$, поэтому член $\frac{r_2}{s}$ под корнем в зна-

менателе формулы тока оказывает существенное влияние на величину тока лишь при малых скольжениях.

Фазы тока относительно э. д. с. E_2 также зависит от скольжения

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x_{2\text{н}} s}{r_2}. \quad (10.22)$$

При малом скольжении угол ψ_2 небольшой. На основании (10.21) электрическую цепь ротора можно изобразить схемой, состоящей из активного $\frac{r_2}{s}$ и индуктивного $x_{2\text{н}}$ вместо реальных r_2 и x_2 сопротивлений, к которой приложено напряжение U , равное э. д. с. неподвижного ротора $E_{2\text{н}}$ (рис. 10.19,а). Векторная диаграмма такой схемы ротора показана на рис. 10.19,б.

Задачи. 10.3. Двигатель с контактными кольцами включен в сеть с напряжением $U_n = 380$ в. На разомкнутых кольцах ротора измерено напряжение $U_2 = 228$ в. Число витков фазных обмоток статора — $w_1 = 60$, обмоточный коэффициент — $k_1 = 0,94$, обмоток ротора — $w_2 = 36$, $k_2 = 0,96$. Обмотки соединены звездой.

Определить поток, проходящий через полюсы двигателя, и э. д. с. статора E_1 .

Решение. Фазная э. д. с. неподвижного ротора

$$E_{2\text{н}} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{228}{1,73} = 132 \text{ в.}$$

Поток

$$\Phi = \frac{E_{2\text{н}}}{4,44 f_1 w_2 k_2} = \frac{132}{4,44 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 0,96} = 0,0173 \text{ вб.}$$

Э. д. с. статора

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_1 \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 0,94 \cdot 0,0173 = 216 \text{ в.}$$

10.4. Для короткозамкнутого асинхронного двигателя число пар полюсов $p = 1$, номинальное скольжение $s = 0,029$, поток $\Phi = 0,0258$ вб.

Определить э. д. с. и частоту тока ротора при пуске и номинальной нагрузке, считая поток неизменным.

Решение. Количество фаз короткозамкнутого ротора определяется числом стержней клетки (пазов ротора), приходящихся на одну пару полюсов, т. е.

$$m_2 = \frac{Z_2}{p},$$

где Z_2 — число пазов ротора.

Следовательно, число стержней на фазу равно p .

Так как в виток входят два стержня, то число витков фазы будет

$$w_2 = \frac{p}{2} = 0,5 p.$$

В данном случае $w_2 = 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 1 = 0,5$ витка.

Обмоточный коэффициент короткозамкнутого ротора — $k_2 = 1$.

Э. д. с. ротора в начальный момент пуска ($s = 1$) $E_{2\text{н}} = 4,44 f_1 w_2 k_2 \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,0258 = 2,86$ в.

В рабочем режиме при $s = 0,029$

$$E_2 = E_{2\text{н}} s = 2,86 \cdot 0,029 = 0,083 \text{ в.}$$

Частота э. д. с. и тока ротора при пуске

$$f_2 = f_1 = 50 \text{ гц;}$$

при нагрузке

$$I_2 = I_1 \cdot s = 50 \cdot 0,029 = 1,45 \text{ а.}$$

10.5. По данным задачи 10.4 определить пусковой и номинальный ток ротора и его фазовый сдвиг относительно э. д. с., если активное сопротивление фазы равно $r_2 = 0,0015 \text{ ом}$, индуктивное сопротивление неподвижного ротора $x_{2н} = 0,01 \text{ ом}$.

Решение. Ток ротора

$$I_2 = \frac{E_{2н} \cdot s}{\sqrt{r_2^2 + x_{2н}^2 s^2}}.$$

Пусковой ток ($s=1$)

$$I_{2н} = \frac{2,86 \cdot 1}{\sqrt{0,0015^2 + 0,01^2 \cdot 1}} = 284 \text{ а.}$$

Фаза

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_{2н} \cdot s}{r_2} = \frac{0,01}{0,0015} = 6,66; \psi_2 = 81^\circ 26'.$$

Номинальный ток ротора

$$I_{2н} = \frac{2,86 \cdot 0,029}{\sqrt{0,0015^2 + 0,01^2 \cdot 0,029^2}} = 54,6 \text{ а}$$

Фазовый сдвиг в номинальном режиме

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{0,01 \cdot 0,029}{0,0015} = 0,193; \psi_2 = 10^\circ 55'.$$

Если пренебречь при определении пускового тока активным сопротивлением r_2 , а при определении номинального тока величиной индуктивного сопротивления $x_2 = x_{2н} s$, то получим:

$$I_{2н} = \frac{E_{2н}}{x_{2н}} = \frac{2,86}{0,01} = 286 \text{ а}$$
$$I_{2н} = \frac{E_{2н} s}{r_2} = \frac{2,86 \cdot 0,029}{0,0015} = 55,4 \text{ а.}$$

т. е. погрешность токов оказывается незначительной.

10.6. Определить величину и фазу номинального тока ротора двигателя с контактами кольцами, если

$$E_{2н} = 132 \text{ в, } r_2 = 0,24 \text{ ом, } x_{2н} = 1,2 \text{ ом, } s_{н} = 0,035.$$

Решение.

$$I_{2н} = \frac{E_{2н} \cdot s_{н}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2н}^2 \cdot s_{н}^2}} = \frac{132 \cdot 0,035}{\sqrt{0,24^2 + 1,2^2 \cdot 0,035^2}} = 19 \text{ а.}$$
$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_{2н} \cdot s_{н}}{r_2} = \frac{1,2 \cdot 0,035}{0,24} = 0,175; \psi_2 = 9^\circ 55'.$$

Если при определении номинального тока ротора пренебречь индуктивным сопротивлением $x_2 = x_{2н} \cdot s$, то получим

$$I_{2н} = \frac{E_{2н} s_{н}}{r_2} = \frac{132 \cdot 0,035}{0,24} = 19,2 \text{ а.}$$

Как определяются действующие значения фазных э. д. с. статора и ротора?

Как зависят э. д. с. ротора и частота тока ротора от скольжения?

Как учитываются э. д. с. рассеяния статора и ротора?

Роль э. д. с. статора. Как записывается уравнение напряжений статора?

Уравнение напряжений ротора. Как зависит от скольжения ток ротора и его фаза?

§ 10.7. Уравнение намагничивающих сил и токов

Вращающийся магнитный поток двигателя в рабочем режиме, т. е. при замкнутой цепи ротора, создается совместным действием намагничивающих сил статора и ротора, которые зависят от числа фаз, витков, величины токов в обмотках, а также от распределения обмоток по пазам. Последнее обстоятельство учитывается коэффициентом k , который можно принять равным обмоточному коэффициенту.

Намагничивающая сила статора пропорциональна $m_1 I_1 \omega_1 k_1$, а ротора — $m_2 I_2 \omega_2 k_2$, где m_1 — число фаз статора, m_2 — число фаз ротора.

Намагничивающая сила статора вращается в пространстве с синхронной скоростью, определяемой частотой питающего тока и числом пар полюсов, $n_1 = \frac{f_1 60}{p}$. Ток ротора имеет частоту f_2 . Его намагничивающая сила вращается относительно ротора со скоростью $n_2 = \frac{f_2 60}{p}$.

Сам же ротор вращается в пространстве со скоростью n_2 . Следовательно, намагничивающая сила ротора в пространстве вращается со скоростью $n_2 + n_1 = n_1$, т. е. с синхронной скоростью.

Таким образом, намагничивающие силы статора и ротора в пространстве вращаются с одинаковой, синхронной скоростью. По отношению друг к другу они оказываются неподвижны. Это обстоятельство позволяет складывать их геометрически независимо от того, ротор неподвижен или вращается. Геометрическая сумма намагничивающих сил статора и ротора определяет ту результирующую намагничивающую силу, которая создает вращающийся поток в рабочем режиме. Она равна

$$m_1 I_0 \omega_1 k_1 = m_1 I_1 \omega_1 k_1 + m_2 I_2 \omega_2 k_2. \quad (10.23)$$

Это уравнение называется уравнением намагничивающих сил асинхронного двигателя.

На основании уравнения намагничивающих сил двигателя ток статора можно разделить на две составляющие

$$I_1 = I_0 - I_2 \frac{m_2 \omega_2 k_2}{m_1 \omega_1 k_1}.$$

$$I_2 \frac{m_2 \omega_2 k_2}{m_1 \omega_1 k_1} = I_2 \frac{1}{k_t} = I_2', \quad (10.24)$$

получим

$$I_1 = I_0 + (-I_2'), \quad (10.25)$$

где I_0 — намагничивающий ток статора;

I_2' — приведенный ток ротора, т. е. часть тока статора, которая уравнивает размагничивающее действие тока ротора;

$k_t = \frac{m_1 \omega_1 k_1}{m_2 \omega_2 k_2}$ — коэффициент трансформации токов асинхронного двигателя.

Из уравнений (10.4) и (10.17) следует, что вращающийся магнитный поток в основном определяется напряжением сети. Следовательно, от напряжения зависит и намагничивающая составляющая тока статора I_0 . Если $U_1 = \text{const}$, то и $I_0 \approx \text{const}$, т. е. можно считать, что ток I_0 практически не зависит от нагрузки двигателя. При изменении нагрузки на валу ток статора изменяется за счет его составляющей — I_2' . Электромагнитные явления, которыми сопровождается переход асинхронного двигателя от одной нагрузки к другой, протекают так же, как у трансформатора при изменении его вторичной нагрузки.

По уравнению (10.25) можно построить векторную диаграмму токов (рис. 10.20). Ее построение удобнее начинать с вектора вращающегося потока Φ . Ток I_0 вследствие потерь в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис опережает поток Φ на угол потерь α . При заданном потоке ток I_0 и угол α устанавливаются по магнитным характеристикам магнитопровода. Величину и фазу — I_2' можно определить по величине и фазе тока ротора I_2 с помощью выражений (10.21), (10.22), (10.24). Сумма $I_0 + (-I_2')$ дает ток статора I_1 . Доля намагничивающего тока I_0 в токе статора



Рис. 10.20

асинхронного двигателя по сравнению с долей тока холостого хода трансформатора в первичном токе значительно больше, поскольку магнитопровод двигателя имеет воздушный зазор.

§ 10.8. Схема замещения и векторная диаграмма

Преобразуем уравнение напряжений ротора (10.19), разделив обе его части на скольжение

$$\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} + \dot{I}_2 j \frac{x_2}{s},$$

или, учитывая, что $\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{E}_{2н}$ (10.8), а $\frac{x_2}{s} = x_{2н}$ (10.12), можно записать

$$\dot{E}_{2н} = \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} + \dot{I}_2 j x_{2н}.$$

Используя замену по уравнению (10.24) и умножая на коэффициент трансформации э.д.с. k_e (10.9), получим

$$\dot{E}_{2н} \cdot k_e = \dot{I}_2' \frac{r_2 \cdot k_e \cdot k_i}{s} + \dot{I}_2' \cdot j x_{2н} \cdot k_e \cdot k_i$$

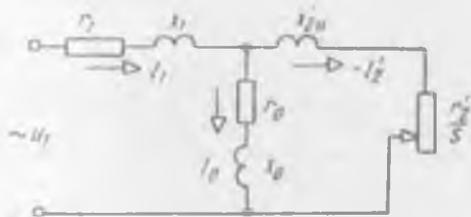


Рис. 10.21

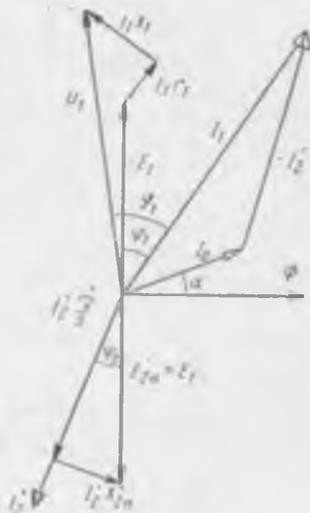


Рис. 10.22

или

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \frac{r_2'}{s} + \dot{I}_2' j x_{2н}', \quad (10.26)$$

где $E_2' = E_{2н} k_e$ — приведенная к статору э. д. с. неподвижного ротора; она равна э. д. с. статора E_1 (10.9);

$r_2' = r_2 \cdot k = r_2 k_e k_i$ — приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора;

$x_{2н}' = x_{2н} k = x_{2н} k_e k_i$ — приведенное индуктивное сопротивление неподвижного ротора;

$k = k_e k_i = \frac{m_1 \omega_1^2 k_1^2 k_2^2}{m_2 \omega_2^2 k^2}$ — коэффициент приведения сопротивлений ротора к статору.

Такая замена действительных величин ротора приведенными не меняет энергетических соотношений в нем, но позволяет перейти от электромагнитной связи между цепями ротора и статора к электрической связи между ними.

На основании уравнений напряжений статора (10.15) и ротора (10.26) и уравнения токов (10.25) асинхронный двигатель может быть представлен электрической схемой замещения, приведенной на рис. 10.21.

Данной схеме замещения соответствует полная векторная диаграмма асинхронного двигателя, которая изображена на рис. 10.22. И схема замещения и векторная диаграмма удовлетворяют указанным уравнениям напряжений и токов. Ветвь схемы с током I_0 называется ветвью намагничивания. Сопротивления r_0 и x_0 определяются магнитными свойствами магнитопровода. Падение напряжения, вызываемое током I_0 , равно и противоположно по фазе э.д.с. статора E_1 и приведенной э.д.с. ротора E'_2 :

$$I_0 r_0 + I_0 j x_0 = -E_1 = -E'_2.$$

Параметры схемы замещения могут быть установлены расчетом или по опытным данным. Для асинхронных двигателей, как и для трансформаторов, проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания.

Задачи. 10.7. По данным задач 10.4 и 10.5 определить составляющую тока статора I_2' , уравновешивающую рабочий ток ротора I_2 . Дополнительно известно: $w_1=40$ витков, $k_1=0,94$, число пазов ротора $Z_2=24$.

Решение. Коэффициент трансформации токов асинхронного двигателя

$$k_t = \frac{m_1 w_1 k_1}{m_2 w_2 k_2}.$$

Число фаз короткозамкнутого ротора

$$m_2 = \frac{Z_2}{p}.$$

В данном случае $Z_2=24$, $p=1$, $m_2=24$, а

$$k_t = \frac{3 \cdot 40 \cdot 0,94}{24 \cdot 0,5 \cdot 1} = 9,4.$$

Искомая составляющая тока статора

$$I_2' = I_2 \frac{1}{k_t} = 54,6 \frac{1}{9,4} = 5,8 \text{ а.}$$

10.8. По данным задач 10.5 и 10.7 определить приведенные к статору сопротивления обмотки ротора.

Решение. Коэффициент приведен сопротивлений

$$k_s = \frac{m_1 w_1^2 k_1^2}{m_2 w_2^2 k_2^2} = \frac{3 \cdot 40^2 \cdot 0,94^2}{24 \cdot 0,5^2 \cdot 1} = 700.$$

Приведенные сопротивления ротора:

$$r_2' = r_2 k = 0,0015 \cdot 700 = 1,05 \text{ ом};$$

$$x_2' = x_2 k = 0,01 \cdot 700 = 7 \text{ ом}.$$

Вопросы для самопроверки

Как записывается уравнение намагничивающих сил двигателя?

Как записывается уравнение токов и как строится векторная диаграмма токов?

На основании каких уравнений строится полная векторная диаграмма и схема замещения асинхронного двигателя? Как строится векторная диаграмма?

§ 10.9. Энергетическая диаграмма. Потери, к. п. д.

У В асинхронном двигателе электрическая энергия преобразуется в механическую. В процессе такого преобразования часть ее теряется в самом двигателе. Наглядное представление о распределении мощностей в асинхронном двигателе можно получить с помощью энергетической диаграммы, которая приведена на рис. 10.23. На ней в виде потока шириной P_1

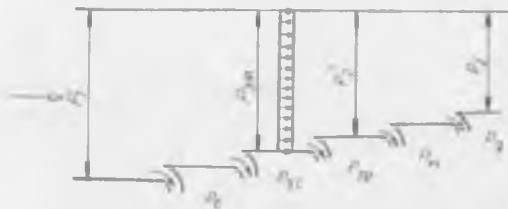


Рис. 10.23

отображена мощность, потребляемая обмоткой статора от сети. В виде небольших рукавов, направленных книзу, показаны мощности потерь в двигателе:

P_c — мощность потерь в сердечнике статора на гистерезис и вихревые токи (потери в стали статора);

$P_{эс}$ — мощность электрических потерь в обмотке статора на ее нагрев током

$$P_{эс} = m_1 I_1^2 r_1,$$

где m_1 — число фаз статора;

I_1 — ток статора;

r_1 — активное сопротивление фазы статора.

Оставшаяся часть $P_{эм}$ называется электромагнитной мощностью двигателя. Ею обладает вращающе-

ся поле. Некоторая часть ее составит электрические потери в роторе $P_{э.р}$:

$$P_{э.р} = m_2 I_2^2 r_2, \quad (10.27)$$

где I_2 — ток ротора;

r_2 — активное сопротивление фазы ротора;

m_2 — число фаз ротора.

У двигателей с контактными кольцами $m_2 = m_1$. У двигателей короткозамкнутых ротор является многофазным. Его число фаз равно числу стержней клетки, приходящихся на одну пару полюсов. Если число пазов ротора Z_2 , то число фаз $m_2 = \frac{Z_2}{p}$.

Потерями в стали ротора вследствие малой частоты тока ротора можно пренебречь. Оставшаяся часть электромагнитной мощности преобразовывается в механическую P_2' . Если из нее вычесть мощность механических потерь P_m , обусловленных трением в подшипниках и о воздух, и мощность добавочных потерь P_d , связанных с пульсациями магнитного потока в зубцовой зоне магнитопровода и с полями рассеяния, то получим механическую мощность на валу P_2 .

К.п.д. двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2 - \Delta P}{P_1}, \quad (10.28)$$

где ΔP — суммарные потери в двигателе.

Некоторые из потерь (например, потерн в стали) практически не зависят от нагрузки; другие (например, электрические в обмотках статора и ротора) — связаны с нагрузкой. В целом с ростом нагрузки возрастают потери, а следовательно, и нагрев двигателя. Предельная механическая мощность на валу, которую двигатель может развивать длительно (неограниченно долго), не перегреваясь свыше допустимой температуры, называется номинальной мощностью двигателя. Она указывается в паспорте. К. п. д. двигателя при номинальной нагрузке в значительной мере зависит от номинальной мощности двигателя. Чем больше мощность двигателя, тем меньше относительные потери в нем и больше к.п.д. Для крупных асинхронных двигателей номинальный к.п.д. весьма высок и достигает значений 0,9—0,97, в то время как для двигателей малых мощностей (около 1 квт) он равен лишь 0,7—0,8. Кроме того, при прочих равных условиях номинальный к.п.д. выше у двигателя на большую синхронную скорость.

Электромагнитная мощность двигателя $P_{эм}$ может быть представлена произведением момента электромагнитных сил и угловой скорости поля

$$P_{эм} = M\Omega_1 = M \frac{2\pi n_1}{60}, \quad (10.29)$$

В свою очередь механическая мощность ротора P_2 равна произведению момента на угловую скорость ротора

$$P_2 = M \Omega_2 = M \cdot \frac{2\pi n_2}{60}. \quad (10.30)$$

Согласно рис. 10.23,

$$\begin{aligned} P_{\text{э.р}} = P_{\text{эм}} - P_2 &= M \frac{2\pi}{60} (n_1 - n_2) = M \frac{2\pi n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \\ &= M \Omega_1 s = P_{\text{эм}} s. \end{aligned} \quad (10.31)$$

При пуске двигателя, когда $s=1$, электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ равна мощности потерь в роторе $P_{\text{э.р}}$, с разгоном — потери в роторе убывают.

Таким образом, скольжение s является мерой потерь в роторе.

В нормальном режиме работы двигателя малое значение s порядка нескольких процентов является важным условием его экономичности.

§ 10.10. Вращающий момент

Выразим вращающий момент через потери в роторе и скольжение

$$M = \frac{P_{\text{э.р}}}{\Omega_1 s} = \frac{m_2 I_2^2 r_2}{\Omega_1 \cdot s}. \quad (10.32)$$

В соответствии с рис. 10.18 $I_2 r_2 = E_2 \cos \psi_2$, а по (10.7) и (10.8) э.д.с. ротора равна

$$E_2 = E_{2\text{н}} \cdot s = 4,44 f_1 \omega_2 k_2 \Phi \cdot s.$$

Подставляя это в формулу момента, получим

$$M = \frac{4,44 \cdot m_2 f_1 \omega_2 k_2}{\Omega_1} \Phi I_2 \cos \psi_2 = C \cdot \Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (10.33)$$

где $C = \frac{4,44 \cdot m_2 f_1 \omega_2 k_2}{\Omega_1}$ — постоянная величина для данного двигателя.

Таким образом, вращающий момент пропорционален произведению потока, тока ротора и косинуса угла сдвига фаз между током и э.д.с. ротора.

Величины Φ , I_2 , $\cos \psi_2$ в большей или меньшей степени зависят от скольжения, что обуславливает зависимость от скольжения вращающего момента. Для выяснения этой зависимости преобразуем исходное выражение момента (10.32), используя (10.9) и (10.21):

$$M = \frac{m_2 I_2^2 r_2}{\Omega_1 s} = \frac{m_2}{\Omega_1 s} \cdot \frac{E_{2\text{н}}^2 s^2 r_2}{r_2^2 + x_{2\text{н}}^2 s^2} = \frac{m_2}{\Omega_1 \cdot k_r} \cdot \frac{E_1^2 s r_2}{r_2^2 + x_{2\text{н}}^2 s^2}.$$

Обозначив постоянную величину $\frac{m_2}{(1-k_2)^2} = C_1$, получим

$$M = C_1 E_1^2 \frac{s \cdot r_2}{r_2^2 + x_{2н}^2 \cdot s^2} \quad (10.34)$$

Если пренебречь падением напряжения в обмотке статора $I_1 z_1$, то можно э.д.с. E_1 заменить напряжением U_1 (10.17). Это допущение, однако, возможно только в известных пределах. При больших нагрузках и скольжениях падение напряжения в обмотке статора сильно возрастает и разница между напряжением и э.д.с. может оказаться существенной. С учетом сказанного формула момента принимает вид

$$M = C_1 U_1^2 \frac{s r_2}{r_2^2 + x_{2н}^2 \cdot s^2} \quad (10.35)$$

При $U_1 = \text{const}$, что обычно имеет место в нормальном режиме эксплуатации двигателя, вращающий момент является функцией скольжения, график которой изображается кривой 1 (рис. 10.24).

Из формулы (10.35) и графика следует, что при малых скольжениях ($s < s_k$) момент приблизительно пропорционален скольжению. С увеличением скольжения становится ошутимее влияние s в знаменателе формулы (10.35) и момент, достигнув своего наибольшего значения M_k при скольжении $s = s_k$, дальше убывает до величины пускового момента M_p при $s = 1$. Максимальный момент M_k и скольжение s_k , при котором он развивается, называются критическими.

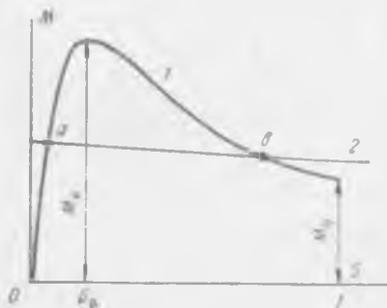


Рис. 10.24

Двигатель работает с установившейся, т. е. неизменной, скоростью вращения при равновесии моментов вращающего и сопротивления. Характер кривой момента сопротивления M_c в зависимости от скольжения (или скорости) определяется свойствами рабочего механизма. Если $M_c = F(s)$ имеет вид кривой 2 (см. рис. 10.24), то условие равновесия моментов соблюдается при двух различных скольжениях — точка a , которой соответствует небольшое скольжение $s < s_k$, и точка b при скольжении $s > s_k$. Однако для устойчивой работы двигателя недостаточно простого равновесия моментов. Необходимо, чтобы двигатель был в состоянии восстановить равновесие при возможных его нарушениях. Это возможно лишь, если,

$$\frac{dM}{ds} > \frac{dM_c}{ds} \quad (10.36)$$

Как видно из рис. 10.24, указанное неравенство имеет место только в области $s < s_k$ (точка a), т. е. на левой части кривой $M = F(s)$.

Поэтому асинхронный двигатель работает устойчиво лишь при скольжениях, меньших критического. Правая часть кривой $M = F(s)$, относящаяся к области скольжений $s \geq s_k$, называется неустойчивой. При таких скольжениях двигатель работать не может. Так, при работе со скольжением, соответствующем точке b , любое случайное нарушение равновесия моментов в ту или другую сторону вызывает разгон двигателя до скольжений $s < s_k$ (переход в точку a) или его остановку.

Вращающий момент в режиме номинальной нагрузки, соответствующей допустимому нагреву двигателя, должен быть с определенным запасом меньше критического M_k . Когда момент сопротивления нагрузки достигает величины критического момента, двигатель переходит на неустойчивую часть характеристики $M = F(s)$ и останавливается. Происходит «прокидывание» двигателя. Чем большее превышение критического момента над номинальным, тем большие кратковременные перегрузки способен преодолевать двигатель. Перегрузочную способность двигателя принято характеризовать коэффициентом перегрузочной способности k_M , который равен

$$k_M = \frac{M_k}{M_n} \quad (10.37)$$

где M_n — номинальный момент двигателя.

Для асинхронных двигателей обычно $k_M = 1,6 \div 2,5$. При оценке пусковых свойств двигателя важное значение имеет величина начального пускового момента M_p при $s = 1$.

Для определения критического скольжения следует приравнять нулю производную $\frac{dM}{ds}$ и решить полученное выражение относительно s . Такой анализ показывает, что

$$s_k = \frac{r_2}{x_{2n}} \quad (10.38)$$

а сам критический момент, который получается по выражению (10.35) после подстановки значения $s = s_k$, равен

$$M_k = C_1 U_1^2 \frac{1}{2x_{2n}} \quad (10.39)$$

Отсюда следует:

Во-первых, критический момент, а следовательно, и перегрузочная способность асинхронного двигателя зависит от квадрата напряжения. Это обуславливает высокую чувстви-

тельность этих двигателей к отклонениям напряжения сети. Даже при небольших сравнительно снижениях напряжения резко уменьшается перегрузочная способность, что может вызывать остановку («прокидывание») двигателей.

Во-вторых, величина M_k не зависит от активного сопротивления ротора r_2 , но от r_2 зависит скольжение s_k . У двигателей с контактными кольцами за счет добавочного активного сопротивления, вводимого в цепь ротора, оказывается возможным получить ряд кривых $M=F(s)$, при этом применение пускового реостата увеличивает пусковой момент M_n (см. § 10.11 и рис. 10.28).

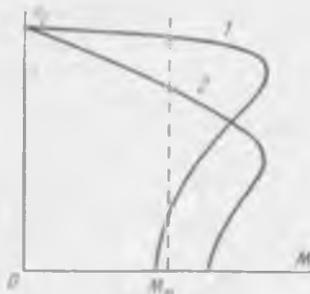


Рис. 10.25

Зависимость $M=F(s)$ определяет также связь между скоростью вращения и моментом. Ранее (§ 10.3) зависимость $n=F(M)$ была названа механической характеристикой двигателя.

Таким образом, график $M=F(s)$ представляет собой видоизмененную, т.е. построенную в других координатах, механическую характеристику. В обычных координатах $n=F(M)$ она имеет вид рис. 10.25. Кривая 1 для двигателя короткозамкнутого и двигателя с контактными -кольцами без добавочного сопротивления в цепи ротора; кривая 2 для двигателя с контактными кольцами при введенном в цепь ротора добавочном активном сопротивлении.

Преобразуем 10.35, подставив вместо U_1 его значение из 10.39:

$$M = \frac{C_1 2M_k x_{2n} r_2 s}{C_1 (r_2^2 + x_{2n}^2 s^2)} = \frac{2M_k}{\frac{r_2}{x_{2n}s} + \frac{x_{2n}s}{r_2}}$$

Учитывая 10.38, получим

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

Эта простая формула удобна для расчета механической характеристики двигателя по двум известным величинам — M_k и s_k , которые можно получить из каталога.

Формулы (10.35), (10.38) и (10.39) являются приближенными, поскольку при их выводе с целью упрощения было принято $E_1 = U_1$. Более точные формулы для этих величин имеют вид:

$$M = \frac{p \cdot m_1 U_1^2 \frac{r_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_{2n})^2 \right]}$$

$$s_k = \frac{r_2}{x_1 + x_2}; \quad M_k = \frac{p m_1 U_1^2}{4\pi f_1 (r_1 + x_1 + x'_{2n})}$$

где s — скольжение;

p — число пар полюсов;

m_1 — число фаз статора;

f_1 — частота питающей сети;

r_1 и x_1 — активное и индуктивное сопротивления фазы статора;

r_2 и x'_{2n} — приведенные активное и индуктивное сопротивления ротора.

Выводы, которые вытекают из этих соотношений, не противоречат сделанным ранее.

Задачи. 10.9. Номинальная мощность двигателя $P_n = 10$ *квт*, напряжение $U_n = 380$ *в*, к. п. д. $\eta_n = 0,88$, коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,87$, потери в стали $P_c = 0,05 P_n$. Потери мощности в обмотках статора в номинальном режиме $P_{sc} = 0,03 P_n$.

Определить потребляемый ток и электромагнитную мощность двигателя в номинальном режиме.

Решение. Потребляемая мощность

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n} = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi_n.$$

Номинальный ток

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \eta_n} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 20 \text{ а.}$$

Электромагнитная мощность в номинальном режиме

$$P_{эм} = P_1 - P_c - P_{sc} = \frac{P_n}{\eta_n} - 0,05 P_n - 0,03 P_n = \frac{10}{0,88} - 0,05 \cdot 10 - 0,03 \cdot 10 = 10,55 \text{ квт.}$$

10.10. Для короткозамкнутого асинхронного двигателя, рассмотренного в примерах 10.4, 10.5 и 10.7, определить вращающий момент при пуске и в номинальном режиме. Известны следующие параметры: $p=1$, $\Phi=0,0258$ *вб*, $r_2=0,0015$ *ом*, $x_{2n}=0,01$ *ом*, $w_2=0,5$ витка, $m_2=24$, $I_{2n}=284$ *а*, $\psi_{2n}=81^\circ 26'$, $I_{2n}=54,6$ *а*, $\psi_{2n}=10^\circ 55'$, $k_1=0,94$, $w_1=40$ витков, $s_n=0,029$.

Решение. Синхронная скорость

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{1} = 3000 \text{ об/мин.}$$

Угловая синхронная скорость поля

$$\Omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/сек.}$$

Исходя из потерь в роторе,

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1 s} = \frac{m_2 I_{2n}^2 r_2}{\Omega_1 s}$$

Пусковой момент (при $s=1$)

$$M_n = \frac{m_2 I_{2n}^2 r_2}{\Omega_1} = \frac{24 \cdot 284^2 \cdot 0,0015}{314} = 9,3 \text{ дж} = 0,95 \text{ кгм.}$$

Номинальный момент

$$M_n = \frac{m_2 I_{2n}^2 r_2}{\Omega_1 s_n} = \frac{24 \cdot 54,6^2 \cdot 0,0015}{314 \cdot 0,029} = 11,8 \text{ дж} = 1,2 \text{ кгм.}$$

10.11. Короткозамкнутый двигатель, рассмотренный в задаче 10.10, питается от сети с напряжением $U_1=380$ в. Обмотки статора соединены звездой.

Определить критическое скольжение, критический момент и коэффициент перегрузочной способности k_m . Как изменится коэффициент перегрузочной способности при снижении напряжения питающей сети на 30%?

Решение. Критическое скольжение

$$s_k = \frac{r_2}{x_{2n}} = \frac{0,0015}{0,01} = 0,15 \text{ или } 15\%.$$

Критический момент

$$M_k = C_1 U_1^2 \frac{1}{2x_{2n}}$$

При соединении в звезду фазное напряжение

$$U_1 = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ в.}$$

Постоянная C_1 :

$$C_1 = \frac{m_2}{\Omega_1 k_r^2} = \frac{m_2 \omega_2^2 k_2^2}{\Omega_1 \omega_1^2 k_1^2} = \frac{24 \cdot 0,5^2 \cdot 1}{314 \cdot 40^2 \cdot 0,94^2} = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ сект}$$

$$M_k = 1,22 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2 \frac{1}{2 \cdot 0,01} = 29,3 \text{ дж} = 2,99 \text{ кгм.}$$

Коэффициент перегрузочной способности

$$k_m = \frac{M_k}{M_n} = \frac{2,99}{1,2} \approx 2,5.$$

Вращающий момент, в том числе и критический, пропорционален квадрату напряжения. При снижении напряжения на 30%

$$k_m = \frac{M_k}{M_n} \left(\frac{0,7U_1}{U_1} \right)^2 = 2,5 \cdot 0,49 = 1,22,$$

т. е. критический момент и коэффициент k_m снизятся более чем в два раза.

Вопросы для самопроверки

Какие виды потерь мощности имеют место в асинхронном двигателе? Что понимают под электромагнитной и механической мощностью двигателя?

Определите понятие «номинальная мощность двигателя».

Как зависят электрические потери в роторе от скольжения?

От чего зависит вращающий момент двигателя?

Проанализируйте зависимость вращающего момента от скольжения.

Что понимают под коэффициентом перегрузочной способности и какова его величина для обычных асинхронных двигателей?

Каково условие устойчивой работы двигателя?

От чего и как зависит критический момент и критическое скольжение?

Какие имеются возможности влияния на механическую характеристику асинхронного двигателя?

§ 10.11. Пуск в ход асинхронных двигателей

Двигатель начинает работу со скольжения $s=1$. Момент, который он при этом развивает, называется начальным, или пусковым моментом. Пусковые свойства двигателя оцениваются в первую очередь величиной пускового момента M_n или его кратностью по отношению к номинальному M_n .

$$k_n = \frac{M_n}{M_n} \quad (10.40)$$

Кроме пускового момента, большое значение имеет также величина пускового тока I_n или его кратность к номинальному I_n . Номинальный ток — это ток, который двигатель потребляет от сети, будучи полностью нагруженным до своей номинальной мощности. Кратность пускового тока выражается отношением

$$k_r = \frac{I_n}{I_n} \quad (10.41)$$

При оценке пусковых свойств следует учитывать также количество и стоимость необходимой пусковой аппаратуры. Иногда важны время и плавность разгона двигателя.

Двигатели короткозамкнутые. Наиболее простым, удобным и самым распространенным является прямой пуск непосредственным включением в сеть на полное напряжение. Простейшая схема прямого пуска короткозамкнутого двигателя (с помощью рубильника) показана на рис. 10.26. При таком пуске двигатель развивает пусковой момент, который, как правило, больше номинального.

Кратность пускового момента для короткозамкнутых двигателей нормального исполнения при этом составляет

$$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 0,8 \div 1,6.$$

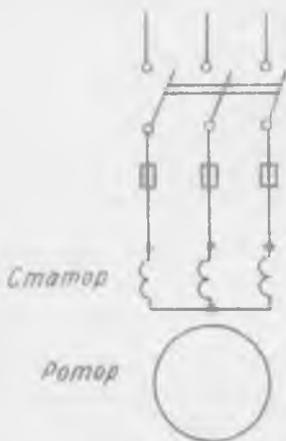


Рис. 10.26

Однако при прямом пуске двигатель потребляет большой пусковой ток.

Формула для тока ротора (10.21)

$$I_2 = \frac{E_{2n}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_{2n}^2}}$$

показывает, что он будет максимальным при пуске, когда $s=1$. Из рассмотрения принципа действия, а также из формулы (10.25) вытекает, что ток ротора и ток статора взаимосвязаны. Следовательно, будет максимальным и ток статора. Кратность пускового тока при прямом пуске достигает значений

$$k_T = \frac{I_n}{I_n} = 5 \div 7.$$

С точки зрения нагрева двигателя большой пусковой ток опасности не представляет, поскольку процесс пуска завершается за очень короткое время (доли секунды или несколько секунд). За такой промежуток времени пусковой ток, несмотря на его большое значение, не вызывает заметного повышения температуры двигателя. Конечно, в случае большой частоты пусков приходится считаться с возможностью нагрева двигателя пусковыми токами.

Более существенным является влияние пускового тока на напряжение сети. Вследствие падения напряжения в питающей сети, вызываемого броском пускового тока двигателя в момент его включения, снижается напряжение. Это отрицательно сказывается на других приемниках, работающих от данной сети, и на пусковых свойствах включаемого двигателя, поскольку его момент, в том числе и пусковой, пропорционален квадрату напряжения сети.

В этом недостаток прямого пуска. Снижение напряжения тем больше, чем выше пусковой ток, т. е. чем больше мощность пускаемого двигателя. Если мощность двигателя составляет примерно более 20—25% от мощности питающей сети, то снижение напряжения, вызываемое пусковым током, может оказаться уже недопустимым.

Заметим, однако, что современные сети достаточно мощные и в большинстве случаев допускают прямой пуск асинхронных короткозамкнутых двигателей. В современной практике имеются случаи прямого пуска весьма крупных короткозамкнутых двигателей.

В тех сравнительно редких случаях, когда прямой пуск недопустим, для снижения пускового тока применяется пуск на пониженном напряжении. Пусковой ток приближенно пропорционален напряжению сети. В той мере, в какой снижает-

ся напряжение на двигателе на время пуска, снижается и его пусковой ток. Для снижения напряжения применяются автотрансформаторы или реакторы (реактивные сопротивления). Чаще используют автотрансформаторы и тогда пуск называется автотрансформаторным. Если нормальная схема обмоток статора в данной сети треугольник, то с целью снижения пускового тока применяют пуск переключением со звезды на треугольник. Двигатель включается в сеть по схеме звезда и после разгона переключается на нормальную схему

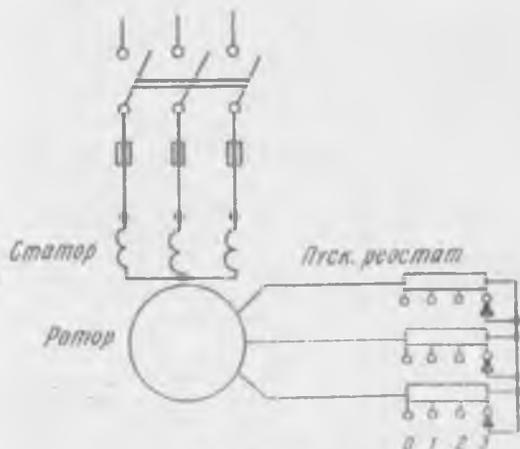


Рис. 10.27

треугольника. Это тоже пуск на пониженном напряжении, поскольку за счет изменения схемы на время пуска снижается напряжение на обмотках статора.

Во всех случаях пуска на пониженном напряжении одновременно снижается и пусковой момент. Поэтому он возможен при пусках вхолостую или с небольшой нагрузкой. Кроме того, для его осуществления требуется дополнительная аппаратура.

Двигатели с контактными кольцами. Пуск в ход двигателей с контактными кольцами осуществляется с помощью пускового реостата, который включается в цепь ротора через щетки и контактные кольца (рис. 10.27). Для двигателей малой и средней мощности применяют металлические реостаты, как правило, с масляным охлаждением, для двигателей большой мощности — водяные с подвижными электродами. Сопротивление пускового реостата r_d выбирается из соображений ограничения пускового тока и получения большего пускового момента. Обычно пусковой ток оказывается допустимым

при сопротивлении r_d , обеспечивающем пусковой момент M_p на уровне критического. За счет выполнения реостата на несколько ступеней сопротивлений обеспечивается плавность пуска двигателя.

На рис. 10.28 жирной линией показано изменение вращающего момента двигателя по мере его разгона при изменении сопротивления пускового реостата, имеющего три ступени. К концу пуска реостат полностью выводится из цепи ротора.

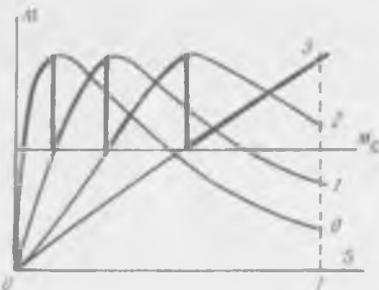


Рис. 10.28

Кривые 3, 2, 1 определяют $M = F(s)$ двигателя при положении ручки управления пусковым реостатом (см. рис. 10.27) на клеммах, соответственно 3, 2, 1. Кривая 0 отображает естественную механическую характеристику, которой

обладает двигатель при полностью выведенном пусковом реостате. Линия M_c — линия момента сопротивления нагрузки.

Двигатель с контактными кольцами обладает хорошими пусковыми характеристиками — создает высокий пусковой момент при ограниченном, небольшом пусковом токе. В этом его основное достоинство. Он находит применение для электроприводов с тяжелыми условиями пуска, где короткозамкнутый по своим пусковым свойствам оказывается неудовлетворительным. Вместе с тем короткозамкнутый двигатель проще, дешевле, надежнее в работе.

§ 10.12. Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Попытки объединить в одной конструктивной форме достоинства обоих типов двигателей, избегнув или уменьшив их недостатки, хотя и не дали полного решения этой задачи, все же привели к созданию ряда конструкций короткозамкнутых двигателей специального исполнения, имеющих лучшие пусковые свойства. Из них получили применение двигатели с двойной клеткой и двигатели с глубоким пазом ротора.

Двигатели с двойной клеткой ротора. Статор такого двигателя нормальный, трехфазный. Ротор имеет две короткозамкнутые обмотки, выполненные в виде беличьих клеток. Паз ротора показан на рис. 10.29.

Внешняя клетка, размещенная у поверхности ротора, делается из тонких стержней, и она обладает значительным активным сопротивлением. Вследствие размещения ее у поверхности ротора она создает небольшой поток рассеяния Φ_p и по-

этому имеет малую индуктивность L'_2 . Эту обмотку (клетку) называют пусковой. Внутренняя клетка, ее называют рабочей, размещена глубже в теле ротора, она делается толстой и имеет малое активное сопротивление. Вследствие глубокого размещения в теле ротора и, главным образом, за

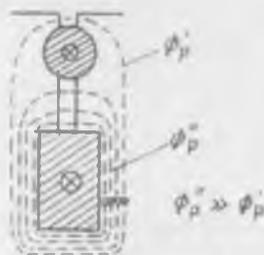


Рис. 10.29

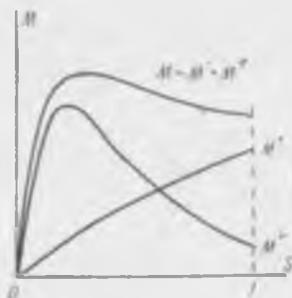


Рис. 10.30

счет узкой и высокой щели между верхним и нижним гнездами паза (см. рис. 10.29) ее поток рассеяния Φ'_p большой и она обладает большой индуктивностью L'_2 . Замыкающие кольца по торцам ротора делаются или общими для обеих клеток, или для каждой в отдельности.

В начальный момент пуска частота тока в роторе равна частоте сети. Ток ротора распределится по клеткам обратно пропорционально их полным сопротивлениям (две параллельные ветви). Ток внутренней клетки вследствие ее большого индуктивного сопротивления $x_2 = \omega_2 L'_2$ сильно отстает по фазе от э. д. с. и поэтому пусковой момент ($M'' = C\Phi I_2 \cos \psi_2$), создаваемый этой клеткой, будет незначительным (рис. 10.30).

Ток внешней клетки будет практически совпадать по фазе с э. д. с., так как она обладает малым индуктивным сопротивлением ($L_2 \ll L'_2$) и большим активным. Взаимодействуя с вращающимся полем, он создает большой вращающий момент M' .

Следовательно, в начальный момент пуска основную долю вращающего момента создает внешняя, пусковая, клетка. По мере разгона двигателя частота тока ротора уменьшается, снижается и индуктивное сопротивление внутренней клетки, поскольку оно пропорционально частоте. Вследствие этого ток ротора перераспределяется по клеткам и долевое участие внутренней клетки в создании вращающего момента возрастает.

К концу разгона, когда двигатель достигает нормальной скорости, ток ротора проходит, главным образом, по внутренней, рабочей, клетке, поскольку она имеет малое активное

сопротивление, а ее индуктивное сопротивление к этому времени резко уменьшается. Внешняя клетка при этом оказывает незначительное влияние. Основная часть вращающего момента M в рабочем режиме создается внутренней, рабочей, обмоткой ротора. Поэтому скольжение такого двигателя при нормальной нагрузке невелико, на уровне скольжения обычного асинхронного двигателя (рис. 10.30).

Характерные значения кратностей пускового тока и момента для этого двигателя:

$$k_t = \frac{I_n}{I_n} = 3,5 \div 5,5; \quad k_m = \frac{M_n}{M_n} = 1,5 \div 2.$$

Впервые такой двигатель был построен М. О. Доливо-Добровольским в 1893 г.

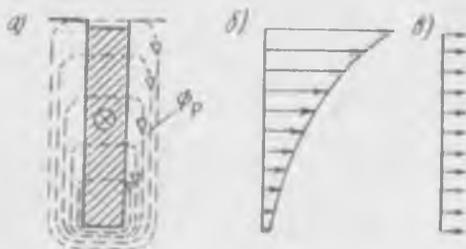


Рис. 10.31

Двигатели с глубоким пазом ротора. В этом двигателе используется та же идея, что и в двигателе с двойной клеткой, хотя и с меньшим эффектом. Ротор такого двигателя делается с узким и глубоким пазом (рис. 10.31, а). Стержни его внутренней клетки представляют собой медные или алюминиевые полосы — шины, уложенные на ребро.

Вследствие узкого паза магнитный поток рассеяния ротора будет замыкаться примерно так, как показано на рис. 10.31, а. Поэтому индуктивность частей сечения обмотки, лежащих глубже в пазу, будет большой. В начале пуска, когда частота тока ротора велика, в этих частях сечения резко сказывается индуктивное сопротивление, ограничивая ток в них. В результате плотность тока по высоте стержней обмотки будет неравномерной (рис. 10.31, б). Происходит вытеснение тока из внутренних слоев обмотки, лежащих ближе к оси ротора, в слои, расположенные у поверхности ротора.

Следовательно, сечение стержней недоиспользуется, что равносильно увеличению активного сопротивления обмотки при пуске, а это дает увеличение пускового момента. С разгоном убывает частота ротора и эффект вытеснения тока с внутренних слоев обмотки уменьшается.

По достижении двигателем номинальной скорости плотность тока по высоте стержней становится практически одинаковой (рис. 10.31, в). Для глубокопазного двигателя обычно

$$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 1,2 \div 1,8; \quad k_r = \frac{I_n}{I_n} = 4 \div 6.$$

Двигатели с двойной клеткой и глубоким пазом изготавливаются на средние и большие мощности. Обладая лучшими по сравнению с короткозамкнутыми пусковыми свойствами, они имеют худшие рабочие характеристики по к.п.д., $\cos\phi$ (на $0,5 + 2\%$) и несколько дороже.

§ 10.13. Рабочие характеристики

Под рабочими характеристиками асинхронного двигателя понимают зависимости ряда величин, определяющих те или иные свойства двигателя, от полезной мощности P_2 , развиваемой на валу двигателя, при постоянном приложенном напряжении сети. К таким величинам относятся скорость вращения n_2 или скольжение s , вращающий момент M , коэффициент мощности $\cos\phi$, к.п.д. η и ток статора I_1 .

Примерный график указанных зависимостей для двигателя нормального исполнения изображен на рис. 10.32. Кратко поясним их.

Зависимость $n_2 = F(P_2)$ или $s = F(P_2)$. Эта зависимость называется скоростной характеристикой.

При холостом ходе ($P_2 = 0$) скорость вращения n_2 близка к синхронной n_1 (скольжение близко к нулю). С увеличением нагрузки скорость вращения уменьшается, скольжение растет соответственно отношению $s = \frac{P_{2\text{пр}}}{P_{2\text{эл}}}$ (формула 1.33). Из соображений обеспечения высокого к.п.д. это отношение ограничивается узкими пределами. Обычно при $P_2 = P_n$ скольжение $s = 1,5 \div 5\%$. Соответственно $n_2 = F(P_2)$ представляет собой слабо наклонную к оси абсцисс кривую.

Моментная характеристика $M = F(P_2)$. Так как скорость вращения двигателя в рабочем диапазоне нагрузок изменяется очень незначительно, то зависимость $M = F(P_2)$ оказывается весьма близкой к линейной.

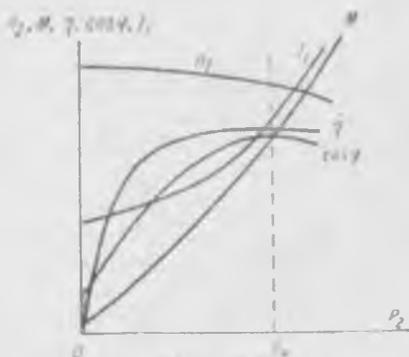


Рис. 10.32

Зависимость $\cos \varphi = F(P_2)$. Вследствие наличия в магнитной цепи двигателя воздушного зазора ток статора содержит сравнительно большую реактивную составляющую. Это влияет на коэффициент мощности. Поэтому $\cos \varphi$ асинхронного двигателя всегда меньше единицы. Наибольшее его значение (0,8—0,9) имеет место при номинальной нагрузке. С уменьшением нагрузки он резко убывает, достигая при холостом ходе значений 0,15—0,2. Недогруженный асинхронный двигатель имеет низкий коэффициент мощности.

Зависимость $\eta = F(P_2)$. К.п.д. асинхронного двигателя имеет максимальное значение при номинальной или близкой к ней нагрузке ($P_2 \approx P_n$). При этом он достаточно высок.

Важно отметить, что при нагрузках $P_2 = (0,25—1,25)P_n$ изменения к.п.д. незначительны. Это означает, что в довольно большом диапазоне нагрузок двигатель работает экономично с к.п.д., близким к максимальному.

Зависимость $I_1 = F(P_2)$. Согласно формуле (10.25), ток статора

$$I_1 = I_0 + (-I_2')$$

состоит из значительной намагничивающей составляющей I_0 , которая почти не зависит от нагрузки, и составляющей $-I_2'$, уравнивающей нагрузку ротора. Главным образом за счет I_0 асинхронный двигатель при отсутствии нагрузки потребляет сравнительно большой ток холостого хода $I_{хх}$. Он может быть более 50% номинального. С ростом нагрузки ток статора возрастает.

Кроме перечисленных, к рабочим характеристикам относятся также перегрузочную способность двигателя и его механическую характеристику, которые рассмотрены в § 10.10.

§ 10.14. Регулирование скорости вращения

Из формулы скорости ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{f_1 60}{p}(1 - s)$$

вытекает, что при заданном моменте нагрузки M_c ее можно изменять путем изменения частоты f_1 , скольжения s или числа пар полюсов p .

Так как асинхронный двигатель обычно получает питание от сети переменного тока постоянной частоты ($f_1 = \text{const}$), то регулирование изменением частоты требует для питания двигателя отдельного источника регулируемой частоты, что удорожает установку. Поэтому такой способ применяется очень редко. Чаще используют два других способа регулирования.

Изменение скольжения. Наиболее просто регулирование скорости изменением скольжения осуществляется в двигателе

с контактными кольцами с помощью регулировочного реостата, вводимого в цепь ротора аналогично пусковому (см. рис. 10.27). При заданном $M_c = \text{const}$ и при отсутствии добавочного сопротивления в цепи ротора ($r_d = 0$) скорость вращения ротора (и скольжение) определится точкой *a* пересечения линии M_c и механической характеристики *l* (рис. 10.33).

Если в цепь ротора ввести реостат, то изменится механическая характеристика. Она примет вид кривой 2. Соответственно установившаяся скорость вращения определится точкой *b* и ста-

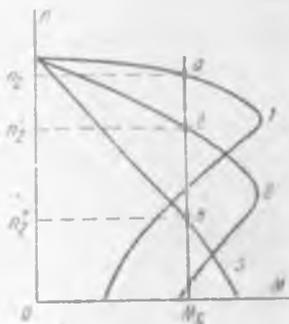


Рис. 10.33

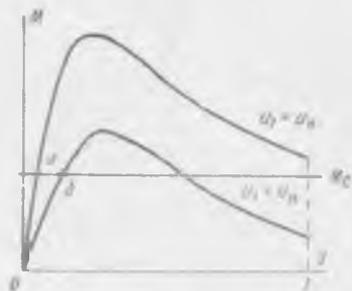


Рис. 10.34

нет равной n_2 . При увеличении сопротивления регулировочного реостата еще больше возрастет скольжение и уменьшится скорость (точка *b* и скорость n_2).

Таким образом, регулирование скорости ведется от номинальной в сторону уменьшения. При большом числе ступеней регулировочного реостата обеспечивается практически плавное регулирование в широком диапазоне. Мощность, потребляемая двигателем от сети, остается постоянной независимо от скорости. Полезная же мощность на валу вследствие уменьшения скорости ($M_c = \text{const}$) снижается. Следовательно, к.п.д. двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M \cdot \Omega_2}{P_1} = \frac{M \cdot \pi \cdot n_2}{P_1 \cdot 30} \equiv n_2$$

уменьшится пропорционально снижению скорости вращения.

Поэтому такой способ регулирования является неэкономичным. Из соображений экономичности диапазон регулирования обычно ограничивают скоростями от 100 до 70% номинальной. Кроме того, с уменьшением скорости смягчается механическая характеристика, т. е. малые изменения момен-

та нагрузки будут сопровождаться большими колебаниями скорости вращения. Для некоторых механизмов это нежелательно. Этот способ регулирования получил, однако, широкое применение в крановом оборудовании.

Изменения скольжения и скорости при $M_c = \text{const}$ в небольшом диапазоне можно достичь также изменением подведенного напряжения U_1 (рис. 10.34, точки *a* и *б*). Так как момент, в том числе и критический, пропорционален квадрату напряжения, то при этом резко снижается перегрузочная способность и устойчивость работы двигателя.

Изменение числа пар полюсов статора. Этот способ применим для двигателей короткозамкнутых. Число пар полюсов

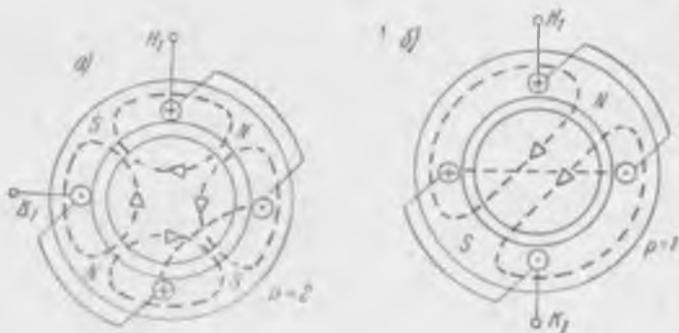


Рис. 10.35

определяется конструкцией и схемой укладки обмотки статора (см. § 10.3). Для двигателя нормального изготовления число пар полюсов является величиной постоянной, поэтому обычный короткозамкнутый двигатель не регулируется.

Однако при специальном изготовлении обмотки статора оказывается возможным путем ее переключения (изменение схемы) изменять число пар полюсов и соответственно скорость вращения. Наиболее простая схема переключения числа пар полюсов обмотки получается при отношении скоростей вращения 1 : 2; переключение для одной фазы (чтобы не затемнять чертеж) иллюстрируется рис. 10.35, *a*, *б*.

Применяются также двигатели с одной или двумя независимыми обмотками статора, позволяющими путем переключения получить четыре различных числа пар полюсов. Тогда двигатель будет четырехскоростным (например, на синхронные скорости 1500, 1000, 750, 500 *об/мин*). При регулировании скорости изменением числа пар полюсов к. п. д. двигателя практически не изменяется. Достоинством является также то, что при работе на различных скоростях двигатель сохраняет

жесткую механическую характеристику (рис. 10.36, кривые 1 и 2).

Недостатки этого способа регулирования — усложнение и удорожание двигателя, ограниченный диапазон и ступенчатое изменение скорости.

Многоскоростные короткозамкнутые двигатели применяются для привода вентиляторов, металлорежущих станков и т. п. Многоскоростные двигатели с контактными кольцами не изготавливаются.

Возможны и другие способы регулирования скорости асинхронных двигателей. Однако применяются они очень редко и здесь не рассматриваются.



Рис. 10.36

В целом по регулировочным свойствам асинхронные двигатели уступают двигателям постоянного тока (см. гл. 12).

§ 10.15. Генераторный режим асинхронной машины

Если ротору асинхронной машины, подключенной к сети переменного тока, за счет внешней механической силы придать скорость вращения больше синхронной, то его скольжение станет отрицательным, так как $n_2 > n_1$. По сравнению с обычным двигательным режимом, когда ротор отстает от поля, магнитный поток будет пересекать обмотку ротора в противоположном направлении. Изменится направление э. д. с. ротора E_2 и тока ротора I_2 . Соответственно условию магнитного равновесия изменится величина и фаза составляющей тока статора — I_2' (10.25).

Активная составляющая тока статора $I_1 \cos \varphi_1$ станет при этом отрицательной, машина перейдет в генераторный режим и будет выдавать электрическую энергию в сеть за счет подводимой к ротору механической. Электромагнитный момент от взаимодействия тока ротора с магнитным полем $M = C\Phi I_2 \cos \varphi_2$ также изменит направление и по отношению к моменту внешней механической силы окажется тормозным. Характер зависимости момента от скольжения для асинхронного генератора остается таким же, как и для двигателя. Асинхронный генератор, отдавая в сеть активную энергию, берет от сети реактивную, которая необходима для создания магнитного поля.

Поэтому при автономном использовании асинхронного генератора необходимо принимать меры для его возбуждения. Для этой цели может быть использовано явление самовозбуждения от остаточного потока ротора с помощью конденсаторов, которые подключаются параллельно обмотке статора.

Асинхронный генератор как источник энергии переменного тока распространения не получил. Генераторный режим асинхронной машины имеет практический интерес, однако, для ряда специальных случаев, как например для целей рекуперативного торможения асинхронных двигателей.

§ 10.16. Электрическое торможение асинхронного двигателя

При наличии значительного момента инерции вращающихся масс ротора и механизма время от выключения двигателя до его полной остановки может оказаться достаточно большим. Часто возникает необходимость сократить время остановки. С этой целью прибегают к торможению двигателя. Торможение также требуется в случаях, когда момент нагрузки становится движущим (например, в подъемных механизмах при спуске груза или транспортных установках при движении под уклон). Для электрического торможения асинхронных двигателей обычно используются три метода.

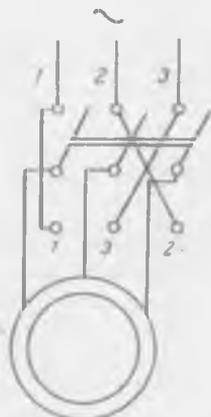


Рис. 10.37

Торможение противоключением. Для этого переключают две фазы статора (рис. 10.37), вследствие чего изменится направление вращения поля. Ротор в силу инерции сохранит прежнее направление вращения и, следовательно, будет вращаться против поля. Двигатель перейдет в режим электромагнитного тормоза. Скорость вращения ротора по отношению к скорости поля окажется отрицательной, скольжение резко возрастет и превысит единицу. В начальный момент после переключения, поскольку $n_2 \approx n_1$,

$$s = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} \approx 2.$$

Таким образом, в режиме электромагнитного тормоза $s > 1$. Вращающий момент двигателя, направленный в сторону поля, по отношению к моменту сил инерции будет тормозным, его влияние сократит время остановки. По мере уменьшения скорости ротора в режиме тормоза убывает скольже-

ние. Когда скольжение s станет равным единице, заканчивается тормозной режим. Двигатель при этом должен быть отключен от сети. Если этого не сделать, он развернется в противоположном направлении.

Используя формулу вращающего момента (10.35) и подставляя в нее значения $s > 1$, получим тормозной момент машины. Тормозная характеристика является продолжением механической характеристики двигателя $M = F(s)$ в область $s > 1$ (рис. 10.38).

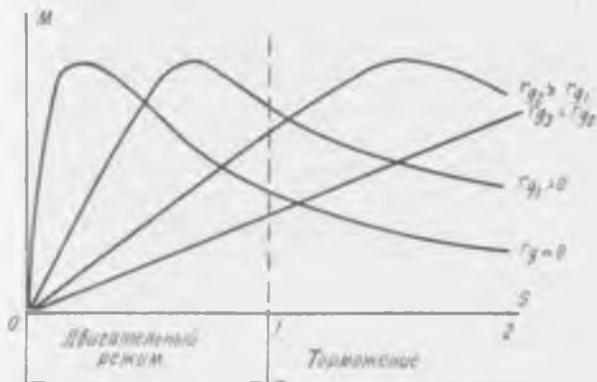


Рис. 10.38

Для двигателя короткозамкнутого, а также для двигателя с контактными кольцами без добавочного сопротивления в цепи ротора тормозная характеристика описывается кривой для $r_d = 0$ на участке $s > 1$. Как видно, тормозной момент сравнительно невелик. Кроме того, при противовключении значительно возрастают токи в роторе и статоре. У двигателя с контактными кольцами вводом в цепь ротора регулировочного реостата достигается снижение токов ротора и статора при одновременном увеличении тормозного момента (рис. 10.38, кривые для $r_{d1} > 0$). С помощью реостата оказывается возможным регулирование тормозного момента и соответственно эффективности торможения.

Использование такого двигателя с регулировочным реостатом в роторе в подъемных механизмах обеспечивает возможность регулирования скорости вращения как при спуске груза (режим электромагнитного тормоза), так и при подъеме (режим двигателя). При этом нет надобности переключать цепь статора для изменения направления поля. Перевод с двигательного режима в режим тормоза и наоборот осуществляется изменением сопротивления регулировочного реостата.

Так как в режиме электромагнитного тормоза $s > 1$, то мощность потерь в роторе (10.31) $P_{\text{э-р}} = P_{\text{эм}} s$ больше электромагнитной мощности машины $P_{\text{эм}}$, передаваемой ротору статором. Разность $P_{\text{э-р}} - P_{\text{эм}} = P_{\text{эм}}(s - 1)$ покрывается за счет кинетической энергии движущихся масс.

Динамическое торможение. При этом методе торможения статор двигателя отключается от сети переменного тока и включается в сеть постоянного тока, который создает постоянное магнитное поле статора. В проводниках вращающегося за счет сил инерции ротора будет индуцироваться э.д.с. и ток. Тормозной момент создается взаимодействием тока ротора и магнитного поля статора. Регулирование тормозного момента производится изменением величины постоянного тока статора или изменением сопротивления цепи ротора (у двигателя с контактными кольцами). Энергия, запасенная в движущихся массах, при таком торможении частично преобразовывается в электрическую и выделяется в виде потерь в цепи ротора.

Недостатком динамического торможения является уменьшение тормозного момента с уменьшением скорости вращения (до нуля при неподвижном роторе).

Рекуперативное торможение асинхронного двигателя. При его осуществлении асинхронная машина переводится из двигательного в генераторный режим. Для этого необходимо, чтобы скорость вращения ротора стала выше синхронной. Такая возможность возникает в случае повышения скорости вращаемого двигателем механизма за счет появления отрицательного момента сопротивления, как это бывает, например в транспортных установках при движении под уклон, в подъемных — при спуске груза и т. п.

В многоскоростном двигателе перевод в генераторный режим происходит при увеличении числа пар полюсов для уменьшения скорости вращения. За время работы машины в генераторном режиме, пока скорость ротора сравняется с синхронной, часть кинетической энергии движущихся масс преобразовывается в электрическую и возвращается в сеть, что является достоинством этого метода торможения. Крупный недостаток состоит в том, что его нельзя применить при скоростях вращения ротора, меньших синхронной.

Задачи. 10.12. Асинхронный короткозамкнутый двигатель А62-2 имеет следующие данные: $P_{\text{н}} = 20$ квт, $U_{\text{н}} = 380$ в, $\eta = 87,5\%$, $\cos \varphi = 0,89$, $k_{\tau} = \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}$
 $= 7$, $k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{н}}} = 1,3$, $n_2 = 2930$ об/мин.

Определить пусковой момент и пусковой ток двигателя.

Решение. Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{н}} = 975 \frac{P_{\text{н}}}{n_2} = 975 \cdot \frac{20}{2930} = 6,65 \text{ кгМ}$$

Пусковой момент

$$M_{пн} = M_n \cdot k_{пн} = 6,65 \cdot 1,3 = 8,64 \text{ кгм.}$$

Номинальный ток

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{20 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,875} = 39,6 \text{ а.}$$

Пусковой ток

$$I_{пн} = I_n k_t = 39,6 \cdot 7 = 277 \text{ а.}$$

10.13. Как изменятся пусковой момент и ток двигателя А62-2, рассмотренного в примере 10.12, если на время пуска напряжение снизить на 20%.
Решение. Пусковой момент пропорционален U^2 , поэтому

$$M_{пн1} = 0,8^2 M_{пн} = 0,64 \cdot 8,64 = 5,5 \text{ кгм}$$

(снижение на 34%).

Пусковой ток можно считать пропорциональным напряжению U . Следовательно, он снизится на 20% и будет равен

$$I_{пн1} = I_{пн} \cdot 0,8 = 277 \cdot 0,8 = 221 \text{ а.}$$

Вопросы для самопроверки

По каким показателям оцениваются пусковые свойства двигателя?

Достоинства и недостатки прямого пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Достоинства и недостатки пуска в ход двигателей на пониженном напряжении.

Как пускаются в ход двигатели с контактными кольцами? Дайте общую оценку их пусковых свойств.

Устройство ротора двигателя с двойной клеткой. Оцените его пусковые свойства.

Как влияет на пусковые свойства глубокопазный ротор? Область применения двигателей с двойной клеткой и глубоким пазом ротора.

Что понимается под рабочими характеристиками двигателя? Характер этих зависимостей для асинхронного двигателя.

Как осуществляется регулирование скорости вращения изменением скольжения? Возможность и оценка этого способа регулирования.

Как осуществляется изменение числа пар полюсов асинхронного двигателя? Возможности и оценка способа регулирования изменением числа пар полюсов.

Условие перехода асинхронного двигателя в генераторный режим. Практическое значение такого режима.

Какие возможные способы торможения асинхронного двигателя? Их оценка и практическое значение.

§ 10.17. Некоторые другие режимы использования асинхронной машины

Индукционный регулятор напряжения. Таким регулятором может служить асинхронная машина с заторможенным фазным ротором. Обмотки статора и ротора соединяются между собой электрически и включаются в сеть трехфазного тока (рис. 10.39, а).

Последний в роторе создает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует в обмотках статора и ротора э. д. с. На

выходе обмотки статора напряжение U_2 равно геометрической сумме подведенного напряжения U_c и э. д. с. статора E_1 . Так как при повороте ротора фаза э. д. с. E_1 изменяется, то при этом будет изменяться и выходное напряжение $U_2 = U_c + E_1$ от $U_2 = U_c - E_1^*$ до $U_2 = U_c + E_1^*$ (рис. 10.39, б).

Геометрическим местом концов векторов E_1 и U_2 будет окружность. Наряду с изменением величины U_2 происходит также изменение его фазы в пределах угла α . Имеются конструкции индукционных регуляторов, дающие регулируемое напряжение U_2 без изменения его фазы.

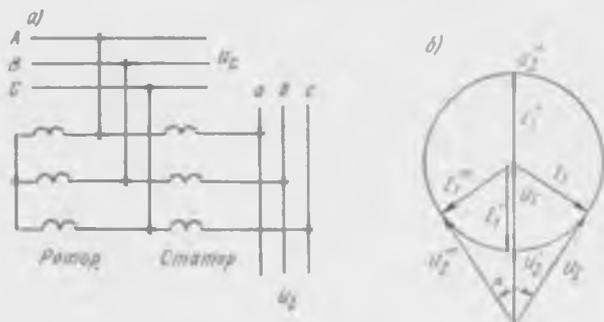


Рис. 10.39

Механизм, с помощью которого затормаживается ротор, должен обеспечивать поворот последнего в пределах 360° . Обычно для этой цели используется червячная пара.

Поскольку при неподвижном роторе регулятора условия вентиляции хуже, чем у двигателя, то необходимо или снизить токовые нагрузки, или интенсифицировать охлаждение.

Фазорегулятор. Если в трехфазную сеть включить заторможенную асинхронную машину с фазным ротором только одной из обмоток, например статора (рис. 10.40), то, как и в предыдущем случае, в обмотке ротора вращающимся полем будет индуцироваться э. д. с. Величина э. д. с. обмоток будет постоянной при постоянном вращающемся потоке, а фаза определяется положением ротора. При повороте ротора оказывается возможным регулировать фазу выходного напряжения U_2 с обмотки ротора в пределах всего периода, т. е. 360° . Фазорегуляторы применяются в измерительных схемах, в схемах автоматики и других случаях тогда, когда требуется в широких пределах регулировать фазу напряжения без изменения его величины.

Асинхронный преобразователь частоты. Асинхронный двигатель с контактными кольцами может быть использован в

качестве преобразователя частоты переменного тока. Для этого обмотка статора АД включается в сеть трехфазного тока, а ротор за счет постороннего двигателя Д вращается в сторону, противоположную вращающемуся полю статора (рис. 10.41). Скользящее сопротивление ротора в данном режиме больше единицы и при скорости, близкой к синхронной $s \approx 2$, а частота э.д.с. ротора при этом $f_2 = f_1 s > f_1$ и равна приблизительно удвоенной частоте сети.

Таким образом, на выходе обмотки ротора будет переменное напряжение с частотой $f_2 > f_1$. При регулировании скорости постороннего двигателя оказывается возможным регули-

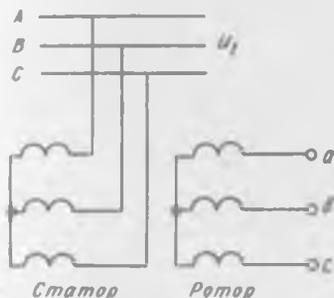


Рис. 10.40

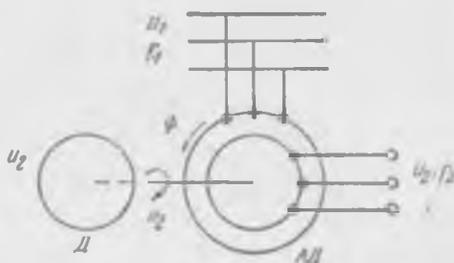


Рис. 10.41

рование частоты f_2 . Мощность ротора в данном режиме частично покрывается за счет мощности питающей сети и частично за счет постороннего двигателя Д. Асинхронные преобразователи частоты применяются для питания установок повышенной частоты, как например высокоскоростных двигателей (более 3000 об/мин), необходимых для отдельных видов оборудования.

Вопросы для самопроверки

- Как работает асинхронный регулятор напряжения?
- Принцип работы асинхронной машины в качестве фазорегулятора.
- Как работает асинхронный преобразователь частоты?

§ 10.18. Однофазный двигатель

В статоре такого двигателя размещается лишь одна обмотка, питаемая однофазным переменным током. Ротор обычный, короткозамкнутый. При питании статора однофазным током создается переменное, пульсирующее, а не вращающееся поле. Пронизывая обмотку ротора, оно индуцирует в ней

э. д. с. и ток подобно тому, как это имеет место во вторичной обмотке трансформатора.

На рис. 10.42 показано направление тока в проводниках ротора для момента времени, когда поток, создаваемый статором, нарастает. Электромагнитные силы от взаимодействия токов ротора с магнитным полем (правило левой руки) уравновесят друг друга и результирующий момент ротора будет равен нулю.

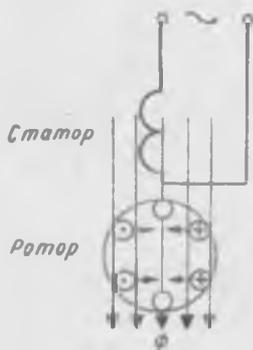


Рис. 10.42

Таким образом, однофазный асинхронный двигатель не создает собственного начального или пускового момента, он не может самостоятельно развернуться. Однако если за счет внешней силы ротор развернуть в какую-либо сторону, то он начнет развивать свой вращающий момент и может быть нагружен, продолжая работать самостоятельно.

Для объяснения этих свойств однофазного двигателя представим пульсирующий поток, который создается однофазной обмоткой статора, в виде двух вращающихся в противоположные стороны с синхронной скоростью потоков Φ_1 и Φ_2 (рис. 10.43). При этом

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi_m}{2}, \quad (10.42)$$

где Φ_m — амплитуда действительного, пульсирующего, потока.

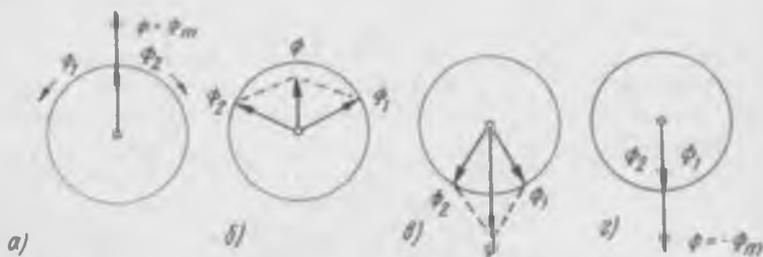


Рис. 10.43

Действительный поток Φ в любой момент времени равен векторной сумме вращающихся потоков Φ_1 и Φ_2 :

$$\Phi = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2. \quad (10.43)$$

Это подтверждается сравнением рис. 10.43, а, б, в, г, на которых показаны изменения величины действительного потока в зависимости от положения вращающихся потоков Φ_1 и Φ_2 за время одного полупериода для двухполюсного статора.

Следовательно, мы можем представлять себе статор однофазного двигателя, как наложение друг на друга двух трехфазных с различным направлением вращения их полей. Каждый из вращающихся потоков Φ_1 и Φ_2 индуцирует в роторе свой ток, который, взаимодействуя с полем, создает свой момент.

В соответствии с (10.33):

$$M_1 = C\Phi_1 I_1 \cos\psi_1; \quad (10.44)$$

$$M_2 = C\Phi_2 I_2 \cos\psi_2, \quad (10.45)$$

где M_1 — вращающий момент, создаваемый потоком Φ_1 ;

M_2 — вращающий момент, создаваемый потоком Φ_2 ;

I_1, I_2 — токи ротора от полей Φ_1 и Φ_2 ;

ψ_1, ψ_2 — фазовый сдвиг относительно э. д. с. ротора E_1 и E_2 .

Когда ротор неподвижен, он оказывается в одинаковых условиях по отношению к вращающимся потокам Φ_1 и Φ_2 . Поэтому моменты M_1 и M_2 уравниваются и результирующий равен нулю. Двигатель не может сам развернуться. Если же ротор вращается, то равновесие моментов M_1 и M_2 нарушится. Будет преобладать момент от потока, в сторону которого развернут ротор.

Это следует из того, что скольжение вращающегося ротора относительно потоков Φ_1 и Φ_2 будет различным. Предположим, ротор развернули в сторону Φ_1 . Назовем это поле прямым соответственно Φ_2 , против которого вращается ротор — обратным.

Относительно прямого поля Φ_1 скольжение

$$s_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 1.$$

Для обратного поля

$$s_2 = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} > 1.$$

Токи I_1 и I_2 , следовательно, будут отличаться по частоте. Частота тока I_2 велика, близка к удвоенной частоте сети. Индуктивное сопротивление ротора этому току (оно пропорционально частоте) значительно больше активного, и ток от обратного поля будет почти чисто реактивным, а момент M_2 , создаваемый им, небольшой. С увеличением скорости скольжение относительно обратного поля также растёт, и момент M_2 уменьшается. В то же время скольжение s_1 убывает, а момент от прямого поля M_1 , как и в обыкновенном трехфазном двигателе, возрастает (рис. 10.44). За счет преобладающего момента от прямого поля осуществляется работа двигателя. Его момент

$$M_{\text{дв}} = M_1 - M_2. \quad (10.46)$$

Для получения собственного пускового момента необходимо на время пуска создать вращающееся поле. С этой целью в статоре предусматривается вспомогательная обмотка 2, смещенная пространственно относительно основной 1 на угол, равный 90 электрическим градусам. Ее включают в ту же сеть через фазосдвигающий элемент — конденсатор, активное сопротивление (рис. 10.45). За счет такого элемента достигается сдвиг по фазе тока этой обмотки по отношению к току основной обмотки примерно на четверть периода.

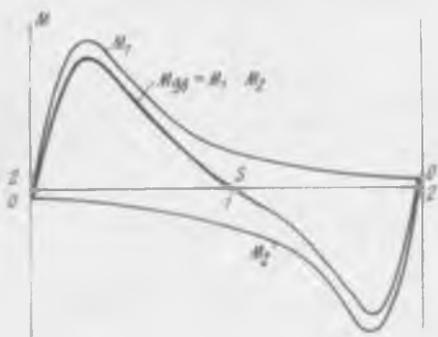


Рис. 10.44

Два тока, смещенные по фазе и протекающие по двум пространственно смещенным обмоткам, создают вращающееся магнитное поле. При этом двигатель будет развивать собственный пусковой момент. Так как вспомогательная обмотка

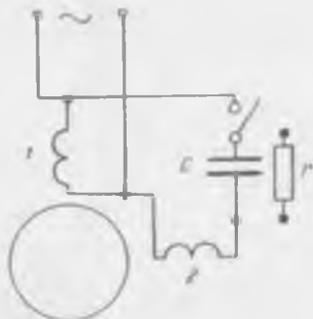


Рис. 10.45

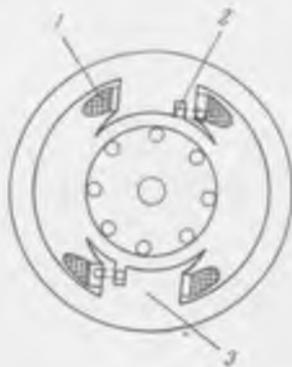


Рис. 10.46

рассчитывается на кратковременный режим пуска, то после разгона ее отключают, и двигатель продолжает работать как чисто однофазный. Есть также двигатели, у которых дополнительная обмотка 2 делается короткозамкнутой, в виде одного или нескольких витков, охватывающих часть полюсного наконечника. Характерной особенностью такого двигателя являются явно выраженные полюса 3 и сосредоточенная обмотка

статора 1 (рис. 10.46). Каждый полюс делится на две неравные части осевым пазом. Меньшая часть охватывается короткозамкнутым витком 2.

За счет индуктированного тока в короткозамкнутом витке поток в экранированной части полюса будет отставать по фазе от потока через неэкранированную часть. Так как они смещены пространственно, то этим обеспечивается вращение магнитного поля в направлении от неэкранированной части полюса к экранированной.

Однофазные двигатели имеют значительно худшие экономические показатели, чем трехфазные. Поэтому они изготавливаются на небольшие мощности и применяются главным образом для привода бытовых приборов. Из рассмотрения принципа работы однофазного двигателя вытекает, что если у работающего трехфазного двигателя произойдет обрыв одной фазы, то он перейдет в режим однофазного и будет продолжать работать как однофазный. При этом возрастет ток в оставшихся в работе фазах и при полной нагрузке двигатель будет перегреваться. Во избежание перегрева защита должна в таких случаях автоматически отключать двигатель от сети.

В случае пуска трехфазного двигателя на двух фазах он не берет с места, у него отсутствует начальный пусковой момент. При необходимости, однако, возможно использование трехфазного двигателя в качестве однофазного. Для этого обмотка статора свободной фазы включается через фазосдвигающий элемент вместо пусковой. Нагрузка при работе в однофазном режиме не должна превышать 70% номинальной.

В последнее время получают распространение так называемые конденсаторные однофазные двигатели, которые имеют в статоре две обмотки, смещенные пространственно на 90 электрических градусов. Одна из них включается последовательно с конденсатором для получения фазового сдвига между токами в обмотках. В отличие от пусковой схемы двигателя со вспомогательной обмоткой (см. рис. 10.45) обе обмотки статора остаются включенными не только при пуске, но и при нагрузке.

Соответствующим подбором обмоточных данных и емкости конденсатора оказывается возможным для определенных нагрузок получить круговое вращающееся поле. Обычно это достигается при номинальной нагрузке. При других нагрузках поле будет эллиптическим. Если преследуется цель получить больший пусковой момент, то стремятся получить круговое поле при пуске.

Такие двигатели могут питаться от двухфазной сети, поэтому их еще называют двухфазными. В этом случае отпадает необходимость в конденсаторе. При симметричном двухфазном питании поле будет круговым независимо от нагрузки.

Конденсаторные двигатели имеют выше к. п. д. и коэффициент мощности $\cos\varphi$ по сравнению с обычными однофазными. По своим свойствам они приближаются к трехфазным.

§ 10.19. Асинхронные микромашины для систем автоматического управления

Автоматизация производственных процессов требует производства в большом количестве самых различных средств автоматизации. К их числу относятся также асинхронные электрические машины, которые широко используются в раз-

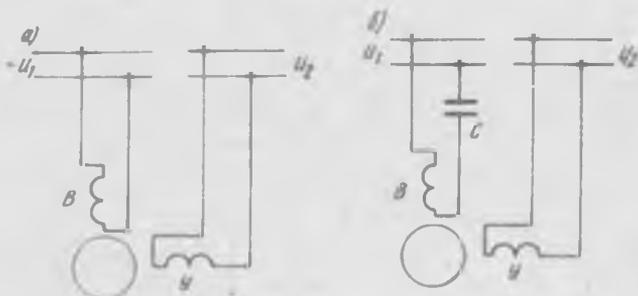


Рис. 10.47

нообразных системах автоматического управления. Обычно номинальная мощность таких машин исчисляется долями ватта или долями киловатта. Поэтому они получили название асинхронных микромашин.

В зависимости от назначения и условий работы к микромашинам предъявляются особые требования в отношении скорости вращения, пусковых и регулировочных свойств, быстродействия и т. п. Принцип их работы во многом такой же, как и для обычных асинхронных машин. Поэтому здесь обратим внимание лишь на некоторые особенности их рабочего процесса и конструктивного исполнения.

Управляемые двухфазные двигатели. Они предназначены для преобразования подводимого к ним электрического сигнала (управляющего напряжения) в механическое перемещение вала.

Выполняются они подобно однофазному конденсаторному двигателю с двумя, смещенными на 90° электрических градусов, обмотками статора. Одна из них подключается на постоянное напряжение U_1 , ее называют обмоткой возбуждения (В, рис. 10.47, а). Ко второй, она называется обмоткой управления (У, рис. 10.47), подводится напря-

жение управления U_2 , величина и фаза которого связаны с сигналом управления. Управление двигателем производится путем изменения величины U_2 (амплитудное управление), фазы U_2 (фазовое управление) или одновременным изменением величины и фазы U_2 (амплитудно-фазовое управление). Чаще всего управление осуществляется изменением величины напряжения управления U_2 . В этом случае обмотка возбуждения B включается последовательно с конденсатором C (см. рис. 10.47, б).

Такой двигатель должен иметь устойчивую механическую характеристику на всем диапазоне скоростей от $n=0$ ($s=1$) до скорости холостого хода, близкой к синхронной. Кроме того, при снятии напряжения управления ротор должен останавливаться. Эти требования удовлетворяются, если ротору придать большое активное сопротивление так, чтобы критическое скольжение,

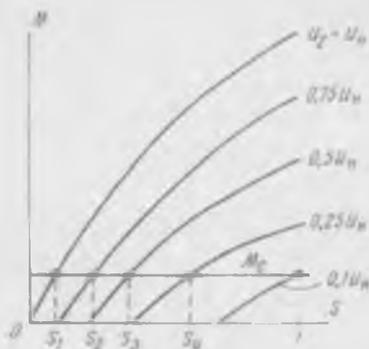


Рис. 10.48

при котором двигатель развивает максимальный момент, было больше единицы ($s_k > 1$). При этом левая устойчивая часть механической характеристики пройдет через всю область скольжений от $s=0$ до $s=1$. При снятии напряжения управления двигатель переходит в режим работы чисто однофазного. Однако в отличие от его вследствие большого активного сопротивления ротора момент от обратного поля M_2 оказывается больше момента от прямого поля M_1 (см. § 10.18). Поэтому момент двигателя $M_{дв} = M_1 - M_2$ становится отрицательным, что вызывает быструю остановку ротора. Работать в чисто однофазном режиме он не может.

На рис. 10.48 представлены его механические характеристики $M = F(s)$ при различных величинах напряжения управления. Из рисунка видно, что при заданном моменте сопротивления M_c изменением напряжения U_2 можно получить любую скорость вращения в диапазоне скольжений от s , близкого к нулю, до $s=1$. С увеличением нагрузки регулировочный диапазон уменьшается. Управляемые двигатели должны быстро реагировать на изменение напряжения, они должны быть в состоянии, в частности, развивать большое ускорение ротора при подаче напряжения на обмотку управления. Для этого необходимо, чтобы момент инерции ротора был как можно малым.

С целью увеличения быстродействия ротор управляемых

двигателей часто делается полым из легкого немагнитного материала (сплава алюминия, латуни).

На рис. 10.49 изображен управляемый двигатель с полым немагнитным ротором. Он имеет два закрепленных в корпусе 1 сердечника статора — внешний 2 с пазами для обмоток 3 и внутренний 4. Между ними размещается полый цилиндрический ротор 5, закрепленный на валу 6. Толщина стенки цилиндра ротора от 0,2 до 1 мм в зависимости от мощности двигателя. Зазор между ротором и сердечниками статора около 0,2 мм. Иногда обмотки статора размещаются на внутреннем сердечнике. Вследствие того что на пути магнитного потока оказывается сравнительно большой немагнитный участок, для

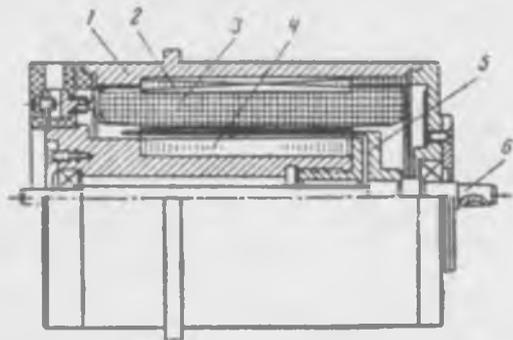


Рис. 10.49

таких двигателей характерны большой ток холостого хода до 0,9 от номинального, низкие коэффициент мощности и к. п. д.

Асинхронный тахогенератор. Асинхронный тахогенератор служит для преобразования механического вращения в электрический сигнал и применяется в системах автоматики в качестве тахометрического устройства. Наибольшее распространение получили асинхронные тахогенераторы с полым ротором, которые в конструктивном отношении подобны управляемым двухфазным двигателям с полым ротором (см. рис. 10.49). Одна из обмоток статора (обмотка возбуждения) включается в сеть с постоянным напряжением и частотой, вторая — на внешнее нагрузочное сопротивление приемного устройства (рис. 10.50). Обычно вторая обмотка размещается на внутреннем сердечнике статора, который снабжается специальным приспособлением, позволяющим в небольших пределах регулировать угол между осями обмоток путем углового перемещения внутреннего сердечника. Своим валом тахогенератор жестко соединяется с валом механизма, за скоростью которого осуществляется контроль.

Принцип работы асинхронного тахогенератора поясним на рис. 10.50. Обмотка возбуждения B создает пульсирующее магнитное поле, которое, пронизывая ротор, индуцирует в нем э. д. с. так же, как во вторичной обмотке трансформатора. Назовем ее трансформаторной э. д. с. Ее направление для момента времени, когда поток Φ_B нарастает в указанном на рисунке направлении, показано знаками «плюс» и «точка» вдоль внешней образующей цилиндра ротора. Ток, вызываемый трансформаторной э. д. с., создает свой поток Φ_P , который будет противодействовать потоку Φ_B . Результи-

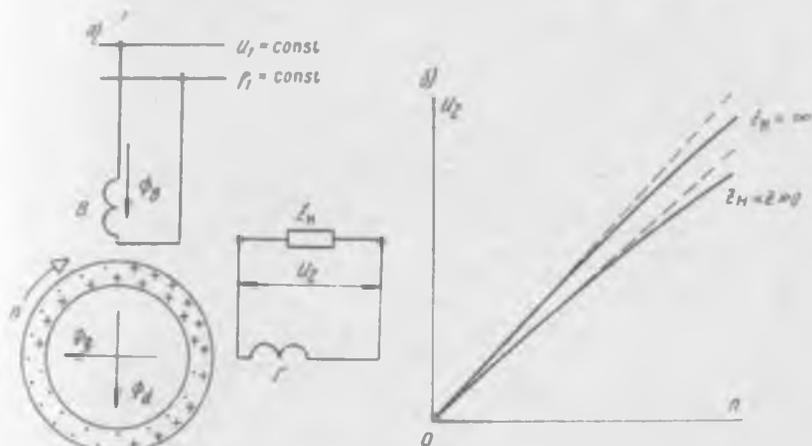


Рис. 10.50

рующий поток $\Phi_B + \Phi_P = \Phi_d$ будет по отношению к обмотке возбуждения продольным, он направлен по ее оси. В обмотке возбуждения он индуцирует электродвижущую силу, которая ограничивает ток в ней. Результирующий поток перпендикулярен оси обмотки G , замыкается помимо и не индуцирует в ней никакой э. д. с. Поэтому при неподвижном роторе, когда в машине действует лишь результирующий поток $\Phi_B + \Phi_P = \Phi_d$, напряжение U_2 на выходе тахогенератора равно нулю.

Если ротор вращается, то в нем помимо трансформаторной э. д. с. будет индуцироваться э. д. с. вращения. Соответственно правилу правой руки ее направление для того же момента времени показано на рис. 10.50, а точками и плюсами вдоль внутренней образующей ротора. Она будет переменной с такой же частотой как и частота сети; по величине она пропорциональна скорости вращения ротора. Э. д. с. вращения вызовет в роторе свой ток, который направлен так

же, как и э. д. с. (индуктивность ротора ничтожно мала). Он создает поперечный поток Φ_q , направленный вдоль оси обмотки G . Поток Φ_q индуцирует в обмотке G э. д. с. E_2 . При ненасыщенной магнитной цепи Φ_q пропорционален току ротора от э. д. с. вращения.

Следовательно, при $U_1 = \text{const}$ э. д. с. E_2 и напряжение на выходе тахогенератора U_2 будут пропорциональны скорости вращения ротора. Основной характеристикой тахогенератора является зависимость U_2 от скорости вращения ротора n .

Она приведена на рис. 10.50, б. Видно, что она несколько отличается от линейной и, кроме того, зависит от величины сопротивления нагрузки z_{II} .

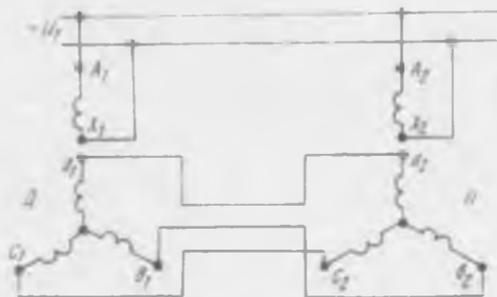


Рис. 10.51

Сельсины. Электрические машины, которые служат для обеспечения согласованного поворота или вращения двух или нескольких механически несвязанных осей, получили название сельсинов. Они применяются для контроля и управления в следящих системах, а также для передачи на расстояние показаний измерительных приборов.

Различают сельсин-датчик и сельсин-приемник. Первый своим валом соединяется с валом механизма, угловое перемещение которого контролируется, второй — повторяет угловые перемещения датчика. Устройство их одинаково и напоминает устройство асинхронной машины, имеющей одну обмотку на статоре и трехфазную обмотку ротора, как у обычных двигателей с контактными кольцами. Статорные обмотки датчика и приемника включаются в одну и ту же сеть однофазного тока. Обмотки их роторов соединяются между собой встречно (рис. 10.51). Обмотки статора создают пульсирующее магнитное поле, за счет которого в обмотках ротора индуцируются переменные э. д. с. Если оба ротора занимают одинаковое положение относительно осей обмоток статора, то э. д. с. в обмот-

ках роторов будут равны. Так как роторные обмотки включены встречно, ток в них при этом отсутствует.

При повороте ротора датчика на некоторый угол нарушится равновесие между э. д. с. обмоток роторов и по ним потечет уравнивающий ток. Последний, взаимодействуя с магнитными полями статоров датчика и приемника, вызовет появление в них вращающего момента. Вращающий момент датчика направлен против направления поворота его ротора. У сельсина-приемника вращающий момент направлен в сторону поворота ротора датчика. Так как ротор датчика соединен механически с задающим механизмом, то происходит поворот сельсина-приемника до тех пор, пока его положение снова не совпадет с положением ротора датчика. Так осуществляется синхронная связь между двумя или несколькими не связанными между собой механическими осями.

Вследствие нагрузки сельсина-приемника полного совпадения положений роторов может и не наступить. Угол, определяющий несовпадение положений роторов датчика и приемника, называют углом рассогласования. От этого угла зависит величина момента, развиваемого ротором сельсина-приемника. Чем больше момент при данном угле рассогласования, тем точнее будет синхронная связь.

Величина угла рассогласования в статическом режиме определяет статическую угловую погрешность сельсина, в зависимости от которой сельсины разделяются на три класса точности: класс 1 допускает погрешность до $0,75^\circ$; класс 2 — до $1,5^\circ$; класс 3 — до $2,5^\circ$. В режиме вращения разность угловых положений роторов датчика и приемника определяет динамическую погрешность.

Сельсины всегда делают двухполюсными, обычно с явно выраженными полюсами статора. Применяются также сельсины, у которых однофазная обмотка размещается на роторе.

Рассмотренный здесь режим работы сельсинов называется индикаторным.

В ряде систем автоматического регулирования оказывается необходимым использование сельсинов в трансформаторном режиме. В этом случае к питающей сети однофазного тока подключается лишь статор сельсина-датчика (рис. 10.52). Пульсирующее поле, создаваемое статором, индуцирует в трехфазной обмотке ротора э. д. с., которые вызывают токи в цепи роторов датчика и приемника. За счет этих токов создается магнитное поле сельсина-приемника. Продольная составляющая магнитного поля сельсина-приемника, т. е. та его часть, которая пронизывает обмотку статора, по величине оказывается зависимой от угла рассогласования роторов датчика и приемника. При $\Theta=0$ (роторы совпадают) она будет наибольшей и равна нулю при $\Theta=\pm 90^\circ$.

Следовательно, переменная э. д. с. E_2 , индуцируемая в обмотке статора сельсина-приемника, будет по своей амплитуде и действующему значению также зависимой от угла Θ . Если задать предварительно для ротора приемника угол $\Theta = 90^\circ$, то с изменением положения ротора датчика на выходе сельсина-приемника появится напряжение U_2 , так как угол Θ станет меньше 90° , и оно будет возрастать до наибольшего значения при $\Theta = 0$.

Это напряжение через усилитель или непосредственно может быть подано на исполнительный управляемый двигатель, за счет которого регулирующий орган рабочей машины

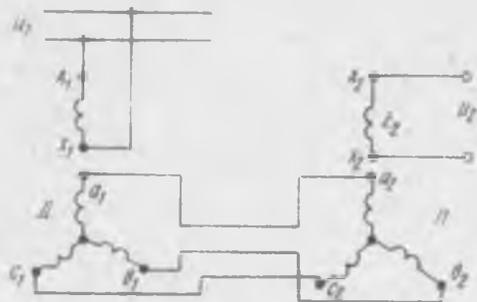


Рис. 10.52

и ротор сельсина-приемника будут приведены в соответствие с новым положением ротора сельсина-датчика.

Таким образом, в трансформаторном режиме ротор сельсина-приемника самостоятельно не совершает угловых перемещений. В обмотке его статора индуцируется э. д. с. E_2 и напряжение U_2 , зависящие от угла рассогласования роторов.

Вопросы для самопроверки

- Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя.
- Как пускаются в ход однофазные двигатели?
- Работа трехфазного двигателя при обрыве одной фазы.
- Каковы особенности конденсаторных однофазных двигателей в сравнении с обычными?
- Область применения асинхронных микромашин.
- Как устроен и работает управляемый двухфазный асинхронный двигатель?
- Требования к управляемым двигателям и как они удовлетворяются.
- Как устроен и работает асинхронный тахогенератор?
- Конструкция сельсинов. Как осуществляется работа сельсинов в индикаторном режиме?
- Что понимается под классом точности сельсинов?
- Принцип работы сельсинов в трансформаторном режиме.

§ 10.20. Типы и каталожные данные асинхронных двигателей отечественного производства

В СССР асинхронные двигатели проектируются и изготавливаются в виде ряда единых серий, охватывающих отдельные диапазоны номинальных мощностей. Помимо основного исполнения, в пределах каждой серии предусматриваются различные модификации, удовлетворяющие специальным требованиям той или иной области применения.

По мощности основные серии разделяются на двигатели до 0,6 *квт*, от 0,6 до 100 *квт* и двигатели мощностью свыше 100 *квт*.

Серия асинхронных двигателей до 0,6 *квт*. Двигатели этой серии изготавливаются трехфазными и однофазными на синхронные скорости 3000 и 1500 *об/мин* и номинальные напряжения трехфазной сети 127/220 и 220/380 *в* и однофазной — 127, 220, 380 *в*.

Принятые условные обозначения двигателей данной серии: АОЛ — трехфазные двигатели; АОЛБ — однофазные с пусковым активным сопротивлением; АОЛГ — однофазные с емкостью в цепи пусковой обмотки; АОЛД — конденсаторные однофазные. Все они изготавливаются в закрытом обдуваемом исполнении. Охлаждение их при работе осуществляется в основном обдувом внешней поверхности статора.

Такое исполнение допускает установку этих двигателей как на открытом воздухе, так и внутри помещений повышенной влажности и содержания пыли. Станина и подшипниковые щиты отливаются из алюминиевого сплава.

Серия трехфазных двигателей А и АО мощностью от 0,6 до 100 *квт*. Эта серия в настоящее время имеет наибольшее распространение. Для нее установлена твердая шкала мощностей: 0,4; 0,6; 1; 1,7; 2,8; 4,5; 7; 10; 14; 20; 28; 40; 55; 75; 100; 125 *квт*. Двигатели этой серии изготавливаются на синхронные скорости 3000, 1500, 1000, 750 *об/мин*. Номинальное напряжение 127/220, 220/380, 500 *в*. Станина литая из серого чугуна, гладкая или ребристая.

Двигатели серии А изготавливаются в защищенном исполнении, обеспечивающем защиту от попадания внутрь механических предметов, капель воды, падающих под углом к горизонту не менее 45°. Их охлаждение осуществляется в основном за счет вентиляции внутренних частей двигателя. Двигатели А нельзя устанавливать в помещениях с большой влажностью, а также в помещениях, содержащих проводящую пыль. Общий вид и схема вентиляции двигателя А представлены на рис. 10.53.

Серия двигателей АО выполняется в закрытом обдуваемом исполнении. Для увеличения поверхности охлаждения станина

таких двигателей делается обычно ребристой. Схема вентиляции и общий вид двигателя серии АО показаны на рис. 10.54.

Помимо двигателей общего назначения, на базе основной серии А и АО электропромышленность поставляет ряд модификаций асинхронных двигателей, учитывающих специальные требования отдельных видов оборудования. К таким модификациям относятся: короткозамкнутые двигатели с повышенным пусковым моментом (АП и АОП); короткозамкнутые

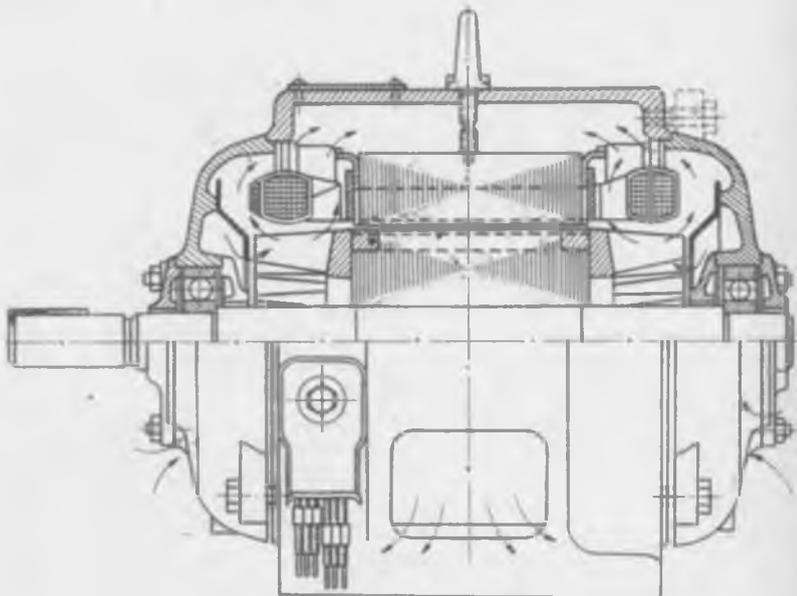


Рис. 10.53

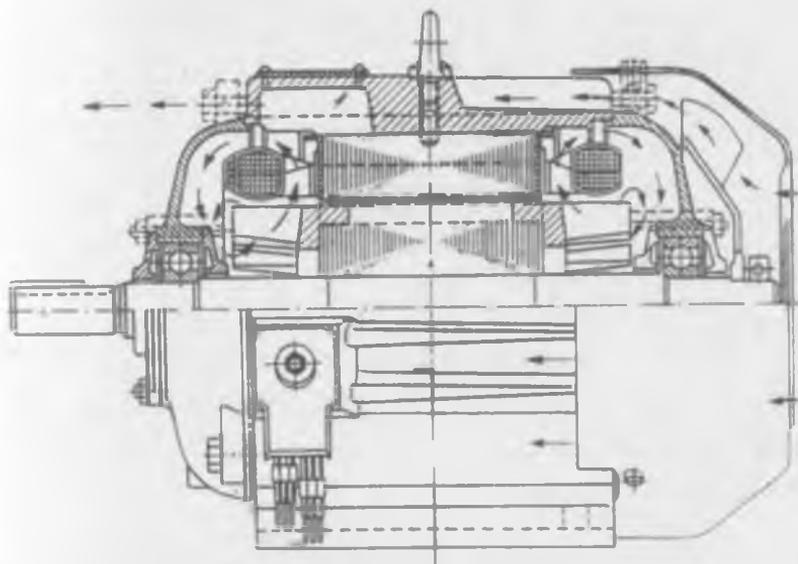
двигатели с повышенным скольжением (АС и АОС); много-скоростные двигатели на 2, 3 и 4 скорости вращения; двигатели с контактными кольцами (АК и АОК); короткозамкнутые двигатели для текстильного оборудования, имеющие повышенный к.п.д. и $\cos\phi$ (АОТ), и др.

Наряду с серией А и АО в настоящее время промышленность освоила и поставляет асинхронные двигатели более совершенной серии А2 и АО2. Такие двигатели отличаются лучшими экономическими показателями (к.п.д. и $\cos\phi$), меньшими габаритами и весом благодаря применению новых современных электрических и магнитных материалов. Для двигателей этой серии принято также большее число ступеней в первой половине шкалы мощностей.

Двигатели серии А2 и АО2 изготавливаются на скорости вращения от 600 до 3000 *об/мин*, номинальные напряжения 220, 380, 500 и 660 *в*. Их мощности: 0,4; 0,6; 0,8; 1,1; 1,5; 2,2; 3; 4; 5,5; 7,5; 10; 13; 17; 22; 30; 40; 55; 75; 100; 125 *квт*.

Промышленность поставляет также асинхронные двигатели специализированных серий, например двигатели крановые (МТ и МТК), погружные, взрывобезопасные и т. д.

По способу монтажа двигатели единой серии изготавливаются в таких основных исполнениях:



Р и с. 10.54

Щ2 — горизонтальная установка с креплением на лапах;
Ф2 — горизонтальная установка с фланцевым креплением;
Щ2/Ф2 — горизонтальная установка с двойным креплением — с помощью лап и фланца;

В3 — двигатель устанавливается вертикально.

Трехфазные двигатели мощностью свыше 100 *квт*. Серия этих двигателей является продолжением единой серии А и АО. Они также изготавливаются в защищенном (А) и закрытом (АО) исполнении. Двигатели мощностью до 1000 *квт* выполняются на синхронные скорости от 500 до 3000 *об/мин* и напряжения 380, 500, 3000, 6000 *в*; при большей мощности — на синхронные скорости в диапазоне 250—1000 *об/мин* и напряжения 3000, 6000, 10 000 *в*.

Ротор короткозамкнутых двигателей этой серии делается как с одной, так и с двумя клетками. Для механизмов, требующих регулирования скорости или характеризующихся особо тяжелыми условиями пуска, применяются двигатели с контактными кольцами.

Крупные асинхронные двигатели находят применение для привода вентиляторов, дымососов, мельниц, центробежных насосов, дробилок, крупных металлорежущих станков, прокатных механизмов, шахтных подъемников и др.

Технические данные асинхронных двигателей приводятся в каталоге. В паспортном щитке двигателя указываются такие основные данные: тип двигателя, в обозначение которого входит условное наименование серии (А, АО и т. п.) и условные цифры, относящиеся к типоразмеру двигателя и числу полюсов; номинальная мощность (в *квт*); номинальное напряжение; схема соединений статора; скорость вращения; частота; ток статора; к. п. д.; коэффициент мощности, $\cos\varphi$; ток ротора и напряжение на кольцах разомкнутого ротора для двигателей с контактными кольцами; год выпуска и завод-изготовитель. Все величины, зависящие от нагрузки, указываются для режима номинальной нагрузки.

Другие сведения, которые необходимы для монтажа и эксплуатации двигателя, даются в каталоге. К ним относятся: кратность пускового момента $k_n = \frac{M_n}{M_n}$, кратность пускового тока $k_T = \frac{I_n}{I_n}$, коэффициент перегрузочной способности $k_m = \frac{M_n}{M_n}$, габаритные и установочные данные и др.

Задачи. 10.14. Паспортные и каталожные данные асинхронного двигателя: тип АО2-61-6; 10 *квт*; 975 *об/мин*; $\eta=88,5\%$; $\cos\varphi=0,89$;

$$\frac{I_n}{I_n} = 5,6; \quad \frac{M_n}{M_n} = 1,3; \quad \frac{M_n}{M_n} = 2,6;$$

$U=220/380$ в. Схема соединений Δ/Y , $f=50$ гц.

По этим данным охарактеризовать двигатель и определить номинальный ток.

Решение. Этот двигатель короткозамкнутый новой единой серии АО2 закрытого исполнения, шестиполосный, номинальная мощность 10 *квт* (полезная мощность на валу). При номинальной нагрузке скорость вращения равна 975 *об/мин*, к.п.д. $\eta=88,5\%$, $\cos\varphi=0,89$. Кратность пускового тока составляет 5,6 (при прямом пуске), пускового момента — 1,3; критический момент превышает номинальный в 2,6 раза.

Питание двигателя — от трехфазной сети с линейным напряжением 220 и 380 в. В первом случае схема соединений обмотки статора — треугольник, во втором — звезда; частота питающей сети $f=50$ гц.

Номинальный ток:

при работе от сети 220 в

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,885} = 34 \text{ а.}$$

при работе от сети 380 в

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,885} = 19,5 \text{ а.}$$

Таким образом, $I_n = 34/19,5 \text{ а.}$

В обоих случаях в фазных обмотках статора будет ток $I_\phi = 19,5 \text{ а.}$

Вопросы для самопроверки

Какие единые серии асинхронных двигателей изготавливаются отечественной промышленностью? В чем отличие двигателей серий А, А2 и АО, АО2?

Какие технические данные приводятся в паспортном щитке и в каталоге асинхронных двигателей?

ГЛАВА II

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

§ 11.1. Общие сведения

Синхронные машины применяются в качестве генераторов и двигателей переменного тока. На всех электрических станциях, за исключением очень редких специальных случаев, источником трехфазного переменного тока промышленной частоты служат синхронные генераторы. Широко применяются также синхронные двигатели, хотя по сравнению с асинхронными их удельный вес в общем числе электрических двигателей невелик. Область применения синхронных двигателей в последнее время заметно расширяется.

Для синхронных машин характерна жесткая, синхронная связь между частотой тока и скоростью вращения ротора. Частота тока, вырабатываемого генератором, равна

$$f = \frac{pn}{60}, \quad (11.1)$$

где n — скорость вращения ротора генератора;

p — число пар полюсов магнитного поля.

Синхронный двигатель, питаемый переменным током частотой f , вращается со скоростью $n = \frac{f \cdot 60}{p}$, т. е. с синхронной скоростью. Это свойство явилось поводом к их названию. Синхронные машины изготавливаются на мощности от долей ватта для специальных устройств до сотен тысяч киловатт в энергетических установках.

§ 11.2. Устройство синхронных машин

Синхронная машина, как и другие электрические машины, обратима, т. е. она может быть использована как генератором, так и двигателем, принцип устройства которых одинаков. Синхронные машины по устройству имеют много общего с асинхронными. Здесь обратим внимание в основном на их отличия.

Статор синхронной машины не отличается от статора асин-

хронной (см. § 10.2) — такой же собранный из листовой стали сердечник, тот же принцип выполнения и соединения его обмотки.

Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит постоянного тока. Его обмотка питается постоянным током от постороннего источника. Она служит для создания постоянного магнитного поля ротора и ее называют обмоткой возбуждения. Соединение обмотки ротора с источником постоянного тока осуществляется с помощью двух контактных колец на валу и неподвижных щеток.

В качестве источника постоянного тока для питания обмотки возбуждения ротора обычно используется генератор постоянного тока, который чаще всего монтируется на одном валу с ротором. Такой генератор называют возбудителем. Мощность, требуемая для питания обмотки возбуждения, невелика и соответственно мощность возбудителя составляет около 0,3—5% от номинальной мощности синхронной машины. Для крупных синхронных машин, выход из строя которых связан с большими экономическими потерями, устанавливается еще резервный возбудитель, вводимый в работу при



Рис. 11.1

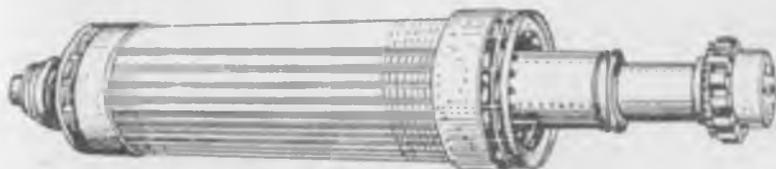


Рис. 11.2

неполадках в основном. Возможно также питание обмотки возбуждения от сети переменного тока, подключенной к статору, через выпрямители.

Применяются два типа ротора синхронных машин — ротор неявнополюсный, или с неявновыраженными полюсами, и ротор с явно выраженными полюсами, или явнополюсный. В первом случае сердечник ротора представляет собой массивное цилиндрическое тело из стали (бочка ротора); вдоль его на поверхности выфрезерованы пазы, в которых закладывается обмотка возбуждения (рис. 11.1). Пазы и обмотка возбуждения размещаются так, чтобы получить по возможности синусоидальное распределение индукции в зазоре между сердечниками ротора и статора. Общий вид неявнополюсного

ротора показан на рис. 11.2. Такой ротор применяется при числе пар полюсов $p \leq 2$.

Явнополюсный ротор состоит из массивного стального колеса, посаженного на вал. К его ободу по внешней поверхности крепятся стальные сердечники полюсов (рис. 11.3). Последние, а иногда и обод выполняются из листовой стали. Для малых машин и при не слишком большом числе полюсов вместо колеса на вал садится стальная втулка, к которой крепятся полюсы. Обмотка возбуждения в виде катушек размещается на сердечниках полюсов. Для придания синусоидального характера распределения индукции зазор между поверхно-

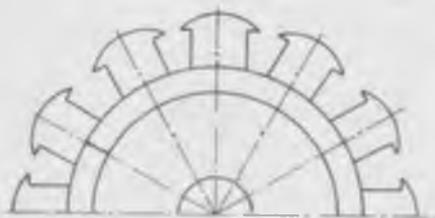


Рис. 11.3



Рис. 11.4

стью полюсного наконечника и внутренней поверхностью статора делается неравномерным за счет особой формы полюсных наконечников. Синусоидальное распределение индукции в зазоре необходимо для получения синусоидальной э.д.с. в обмотках статора.

Такая конструкция ротора позволяет разместить на нем большое число полюсов, что бывает необходимым для машин с небольшой скоростью вращения.

На рис. 11.4 изображен собранный явнополюсный ротор. Принципиально возможна конструкция синхронной машины, в которой электромагниты постоянного тока размещаются на статоре, а обмотка переменного тока — на шихтованном сердечнике ротора. Однако при этом значительно возрастают трудности выполнения вращающейся обмотки переменного тока, особенно на высокие напряжения. Поэтому такое исполнение распространения не получило.

Таким образом, синхронная машина, как и асинхронная, состоит из магнитопровода, обмоток и механических частей. Магнитопровод включает в себя сердечники полюсов, обод ро-

тора, или просто тело неявнополюсного ротора, сердечник статора и зазор между ротором и статором (рис. 11.5).

Из рисунка видно, что поток в сердечнике статора и обode ротора меньше потока полюсов. Это учитывается при выборе размеров магнитной цепи. Что касается зазора между ротором и статором, то у синхронных машин, особенно у генераторов, он делается сравнительно большим. Увеличенный зазор в синхронных машинах, хотя и требует большей намагничивающей силы ротора, оказывается желательным с целью ослабления влияния реакции якоря.



Рис. 11.5

Обмотка переменного тока синхронной машины размещается в пазах сердечника статора. Для трехфазных машин это три фазные обмотки, смещенные пространственно на 120 электрических градусов. Ротор несет на себе обмотку возбуждения, питаемую постоянным током. Механические части — корпус литой или сварной, вал, подшипниковые щиты или стойки и другие детали, необходимые для монтажа и сборки машины. У машин с неявнополюсным ротором вал обычно отковывается заодно с сердечником ротора. Ротор синхронной машины как источник магнитного поля называют индуктором. Часть машины, в обмотке которой при работе индуцируется э.д.с., принято называть якорем. У синхронных машин обычной конструкции якорем является статор.

Вопросы для самопроверки

В чем состоит основная особенность синхронных машин и область их применения?

Устройство и назначение основных частей синхронной машины.

Каковы отличия в устройстве магнитопровода и обмоток синхронной машины по сравнению с асинхронной?

§ 11.3. Синхронный генератор. Принцип действия и характеристика холостого хода

В синхронном генераторе механическая энергия преобразуется в электрическую переменного, обычно трехфазного, тока. Ротор генератора с постоянным магнитным полем приводится во вращение первичным двигателем (паровой или гидравлической турбиной, дизелем и т. п.). Вследствие электромагнитной индукции в обмотках статора (якоря) индуктируются переменные э.д.с. Так как в статоре трехфазного генератора размещаются три одинаковые, симметрично смещенные пространственно на 120 электрических градусов обмотки, то их э.д.с. будут одинаковы по своим действующим и амплитудным значениям и будут симметрично смещены по фазе на 120° (см. § 5.1). Частота э.д.с. якоря определяется скоростью вращения и числом пар полюсов ротора.

Частота тока стандартизована и должна быть постоянной. Для получения заданной частоты переменного тока необходимо обеспечить строго определенную, постоянную, не зависящую от нагрузки, и равную $n = \frac{f \cdot 60}{p}$ об/мин скорость вращения. С этой целью первичные двигатели на электрических станциях оборудуются автоматическим регулированием скорости.

Требуемая для заданной частоты скорость вращения ротора тем меньше, чем больше число пар полюсов. Поэтому генераторы, работающие от тихоходных первичных двигателей, делаются многополюсными.

По роду первичного двигателя различают два основных типа синхронных генераторов — турбогенераторы и гидрогенераторы. Первые устанавливаются на тепловых электрических станциях и работают от паровых турбин, вторые применяются на гидроэлектростанциях. При современном уровне энергопотребления экономически выгодно применение на электрических станциях генераторов больших мощностей. Мощности современных турбо- и гидрогенераторов часто достигают нескольких сот тысяч киловатт (500 000 и более).

Для паровых турбин на тепловых электростанциях характерна высокая скорость вращения (обычно 3000 об/мин). Турбогенератор стандартной частоты $f = 50$ гц, работающий с такой скоростью, должен иметь

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{3000} = 1,$$

т. е. его ротор должен быть двухполюсным. Кроме того, при большой скорости вращения очень существенным является вопрос обеспечения механической прочности ротора. Поэтому турбогенераторы делаются с неявнополюсным ротором. Они

характеризуются сравнительно небольшими радиальными и значительными осевыми размерами.

Для гидрогенераторов обычными являются небольшие скорости вращения (50—300 об/мин). Чтобы получить переменный ток стандартной частоты $f=50$ гц, гидрогенераторы выполняются на большое число пар полюсов. Так, например, при скорости $n=50$ об/мин число пар полюсов должно быть равно

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{50} = 60.$$

Для их размещения приходится увеличивать поперечные размеры генератора. Гидрогенераторы выполняются явнополюсными и имеют относительно большие радиальные размеры при умеренных осевых. Как правило, они изготавливаются для вертикальной установки. Синхронные генераторы изготавливаются на напряжения 0,4; 6,3; 10,5; 15; 20 кв.

Для сравнения приведем некоторые технические данные по двум крупным синхронным генераторам отечественного производства:

Турбогенератор ТГВ-300 (з-д «Электросила»). Номинальная мощность 300 000 квт при $\cos\varphi=0,85$ (353000 ква); $n=3000$ об/мин, $f=50$ гц, напряжение $U=20000$ в. Габаритные размеры: диаметр ротора 115 см, зазор 10,5 см, поперечный размер по статору около 4,5 м, длина 1225 см, общий вес 350 т. Охлаждение водородное.

Гидрогенератор ВГС (з-д «Уралэлектроаппарат»). Номинальная мощность 150000 квт при $\cos\varphi=0,85$, $f=50$ гц, $n=100$ об/мин, $U=15750$ в. Габаритные размеры: внутренний диаметр статора 1190 см, внешний диаметр по корпусу 1450 см, осевая длина 200 см, общий вес 1200 т. Охлаждение воздушное, замкнутое с водяными воздухоохладителями.

При холостом ходе генератора ток якоря равен нулю и магнитное поле создается только обмоткой возбуждения ротора. За счет распределения обмоток статора и ротора неявнополюсной машины, а также за счет придания особой формы полюсным наконечникам явнополюсного ротора добиваются того, что изменение потокоцепления обмоток якоря при вращении ротора оказывается практически синусоидальным. Это необходимо для получения синусоидальной э.д.с. в якоре. Такая форма кривой э.д.с. является требованием стандарта к генераторам переменного тока. В этом случае действующее значение э.д.с. в обмотках якоря определится той же формулой, как и для обмоток асинхронных машин (см. § 10.5), а именно:

$$E_0 = 4,44 f \omega k \Phi_0,$$

где E_0 — э.д.с. фазной обмотки якоря;

f — частота э.д.с. якоря;
 ω — число витков фазной обмотки;
 k — обмоточный коэффициент обмотки якоря;
 Φ_0 — поток ротора, проникающий в сердечник статора.

При постоянной частоте f на величину э.д.с. якоря можно влиять потоком Φ_0 , который создается током возбуждения ротора I_B .



Рис. 11.6

Зависимость э. д. с. якоря от тока возбуждения при номинальной скорости вращения и отсутствии нагрузки якоря ($I=0$) называется характеристикой холостого хода.

Обычный ее вид представлен на рис. 11.6. Так как $E_0 \equiv \Phi_0$, то $E_0 = F(I_B)$ определяется свойствами магнитной цепи машины и в другом масштабе повторяет кривую $\Phi_0 = F(I_B)$.

Характеристика холостого хода может быть построена по данным расчета магнитной цепи или на основании опыта холостого хода. Последний проводится при номинальной скорости и отключенной нагрузке. Напряжение на якоре измеряется при постепенном увеличении тока возбуждения с нуля, а затем при его уменьшении. Вследствие гистерезиса эти напряжения могут не совпадать. Для построения характеристики холостого хода принимаются средние значения.

Вопросы для самопроверки

В чем состоит принцип работы синхронного генератора?

Конструктивные отличия турбо- и гидрогенераторов.

Что понимают под характеристикой холостого хода генератора? На основании каких данных она строится?

§ 11.4. Реакция якоря

При нагрузке генератора обмотки статора обтекаются переменным током. Магнитное поле этого тока накладывается на магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения ротора.

Таким образом, в отличие от холостого хода, когда магнитный поток создается только обмоткой ротора, в режиме нагрузки по магнитопроводу синхронной машины проходит результирующий поток, который является следствием одновременного действия намагничивающих сил обмотки возбуж-

дения ротора и обмотки якоря. Влияние намагничивающей силы статора на основную намагничивающую силу ротора называется реакцией якоря. Реакция якоря оказывает существенное влияние на рабочий процесс синхронной машины. Намагничивающая сила статора (якоря), а следовательно, и реакция якоря зависят от величины тока нагрузки. Кроме того, характер влияния реакции якоря зависит от фазового сдвига между э.д.с. и током якоря, который в свою очередь определяется характером нагрузки генератора.

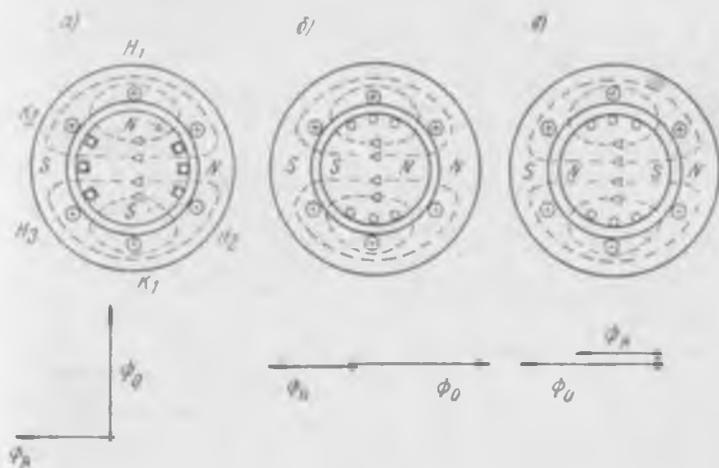


Рис. 11.7

В подтверждение сказанного рассмотрим три предельных случая реакции якоря двухполюсного генератора ($p=1$) с неявнополюсным ротором, а именно: характер цепи якоря чисто активный (ток совпадает с э.д.с. по фазе), цепь якоря имеет чисто индуктивный характер (ток отстает от э.д.с. на 90°) и емкостной характер цепи якоря (ток опережает э.д.с. на 90°).

В каждой из фазных обмоток якоря э.д.с. достигает амплитудного значения в те моменты времени, когда против ее проводников оказываются полюсы ротора. При этом ось магнитного поля ротора совпадает с плоскостью данной обмотки и перпендикулярна ее оси.

На рис. 11.7, а такой случай имеет место для первой фазы. Там же для данного момента времени знаками «точка» и «плюс» указаны направления э.д.с. в проводниках всех трех фазных обмоток. При активной нагрузке токи якоря совпадают с э.д.с. по фазе и, следовательно, их направление будет

таким же. Магнитное поле якоря в этом случае является поперечным относительно поля ротора.

На рисунке поле якоря изображено пунктирными силовыми линиями. У одного края полюса оно направлено встречно основному полю ротора и оказывает ослабляющее действие, у другого, наоборот, поле ротора усиливается полем якоря. Вследствие насыщения стали ослабление у одного края не компенсируется усилением у другого.

Таким образом, при активной нагрузке реакция якоря является поперечной, она вызывает смещение оси результирующего поля в сторону отставания от оси поля ротора (у двигателей наоборот), а также оказывает некоторое размагничивающее действие на поле ротора.

При индуктивном характере цепи якоря ток отстает от э.д.с. по фазе на 90° . Поэтому направления токов в обмотках якоря будут такими же, как на рис. 11.7, а, лишь спустя четверть периода. За это время ротор уйдет вперед на 90° (рис. 11.7, б). Магнитное поле якоря при этом ориентировано вдоль магнитной оси ротора и направлено навстречу основному полю ротора. Реакция якоря при индуктивной нагрузке оказывается продольно-размагничивающей. Вследствие ее результирующее поле заметно ослабляется. В случае, когда по обмоткам якоря протекает ток, опережающий э.д.с. на 90° (емкостной характер цепи), поле якоря будет тоже продольным, но направлено оно согласно с основным полем ротора (рис. 11.7, в). Следовательно, реакция якоря будет продольно-намагничивающей.

В реальном режиме работы нагрузка генератора обычно имеет смешанный характер, т. е. она содержит активную и реактивную (чаще всего индуктивную) составляющие. Соответственно реакция якоря оказывает влияние как по поперечной, так и по продольной осям ротора. У явнополюсных машин возникают дополнительные осложнения, связанные с тем, что у них магнитное сопротивление для поля поперечной и продольной реакции якоря неодинаково.

Это приводит к нарушению характера распределения магнитной индукции в зазоре, что вызывает искажение формы кривой э.д.с. Влияя на результирующий поток, реакция якоря тем самым оказывает влияние и на напряжение генератора, что является нежелательным. Ограничить влияние реакции якоря можно уменьшением его поля, а этого можно достигнуть увеличением сопротивления магнитопровода. С этой целью воздушный зазор в синхронных машинах делается сравнительно большим, хотя при этом приходится увеличивать намагничивающую силу обмотки возбуждения ротора.

Какая-то часть поля переменного тока статора не проникает в ротор, а замыкается в самом статоре через пазы

в сердечнике, вокруг лобовых частей обмоток и т. п. Так же, как у трансформаторов и асинхронных машин, эту часть называют полем рассеяния статора (якоря). Поток рассеяния, так же как и поток реакции якоря, зависит от тока нагрузки. Поскольку поток рассеяния замыкается в основном через воздух, то его можно считать пропорциональным току статора и совпадающим с ним по фазе. Деление результирующего магнитного поля на основное, поле реакции якоря и поле рассеяния следует рассматривать как условное, удобное для анализа рабочего процесса машины. На самом деле в машине существует один результирующий поток как совокупность потоков ротора и статора.

§ 11.5. Уравнение напряжений статора. Векторная диаграмма напряжений генератора

При нагрузке машины результирующий поток индуцирует в каждой фазной обмотке якоря э.д.с. Выделение в результирующем потоке трех слагаемых позволяет сделать то же и для э.д.с. Будем считать, что каждый из потоков — основной, реакции якоря и рассеяния — вызывает в обмотках якоря свою э.д.с.

Основным потоком ротора индуцируется э.д.с. E_0 . Ее величину можно установить приблизительно по характеристике холостого хода (см. рис. 11.6). Действительная зависимость $E_0 = F(I_n)$ при нагрузке несколько отличается от характеристики холостого хода вследствие того, что на магнитное состояние стали влияет поток якоря.

Поток реакции якоря вызывает э.д.с. якоря $E_{я}$. Наиболее просто ее можно учесть, если пренебречь насыщением магнитопровода. При этом поток реакции якоря и э.д.с. $E_{я}$ будут пропорциональны току якоря и э.д.с. $E_{я}$ можно представить в виде индуктивного падения напряжения

$$E_{я} = -Ijx_{я}, \quad (11.2)$$

где $x_{я}$ — индуктивное сопротивление статора, обусловленное реакцией якоря (при указанном выше допущении $x_{я}$ — величина постоянная).

I — ток статора (нагрузки).

Поток рассеяния якоря индуцирует э.д.с. рассеяния. Ранее было отмечено, что поток рассеяния пропорционален току нагрузки. Поэтому э.д.с. рассеяния учитывается аналогично э.д.с. реакции якоря

$$E_p = -Ijx_p, \quad (11.3)$$

где x_p — индуктивное сопротивление рассеяния.

Если из суммы этих трех э.д.с. вычесть активное падение напряжения в обмотке статора, то получим напряжение на зажимах генератора

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_p - Ir = \dot{U}, \quad (11.4)$$

где U — напряжение на зажимах генератора (фазное);
 r — активное сопротивление обмотки статора.

С учетом того, что $E_a = -Ijx_a$ и $E_p = -Ijx_p$,

$$\dot{E}_0 - Ij(x_a + x_p) - Ir = \dot{U} \quad (11.5)$$

или

$$\dot{E}_0 - Ijx - Ir = U, \quad (11.6)$$

где $x = x_a + x_p$ — синхронное индуктивное сопротивление.

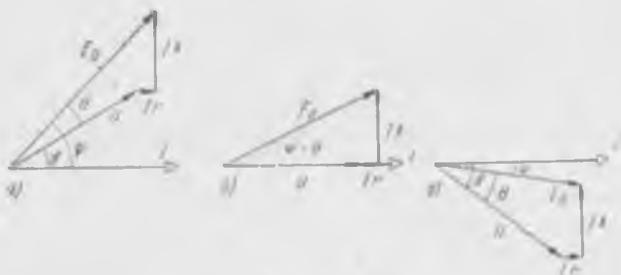


Рис. 11.8

Таким образом, напряжение на зажимах отличается от э.д.с. E_0 , индуцируемой в статоре потоком ротора, вследствие падений напряжений в активном и в синхронном индуктивных сопротивлениях якоря.

На основании уравнения напряжений (11.6) можно построить векторную диаграмму синхронного генератора. На рис. 11.8, а, б, в представлены такие диаграммы для случаев работы генератора на активно-индуктивную ($\varphi > 0$), активную ($\varphi = 0$) и активно-емкостную нагрузку ($\varphi < 0$). В последнем случае напряжение U может оказаться больше напряжения холостого хода $U_0 = E_0$ (см. рис. 11.8, в). Активное падение напряжения в обмотке якоря невелико, обычно не превышает 1—2% от номинального напряжения. Поэтому им можно пренебречь. В этом случае уравнение электрического равновесия якоря принимает вид

$$\dot{E}_0 - Ijx = U. \quad (11.7)$$

Соответственно упрощается и векторная диаграмма.

§ 11.6. Внешняя характеристика генератора

Внешней характеристикой генератора называется зависимость напряжения от тока нагрузки $U=F(I)$ при $n=\text{const}$, $I_{\text{в}}=\text{const}$, $\cos\varphi=\text{const}$. Наибольший интерес представляет внешняя характеристика $U=F(I)$ при номинальных скорости, $\cos\varphi$ и токе возбуждения в диапазоне токов нагрузки от $I=0$ до $I=I_{\text{ном}}$.

Ток возбуждения, который должен быть при номинальной нагрузке, т. е. при $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $\cos\varphi_{\text{н}}$, называется н о м и н а л ь н ы м током возбуждения. Генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальным коэффициентом мощности $\cos\varphi_{\text{н}}=0,8-0,9$ для смешанной активно-индуктивной нагрузки. В этом случае существенное влияние оказывает продольно-размагничивающая реакция якоря. Поэтому при уменьшении нагрузки от номинального напряжение достаточно быстро возрастает (кривая 1 рис. 11.9).

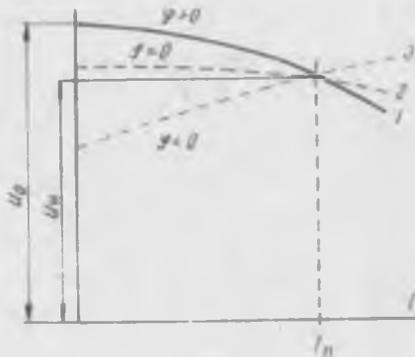


Рис. 11.9

Относительное изменение (повышение) напряжения при этом может достигать нескольких десятков процентов. Под относительным изменением напряжения понимают выраженное в процентах к номинальному повышение напряжения при переходе от режима номинальной нагрузки к холостому ходу. Оно равно

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} 100. \quad (11.8)$$

Так как $\cos\varphi$ нагрузки может отличаться от номинального, то это в свою очередь сказывается на внешней характеристике генератора. На рис. 11.9 кривая 2 изображает внешнюю характеристику при активной нагрузке ($\varphi=0$), кривая 3 при активно-емкостной нагрузке ($\varphi<0$). Вследствие того что при активной нагрузке реакция якоря поперечная и ее размагничивающее действие невелико, изменение напряжения оказывается сравнительно небольшим (кривая 2 рис. 11.9). При активно-емкостной нагрузке появляется продольно намагничивающая реакция якоря и поэтому процентное изменение напряжения может быть отрицательным (кривая 3 рис. 11.9). Внешняя характеристика может быть построена с помощью векторных диаграмм или по данным опыта.

Если принять э.д.с. E_0 и напряжение U постоянными, не зависящими от нагрузки, — такой режим возможен, например, при параллельной работе синхронной машины с сетью, — то электромагнитный момент будет зависеть лишь от $\sin\theta$. Зависимость момента от угла θ называют угловой характеристикой синхронной машины (рис. 11.11). Она имеет важное значение для оценки статической устойчивости машины при параллельной работе с сетью.

Как следует из формулы (11.11) и графика (см. рис. 11.11), максимальный момент машина развивает при $\theta = 90^\circ$. Он равен

$$M_m = \frac{m E_0 U}{\omega s}. \quad (11.12)$$

Величина максимального момента, как и для асинхронных машин, характеризует перегрузочную способность. Его можно рассматривать как предел статической устойчивости машины в условиях ее параллельной работы с сетью. Чем меньше момент, соответствующий данной нагрузке по сравнению с максимальным, тем больше запас устойчивости. Одновременно для устойчивой работы необходимо, чтобы при увеличении угла θ возрастал электромагнитный момент. Это условие соблюдается лишь при $\theta < 90^\circ$.

§ 11.8. Параллельная работа синхронной машины с сетью большой мощности

В современной практике автономная работа синхронного генератора на свою нагрузку вне связи с другими источниками трехфазного тока встречается редко. Обычным является электроснабжение потребителей энергией от энергетических систем. Энергосистема по линиям высокого напряжения объединяет для параллельной работы электрические станции крупного экономического района. В недалекой перспективе предполагается создание единой энергетической системы страны (ЕЭС). Создание энергосистем дает существенные экономические выгоды, главные из которых — повышение надежности энергоснабжения и снижение стоимости производства электроэнергии.

Мощности современных энергосистем исчисляются миллионами и десятками миллионов киловатт. Каждый из генераторов, включенных в энергосистему, оказывается в режиме параллельной работы с общей сетью большой мощности. При этом можно считать, что режим работы отдельного генератора не влияет на режим работы сети. Такое допущение означает, что частота и напряжение на его зажимах жестко задаются внешней сетью и не зависят от тока возбуждения, на-

грузки и мощности данного генератора. Синхронный двигатель всегда включается параллельно питающей сети.

Для включения генератора на параллельную работу с сетью необходимо соблюсти следующие условия:

а) генератор должен вращаться со строго синхронной скоростью, при которой частота э.д.с. якоря точно совпадает с частотой сети (равенство частот);

б) фазные напряжения генератора (напряжения равны э.д.с. E_0) должны быть равны соответствующим фазным напряжениям сети, а по фазе они должны быть противоположны (равенство напряжений).

Создание указанных условий с последующим включением генератора в сеть называют синхронизацией. Синхронизация является ответственной операцией. Для контроля за созданием необходимых условий параллельного включения в процессе синхронизации применяются синхроскопы. В простейшем случае синхроскоп составляется из трех ламп и вольтметра, включаемых по схеме рис. 11.12. Включение генератора производится в момент времени, когда вольтметр покажет нуль, а все три лампы погаснут. Работа и регулирование синхронной машины, включенной параллельно с сетью большой мощности, имеют свои особенности.

Влияние тока возбуждения. На основании уравнения напряжений ток якоря

$$I = \frac{E_0 - \dot{U}}{jx}, \quad (11.13)$$

При включении генератора в сеть их напряжения равны и противоположны по фазе, т. е. $E_0 = \dot{U} = -\dot{U}_c$. Поэтому

$$I = \frac{E_0 + \dot{U}_c}{jx} = 0,$$

где U_c -- напряжение сети.

Генератор после включения будет работать в режиме холостого хода. Векторная диаграмма, соответствующая этому случаю, изображена на рис. 11.13, а. Если увеличить ток возбуждения, то возрастет абсолютная величина э.д.с. якоря E_0 . Поскольку напряжение на зажимах задается сетью и остается прежним, то появившаяся разность напряжений $\Delta U = E_0 - \dot{U} = E_0 + U_c$ вызовет ток в якоре

$$I = \frac{E_0 - \dot{U}}{jx} = \frac{\Delta U}{jx}.$$

Ток якоря при этом отстает по фазе от ΔU и E_0 на угол $\psi = 90^\circ$ (рис. 11.13, б). Режим получается таким же, как если бы при автономной работе генератора его нагрузили на чисто

индуктивную нагрузку. По отношению к сети генератор в этом режиме будет являться источником реактивной мощности. Наоборот, при уменьшении тока возбуждения (недовозбуждение) снижается э.д.с. E_0 , что приводит к изменению фазы для ΔU и тока I на противоположную (см. рис. 11.13, в). Ток якоря будет опережать напряжение U и э.д.с. E_0 на 90° , а по отношению к напряжению сети U_c окажется отстающим на такой же угол.

В этом режиме генератор потребляет от сети реактивную мощность, необходимую для поддержания результирующего

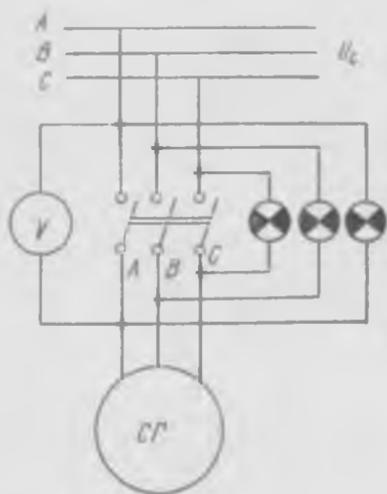


Рис. 11.12

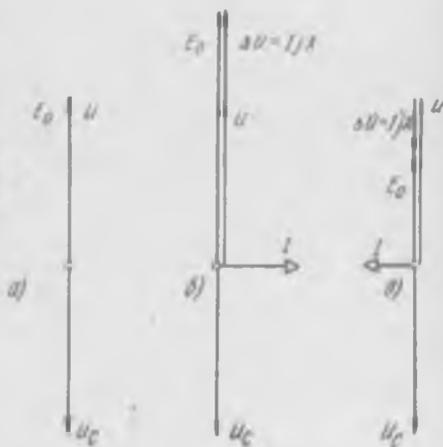


Рис. 11.13

поля на прежнем уровне, поскольку напряжение на зажимах жестко задано. Реакция якоря при этом будет продольно намагничивающей. Нагрузка на первичный двигатель в обоих случаях останется на уровне холостого хода, так как электромагнитная мощность при $\psi = 90^\circ$ равна нулю.

Таким образом, регулирование тока возбуждения вызывает изменение лишь реактивной нагрузки генератора

Регулирование активной нагрузки. Чтобы нагрузить генератор активной мощностью, необходимо воздействовать на первичный двигатель так, чтобы придать ротору некоторое ускорение. С этой целью увеличивается впуск пара или воды в турбину. При ускорении ротора появится сдвиг фаз между э. д. с. E_0 и напряжением U на угол θ , что явится следствием пространственного сдвига между осями полей ротора и результирующего на угол $\frac{\theta}{p}$.

Фазовый сдвиг между э.д.с. и напряжением обусловит раз-

ность напряжений ΔU , которая в свою очередь вызовет ток якоря

$$I = \frac{E_0 - U}{jx} = \frac{\Delta U}{jx}.$$

Этот ток, отставая от ΔU по фазе на 90° , будет иметь фазовый сдвиг по отношению к э.д.с. E_0 на угол $\psi < 90^\circ$ (рис. 11.14, а).

Так как $\theta > 0$, а $\psi < 90^\circ$, то генератор при этом будет развивать электромагнитную мощность $P_{эм} = mE_0U \cos \psi > 0$, поступающую в сеть, и электромагнитный момент

$$M = \frac{m}{\Omega} \frac{E_0 U}{x} \sin \theta,$$

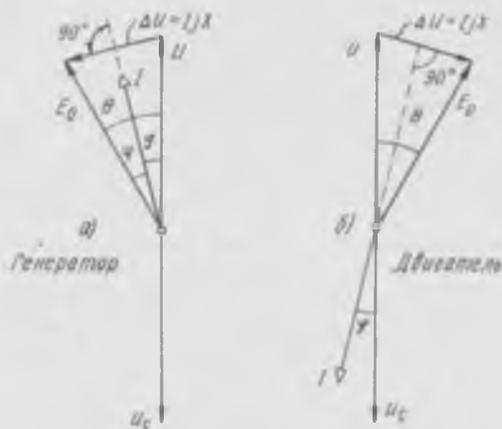


Рис. 11.14

который уравновесит момент первичного двигателя при прежней, синхронной скорости вращения.

С увеличением момента первичного двигателя будут возрастать угол θ , электромагнитная мощность и противодействующий момент. Скорость вращения будет сохраняться синхронной до тех пор, пока момент первичного двигателя будет уравновешиваться электромагнитным моментом генератора. При угле $\theta = 90^\circ$ электромагнитный момент оказывается максимальным

$$M = \frac{m}{\Omega} \frac{E_0 U}{x}.$$

Его величина является тем пределом нагрузки генератора по моменту (соответственно и по отдаваемой мощности), при котором генератор еще в состоянии работать синхронно с

сетью. Если момент первичного двигателя превысит это значение, то генератор не сможет его уравновесить и выпадает из синхронизма. Параллельная работа с сетью становится невозможной.

Если после включения на параллельную работу синхронной машины не увеличить вращающий момент первичного двигателя, а, наоборот, уменьшить или даже приложить к валу тормозной момент, то ротор несколько замедлится и отстанет от результирующего поля на угол $\frac{\theta}{n}$. При этом э. д. с. E_0 будет отставать от напряжения U на угол θ .

Это вызовет изменение фазы ΔU и тока якоря почти на противоположную (рис. 11.14, б). Вследствие этого изменится направление потока электромагнитной мощности и электромагнитного момента, который из противодействующего станет вращающим. Машина перейдет в режим синхронного двигателя. Вращающий электромагнитный момент уравновесит тормозной момент сопротивления и скорость вращения останется синхронной.

Предел статической устойчивости в двигательном режиме определяется также максимальным электромагнитным моментом (11.12). Важно отметить, что максимальный электромагнитный момент синхронной машины возрастает с увеличением тока возбуждения, от которого зависит э.д.с. E_0 . Это позволяет при необходимости воздействовать желательным образом на устойчивость ее работы.

Таким образом, синхронная машина, включенная параллельно с сетью большой мощности, противодействует в пределах ее статической устойчивости как ускорению, так и замедлению ротора и сохраняет скорость вращения постоянной. Изменяется лишь угол между осями полей ротора и результирующего в пределах ± 90 электрических градусов. Для надежности устойчивой работы синхронные машины проектируются и изготовляются так, что при номинальной нагрузке угол θ обычно не превышает $20 \pm 30^\circ$. Синхронная машина противодействует также изменению тока возбуждения соответствующим изменением реактивной нагрузки, поскольку напряжение на зажимах жестко задано.

Вопросы для самопроверки

Что понимают под электромагнитной мощностью генератора и двигателя? Роль электромагнитного момента в генераторе и в двигателе.

Что представляет собой угловая характеристика? Каким диапазоном угла θ ограничивается ее устойчивая часть?

Условия включения синхронной машины параллельно в сеть.

Как влияет на режим работы синхронной машины регулирование тока возбуждения?

Как изменится активная нагрузка генератора, включенного параллельно сети большой мощности?

При каких условиях синхронная машина переходит в режим синхронного двигателя? В каком диапазоне нагрузок сохраняется устойчивая работа синхронной машины, включенной параллельно сети?

§ 11.9. Принцип действия синхронного двигателя

В синхронном двигателе электрическая энергия переменного тока, поступающая из сети на статор, преобразовывается в механическую на валу. По принципу устройства синхронный двигатель не отличается от генератора. Ранее (см. § 11.8) были рассмотрены условия перехода синхронной машины

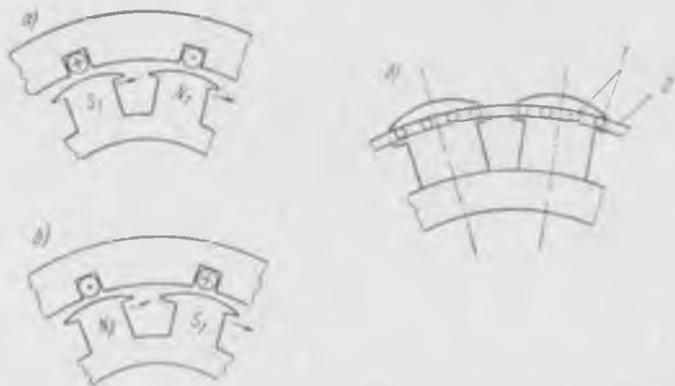


Рис. 11.15

в режим двигателя. В основе создания вращающего момента синхронного двигателя лежит взаимодействие переменного тока статора с постоянным магнитным полем ротора.

Для выяснения особенностей этого взаимодействия воспользуемся рис. 11.15. На нем изображены элементы дуги статора и ротора. Пусть в некоторый момент времени направление тока в проводниках статора и положение полюсов соответствует рис. 11.15, а. Согласно правилу левой руки, каждый из проводников статора будет испытывать механическую силу от взаимодействия его тока с полем ротора, направленную против часовой стрелки. Сила, действующая на полюсы ротора, будет противоположной. Через полпериода переменного тока $T/2$ в проводниках статора установится такой же по величине, но противоположно направленный ток.

Для того чтобы направление силы, действующей на ротор, при этом сохранилось, необходимо, чтобы за то же время ротор повернулся на один полюс и занял положение, показанное на рис. 11.15, б. Однако в силу инерции ротор за время

$T/2$ при частоте $f=50$ гц практически останется на месте и поэтому в следующий полупериод времени на него будет действовать сила обратного направления. Вследствие этого синхронный двигатель не может самостоятельно развернуться. Но если за счет внешней силы придать ротору предварительно такую скорость, при которой обеспечивается указанное условие, то двигатель сможет продолжать вращаться за счет собственного электромагнитного момента. Нетрудно видеть, что при этом будет синхронная скорость вращения. Если ротор имеет p пар полюсов, то время одного полного оборота составит pT секунд, а скорость вращения

$$n = \frac{60}{pT} = \frac{f \cdot 60}{p} \text{ об/мин.}$$

Направление вращения трехфазного синхронного двигателя определяется чередованием фаз питающей сети.

Таким образом, работа двигателя осуществляется при синхронной, не зависящей от нагрузки скорости вращения. Изменения нагрузки сказываются лишь на угле пространственного смещения между осями результирующего поля якоря и поля ротора. В отличие от генератора ротор синхронного двигателя отстает от результирующего поля якоря на Θ электрических градусов. В двигателе ведущим является поле якоря, за ним следует ротор.

Вращающий электромагнитный момент синхронного двигателя выражается такой же формулой, как и для генератора, т. е.

$$M = \frac{m}{\Omega} \frac{E_d U}{x} \sin \Theta. \quad (11.14)$$

Если момент сопротивления нагрузки превысит максимальное его значение (при $\Theta=90^\circ$), то равновесие моментов оказывается невозможным; двигатель выпадает из синхронизма и останавливается. При скорости вращения меньше синхронной неизбежны положения ротора, когда $360 > \Theta > 180$. При этом момент двигателя изменит свое направление и еще больше замедлит ротор, ускоряя его остановку.

Для включения синхронного двигателя в сеть он должен быть предварительно синхронизирован с ней. Требования при этом такие же, как и при включении на параллельную работу генераторов (см. § 11.7).

Чтобы придать ротору синхронизируемого двигателя синхронную скорость до включения в сеть, необходим специальный разгонный двигатель. Это неудобство в значительной мере сдерживало применение синхронных двигателей. Современные синхронные двигатели почти исключительно пускаются в ход способом асинхронного пуска, при котором разгонный двигатель не требуется.

§ 11.10. Пуск в ход синхронного двигателя

Для самостоятельного пуска в ход (без разгонного двигателя) в роторе синхронного двигателя укладывается специальная короткозамкнутая пусковая обмотка по типу беличьей клетки. Ее элементы показаны на рис. 11.15, в. Она состоит из стержней 1, которые укладываются в предусмотренных для этого пазах, полюсных наконечников и двух замыкающих колец 2, которыми по торцам ротора стержни соединяются между собой. Стержни изготовляют из латуни, алюминиевой брон-

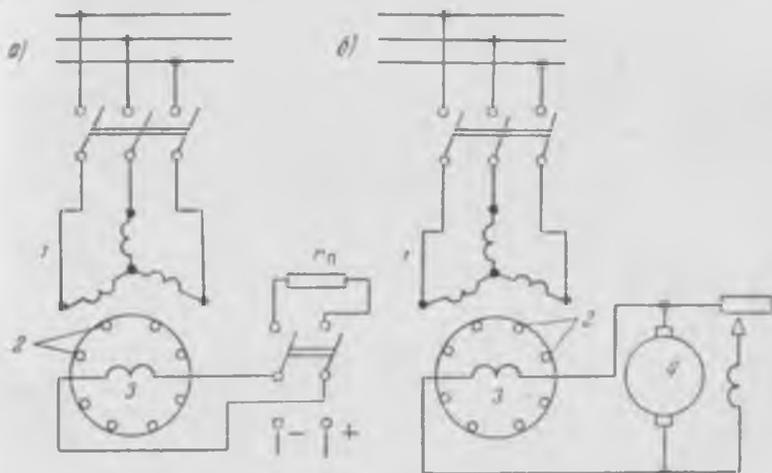


Рис. 11.16

зы и других сплавов с повышенным удельным сопротивлением. Иногда обходятся без пусковой обмотки, но в этом случае полюсные наконечники делают сплошными. По торцам они электрически соединяются накладками, образующими короткозамкнутый контур, который выполняет роль пусковой клетки. В быстроходных двигателях с неявнополюсным ротором функции беличьей клетки выполняют поверхностные слои массивного цилиндрического сердечника ротора. При этом синхронный двигатель пускается в ход по способу асинхронного пуска. Схема такого пуска представлена на рис. 11.16, а.

Статор двигателя 1 включается в сеть трехфазного тока на полное напряжение (прямой пуск) или на пониженное напряжение, если оказывается необходимым уменьшить влияние пускового тока (см. § 10.11). Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в пусковой короткозамкнутой обмотке 2 э.д.с. и ток, который, взаимодействуя с полем, создает вра-

шающий момент. Ротор приходит во вращение, как и в асинхронном двигателе. За счет асинхронного момента он достигает скорости вращения, при которой скольжение обычно не превышает 0,05. Выполнение пусковой обмотки с увеличенным активным сопротивлением позволяет получить достаточный пусковой момент. На время разгона ротора до указанного скольжения ($s=0,05$) обмотка возбуждения Z замыкается на внешнее сопротивление r_n , которое должно быть раз в 10—15 больше ее собственного.

Это необходимо потому, что вращающееся поле индуктирует также в обмотке возбуждения э.д.с., которая в начальный момент пуска может оказаться значительной, опасной для изоляции обмотки и для персонала. После достижения ротором скорости, близкой к синхронной ($s \approx 0,05$), обмотка возбуждения переключается на питание постоянным током от возбuditеля. При этом, помимо асинхронного момента, пропорционального скольжению, появляется синхронный момент от взаимодействия тока якоря с постоянным магнитным полем ротора, который зависит от тока возбуждения (э.д.с. E_0) и угла θ .

Вследствие скольжения угол θ непрерывно изменяется и в промежутки времени, когда $0 < \theta < 180^\circ$, синхронный момент, складываясь с асинхронным, ускоряет ротор и скольжение уменьшается. При достижении $s=0$ двигатель после некоторых качаний около синхронной скорости входит в синхронизм и продолжает работать как синхронный. Угол θ при этом больше нуля и меньше 90° . В рабочем режиме ток и э.д.с. пусковой обмотки равны нулю, равен нулю и ее асинхронный момент, поскольку ротор вращается с синхронной скоростью. Однако при изменениях нагрузки, когда происходит изменение угла θ и угла между осями полей $\frac{\theta}{\rho}$, пусковая клетка оказывает положительное влияние, уменьшая качания ротора около нового положения, соответствующего изменившейся нагрузке.

Применяется также асинхронный пуск синхронного двигателя с наглухо подключенным возбuditелем. Схема такого пуска приведена на рис. 11.16, б.

В этом случае обмотка возбуждения Z подключается к якору возбuditеля 4, смонтированного на одном валу, с самого начала пуска. По мере разгона двигатель возбуждается и по достижении скорости, близкой к синхронной, входит в синхронизм. Такой способ требует меньше пусковой аппаратуры для управления и автоматизации пуска.

Асинхронному пуску синхронных двигателей свойственны те же недостатки, что и пуску асинхронных короткозамкнутых двигателей, главным из которых является большой

пусковой ток. Для ограничения пускового тока крупных двигателей прибегают к снижению на время пуска напряжения, подаваемого на статор, с помощью реакторов (индуктивных сопротивлений), включаемых последовательно цепи статора (реакторный пуск) или с помощью автотрансформаторов (автотрансформаторный пуск). Управление пуском синхронных двигателей в современных установках обычно автоматизируется.

Добавим, что в явнополюсном двигателе, помимо электромагнитного момента, обусловленного взаимодействием поля ротора с током статора, создается еще сравнительно небольшой реактивный момент, за счет которого при пуске с небольшой нагрузкой двигатель может достичь синхронной скорости и при отключенной обмотке возбуждения.

Подробнее о реактивном моменте сказано в § 11.17.

§ 11.11. Уравнение напряжений статора синхронного двигателя, векторная диаграмма

С помощью уравнения электрического равновесия и соответствующей ему векторной диаграммы оказывается возможным анализировать режимы синхронного двигателя, так же как и генератора. Уравнение напряжений статора (11,5; 11,7) является общим для синхронных машин. Воспользуемся упрощенной его формой (11,7), в которой не учитывается активное падение напряжения.

В двигательном режиме э. д. с. E_0 отстает по фазе от напряжения U на угол θ , а активная составляющая тока по отношению к вектору напряжения U смещена на 180° (см. рис. 11.14, б). Напряжение U как сумма э. д. с. статора уравновешивается в любой момент времени напряжением сети U_c , т. е. $\dot{U} = -U_c$. Фаза активной составляющей тока совпадает с напряжением сети U_c , что свидетельствует о направлении потока мощности из сети на статор двигателя. Введем напряжение U_c вместо U в уравнение электрического равновесия:



Рис. 11.17

$$\dot{E}_0 - Ijx = -U_c \text{ или } \dot{U}_c = -\dot{E}_0 + Ijx. \quad (11.15)$$

Этому уравнению соответствует векторная диаграмма рис. 11.17.

Можно сказать, таким образом, что напряжение сети U_c , приложенное к фазе статора синхронного двигателя, распадается

на две части: часть его — E_0 уравнивает э. д. с. якоря E_0 , вторая часть Ijx уравнивает э. д. с. реакции якоря и рассеяния.

§ 11.12. Угловая и механическая характеристики синхронного двигателя

Поскольку векторная диаграмма синхронного двигателя не имеет принципиальных отличий от такой же диаграммы генератора, выражения для электромагнитной мощности (11.10) и электромагнитного момента (11.11) двигателя остаются теми же. Раз-

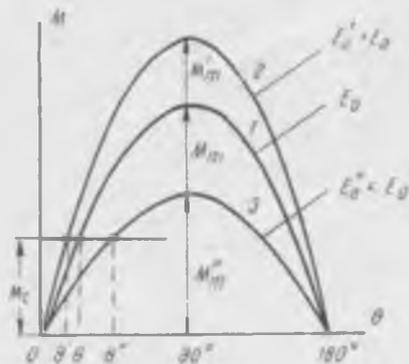


Рис. 11.18

ница состоит в том, что по сравнению с генераторным режимом в двигателе э. д. с. отстает от напряжения на угол θ и его следовало бы считать отрицательным. Знак угла θ определяет направление действия электромагнитного момента и имеет смысл в общей теории синхронной машины.

Мы подчеркивали, что в двигателе электромагнитный момент является вращающим, уравнивающим

момент сопротивления нагрузки на валу. Будем считать угол θ и электромагнитный момент двигателя положительными величинами.

Из формулы электромагнитного момента двигателя $M = \frac{m}{\Omega} \frac{E_0 U}{x} \sin \theta$ вытекает его синусоидальная зависимость от угла θ .

В нормальном эксплуатационном режиме напряжение сети U_c обычно постоянно. При неизменном токе возбуждения э. д. с. E_0 также постоянна. В этих условиях угловая характеристика синхронного двигателя изобразится кривой 1 рис. 11.18. Она позволяет проанализировать устойчивость работы синхронного двигателя. Увеличение нагрузки на валу вызывает увеличение угла θ , что дает прирост электромагнитного момента двигателя. Равновесие восстанавливается при большем θ , но при той же синхронной скорости вращения. Максимальный электромагнитный момент будет при $\theta = 90^\circ$, он равен $M_m = \frac{m}{\Omega} \frac{E_0 U}{x}$.

При нагрузке, превышающей величину M_m , двигатель выпадает из синхронизма. Отношение максимального момента к номинальному характеризует перегрузочную способность двигателя. Коэффициент перегрузочной способности равен

$$k_m = \frac{M_m}{M_n} = \frac{1}{\sin \theta}.$$

Для синхронных двигателей при номинальной нагрузке обычно $\theta = 20-30^\circ$. Коэффициент перегрузочной способности при этом $k_m = 2 \div 3$.

При изменении тока возбуждения изменяется э.д.с. E_0 и, следовательно, M_m . Это сказывается на рабочем угле θ при заданном моменте сопротивления M_c и на перегрузочной способности двигателя (кривые 2, 3 рис. 11.18). Возможность регулирования максимального момента синхронного двигателя с помощью изменения тока возбуждения является его ценным свойством, которое позволяет при необходимости повысить перегрузочную способность или сохранить ее при снижении напряжения сети в условиях эксплуатации. Важно отметить также, что максимальный момент синхронного двигателя пропорционален первой степени напряжения, что определяет меньшую его чувствительность к колебаниям напряжения сети по сравнению с асинхронным, у которого $M \propto U^2$.

Так как скорость вращения синхронного двигателя постоянна и не зависит от нагрузки, то его механическая характеристика, т. е. зависимость $n = F(M)$, является абсолютно жесткой или постоянной. Графически она имеет вид прямой / (см. рис. 10.15), параллельной оси моментов.

При выпадении из синхронизма (вследствие превышения нагрузки максимального момента или случайных колебаний) двигатель начинает развивать асинхронный момент за счет пусковой клетки ротора. Если нагрузка остается большой, то ротор будет все же замедляться до остановки. Но если при этом произойдет уменьшение нагрузки до значений, меньших асинхронного момента,— начнется обратный процесс разгона двигателя до синхронной скорости, как это имеет место при пуске.

Вопросы для самопроверки

В чем состоит принцип работы асинхронного двигателя?

Как пускается в ход синхронный двигатель? Особенности асинхронного пуска синхронного двигателя.

Как строится векторная диаграмма напряжений двигателя? В чем ее отличие от диаграммы генератора?

Какая зависимость называется угловой характеристикой двигателя?

Как влияет на угловую характеристику изменение тока возбуждения?

Механическая характеристика синхронного двигателя. Как ведет себя двигатель при выпадении из синхронизма?

остаётся неизменным, т. е.

$$E_0 \sin \theta = E'_0 \sin \theta' = E_0 \sin \theta'' = \text{const.}$$

Отсюда вытекает, что конец вектора $-E_0$ при изменении тока возбуждения перемещается по прямой $A'A''$, параллельной вектору напряжения U_c . За этим следует изменение величины и фазы индуктивного падения напряжения Ix и тока статора I . Так как

$$Ix \cos \varphi = E_0 \sin \theta = \text{const.},$$

то и

$$I \cos \varphi = \text{const.}$$

Следовательно, активная составляющая тока статора сохраняется неизменной. Конец вектора тока I при регулировании тока возбуждения перемещается по прямой $C'C''$, перпендикулярной вектору напряжения U_c (см. рис. 11.19).

Таким образом, за счет тока возбуждения оказывается возможным задать синхронному двигателю любой режим по коэффициенту мощности. При увеличении тока возбуждения по сравнению с нормальным ток статора опережает напряжение. По отношению к сети двигатель ведет себя при этом как активно-емкостная нагрузка. Двигатель в таком режиме называется перевозбужденным.

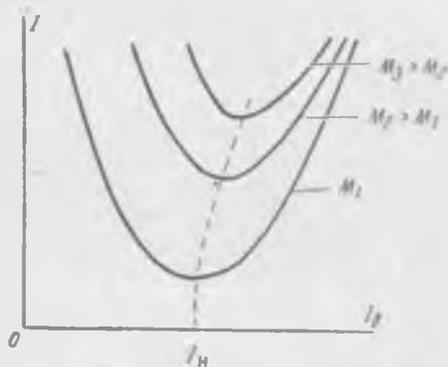


Рис. 11.20

Перевозбужденному двигателю соответствует векторная диаграмма, представленная векторами $-E'_0$, $I'x$, U_c и I' на рис. 11.19. Наоборот, при уменьшении тока возбуждения (недовозбуждение) двигатель потребляет отстающий ток и представляет собой активно-индуктивную нагрузку сети (векторы I'' , E_0'' , $I''x$). Наибольший интерес представляет режим нормальной работы с $\cos \varphi = 1$ и режим перевозбуждения, когда двигатель потребляет опережающий ток. В последнем случае за счет реактивной (емкостной) составляющей тока двигателя достигается повышение $\cos \varphi$ сети в целом, так как основная нагрузка сети чаще всего имеет активно-индуктивный характер.

Синхронные двигатели обычно рассчитываются для работы при номинальной нагрузке в перевозбужденном режиме с $\cos \varphi = 0,8$. С изменением тока возбуждения изменяется не

только фаза, но и величина тока статора. Зависимость тока статора от тока возбуждения при данной нагрузке изображается U -образной кривой (рис. 11.20). Минимум тока статора имеет место при нормальном токе возбуждения, когда $\cos \varphi = 1$. С ростом нагрузки минимум U -образных кривых смещается в сторону больших токов возбуждения.

При уменьшении механической нагрузки на валу снижается активная составляющая тока статора, что расширяет возможный диапазон регулирования реактивной составляющей. Синхронный двигатель, работающий на холостом ходу без нагрузки, может быть использован в качестве регулируемого источника реактивной мощности сети. Для таких целей, однако, применяются специальные синхронные машины, которые называются синхронными компенсаторами.

В отличие от двигателя и генератора синхронный компенсатор не испытывает механических нагрузок и поэтому рассчитывается лишь на небольшую механическую мощность, связанную с потерями холостого хода. Синхронные компенсаторы применяются в электрических сетях энергосистем для регулирования напряжения.

§ 11.14. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Под рабочими характеристиками синхронного двигателя понимают зависимости скорости, момента на валу, коэффициента

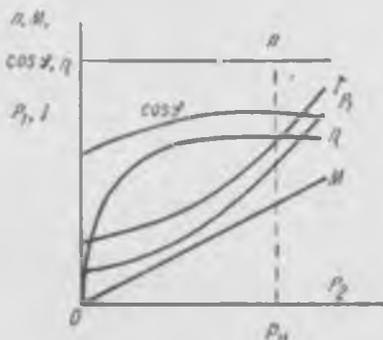


Рис. 11.21

мощности, $\cos \varphi$, к. п. д., потребляемых мощности и тока от полезной мощности P_2 , снимаемой с вала двигателя, при постоянных напряжении сети и токе возбуждения. Графики зависимостей имеют вид кривых, представленных на рис. 11.21.

Так как скорость вращения двигателя постоянна, то скоростная характеристика $n = F(P_2)$; так же как и механическая $n = F(M)$ (см. § 11.12), изображается прямой, парал-

лельной оси абсцисс, а линия момента на валу M — прямой, проходящей через начало координат.

Характер зависимости $\cos \varphi = F(P_2)$ обуславливается установленным током возбуждения двигателя. Если придать за счет тока возбуждения $\cos \varphi = 1$ при номинальной нагрузке, то при недогрузке двигателем будет потреблять опережающий

ток (перевозбуждение), при перегрузке — отстающий ток (недовозбуждение). В обоих случаях коэффициент мощности снижается.

Кривая к. п. д. η имеет такой же вид, как и для асинхронных двигателей. В области нагрузок от $0,3$ до $1,3P_n$ изменения к. п. д. невелики. Характеристика $\eta = F(P_2)$ определяет собой зависимость потребляемой мощности $P_1 = F(P_2)$, поскольку $P_1 = \frac{P_2}{\eta}$. В свою очередь из $P_1 = F(P_2)$ и $\cos \varphi = F(P_2)$ вытекает зависимость для тока, потребляемого статором из сети, $I = F(P_2)$, так как

$$I = \frac{P_1}{mU \cos \varphi}.$$

§ 11.15. Сравнение синхронного двигателя с асинхронным. Область применения синхронных двигателей

По устройству синхронный двигатель сложнее асинхронного, стоимость его больше. Относительная разница в стоимостях выше при небольшой мощности машин. Для работы синхронного двигателя требуются два рода тока. Следует отметить, что в настоящее время наряду с электромашинным возбуждением получают распространение двигатели с самовозбуждением от питающей сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

По пусковым свойствам синхронный и асинхронный двигатели примерно одинаковы. Первый обладает меньшей чувствительностью к колебаниям напряжения сети, так как его вращающий момент, в том числе и максимальный, пропорционален первой степени напряжения. У второго эта зависимость квадратичная. Кроме того, используя в необходимых случаях автоматическое форсирование (увеличение) тока возбуждения синхронного двигателя, оказывается возможным сохранить устойчивость его работы даже при значительных кратковременных снижениях напряжения сети. В отношении регулирования скорости вращения синхронный двигатель уступает асинхронному, хотя регулировочные свойства последнего также нельзя считать хорошими.

Важнейшим преимуществом синхронного двигателя является возможность его работы с $\cos \varphi = 1$ или даже с опережающим (емкостным) током статора. Это преимущество особенно существенно для двигателей на небольшую скорость вращения, поскольку асинхронные двигатели на малые скорости характеризуются низким коэффициентом мощности.

По совокупности свойств синхронные двигатели конкурентноспособны или даже превосходят асинхронные при мощ-

ности примерно от 100 *квт* и выше. В ряде случаев оказывается целесообразным применение синхронных двигателей также при меньшей мощности.

Область их применения в последнее время расширяется. Они широко используются для нерегулируемого электропривода центробежных и поршневых насосов, компрессоров, воздуходувок, мельниц различного назначения, прокатных станов, двигатель-генераторных установок и ряда других механизмов. Их применяют также в тех случаях, когда требуется постоянство скорости вращения электропривода.

§ 11.16. Типы и каталожные данные синхронных двигателей отечественного производства

На паспортном щитке синхронного двигателя приводятся следующие сведения: тип двигателя, номинальная мощность, число фаз, частота тока, линейное напряжение сети, схема соединения фаз статора, токи статора и ротора, коэффициент мощности, скорость вращения, классы изоляции статора и ротора, завод-изготовитель и год выпуска. Все величины, зависящие от загрузки, указываются для режима номинальной нагрузки двигателя.

Возбудитель также снабжается паспортным щитком с указанием его номинальных данных. Кроме этого, ряд дополнительных сведений, необходимых для монтажа и эксплуатации двигателя, приводится в каталоге синхронных двигателей: коэффициент перегрузочной способности $k_M = \frac{M_M}{M_N}$; коэффициент перегрузочной способности по асинхронному моменту $k_M = \frac{M_M}{M_N}$; кратность пускового тока $k_T = \frac{I_n}{I_N}$; кратность пускового момента $k_n = \frac{M_n}{M_N}$ и др.

Промышленность СССР поставляет трехфазные синхронные двигатели на мощности от 40 до 10 000 *квт* для номинальных напряжений 380, 6000, 10 000 *в* и скоростей вращения от 100 *об/мин* и выше. Исполнение двигателя определяется теми условиями, для работы в которых он предназначается. В обозначении типа указываются наименование серии, габаритные данные (непосредственно или условным числом) и число полюсов. Например, синхронный двигатель общего назначения мощностью 400 *квт* на скорость вращения 300 *об/мин* типа СДН15-36-20 (буквенное обозначение (СДН) относится к наименованию серии, первое число (15) — условный номер габарита, второе (36) — осевая длина сердечника статора в сантиметрах и последнее (20) — число полюсов двигателя). Единая серия СДН объединяет синхронные двигате-

ли от 320 до 10 000 квт, 6000 в, 50 гц, 100—1000 об/мин. Серия подобных двигателей закрытого исполнения обозначается СДНЗ.

Для привода водяных насосов вертикальной установки изготавливается серия двигателей ВДС.

Двигатели серии СДК выпускаются безвалными. Их ротор монтируется на консольной части вала приводного механизма, что позволяет существенно уменьшить общий габарит агрегата. Возбудитель такого двигателя устанавливается отдельно.

Электропромышленность страны поставляет и ряд других серий синхронных двигателей различных специальных исполнений и применений. Объединение изготавливаемых двигателей в единые серии по исполнению и назначению в масштабах страны дает возможность удешевить их производство. К специальным синхронным машинам относятся синхронные микродвигатели, предназначенные для использования в устройствах автоматического управления и других электроприводах малой мощности.

Вопросы для самопроверки

Как влияет ток возбуждения ротора на коэффициент мощности синхронного двигателя? Проанализируйте это влияние с помощью векторной диаграммы.

Для каких целей используются синхронные компенсаторы и в чем их отличие от обычных синхронных машин?

Какие зависимости называются рабочими характеристиками синхронного двигателя и какой их характер?

Дайте сравнительную оценку электромеханических свойств синхронного двигателя по отношению к асинхронному.

Какова целесообразная область применения синхронных двигателей?

Перечислите основные технические данные, которые указываются в паспортном щитке и в каталоге синхронных двигателей.

На какие мощности, скорости вращения, напряжения изготавливаются в СССР синхронные двигатели? Что входит в условное обозначение типа двигателя?

§ 11.17. Синхронные микромашины

В ряде устройств возникает необходимость в синхронных машинах, главным образом в двигателях небольшой мощности, исчисляемой в ваттах или долях ватта. Применение обычных синхронных машин такой мощности является неудобным, так как наличие на роторе обмотки возбуждения, питаемой постоянным током, сильно усложняет их эксплуатацию. В таких устройствах получили широкое применение специальные синхронные машины, работающие без обмотки возбуждения.

Синхронная машина с постоянными магнитами. Вместо электромагнитов с обмоткой возбуждения на роторе этих машин размещаются постоянные магниты. В настоящее время для изготовления постоянных магнитов применяют специальные сплавы типа альни, алнико, магнико и другие, характеризующиеся высокой остаточной индукцией, достигающей $5000 \div 15000$ гс, и большой коэрцитивной силой — $200 - 600$ а/см. Применение постоянных магнитов ротора из таких

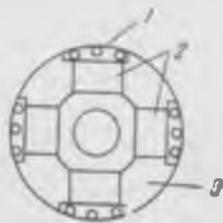


Рис. 11.22

сплавов делает возможным изготовление синхронных машин данного типа не только на малые, но и на средние мощности, сохраняя при этом более или менее удовлетворительными их характеристики. Ротор с явно выраженными полюсами 1 постоянных магнитов 2 часто заливается алюминием и имеет вид цилиндрического тела (рис. 11.22).

Бывают и другие конструкции ротора. Обмотка переменного тока размещается на статоре, конструкция которого обычна для синхронных машин. Принцип работы не отличается от ранее рассмотренного принципа работы синхронных генератора и двигателя. Однако рабочие характеристики их хуже.

Синхронные машины с постоянными магнитами применяются в качестве генераторов и двигателей переменного тока небольшой мощности для специальных устройств, работающих на переменном токе с частотой $50 + 500$ гц.

Реактивный синхронный двигатель. Реактивным называется синхронный двигатель, имеющий ротор с явно выраженными полюсами без обмотки возбуждения и без постоянных магнитов. Сердечники полюсов выполняются ферромагнитными, обычно из листовой стали. В полюсах размещается пусковая клетка (рис. 11.23, а). Часто ротор изготавливается литым из алюминия или неферромагнитного сплава с залитыми внутрь сердечниками из листовой стали (рис. 11.23, б, в). В этом случае роль пусковой клетки выполняет массивное заполнение ротора. Реактивные синхронные двигатели изготавливаются трехфазными и однофазными. Обмотка переменного тока, трехфазная или однофазная, размещается на статоре обычной конструкции. Реактивный двигатель возбуждается со стороны статора за счет реактивной составляющей тока, поступающего из сети.

Для пояснения принципа работы реактивного двигателя обратимся к двухполюсной модели, изображенной на рис. 11.24. Статор с его вращающимся магнитным полем можно представить в виде вращающегося электромагнита. Пусть в начальный момент времени его полюса занимают положе-

ние, показанное на рис. 11.24, а. При этом магнитное поле статора замыкается через ротор вдоль его продольной оси и намагничивает его. Полюса ротора будут испытывать механическую силу притяжения полюсов статора в радиальном направлении, вращающий момент отсутствует. Спустя $\frac{1}{8}T$ полюса статора примут положение, показанное на рис. 11.24, б.



Рис. 11.23

Поле статора, стремясь пройти по меньшему магнитному сопротивлению вдоль продольной оси ротора, исказится и создаст при этом механическую силу притяжения между полюсами, которая содержит, помимо радиальной, также тангенциальную составляющую. На ротор при этом будет действовать момент этой силы, направленный в сторону вращения поля. Еще через $\frac{1}{8}T$ положение полюсов статора станет соответствовать рис. 11.24, в. Их магнитное поле пройдет по поперечной оси

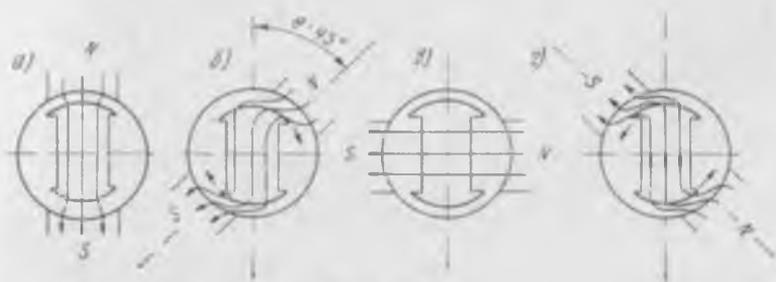


Рис. 11.24

ротора, полюсы которого оказываются в одинаковом положении относительно полюсов статора.

Механическое взаимодействие полюсов и вращающий момент ротора в этом случае равны нулю. При дальнейшем перемещении поля статора (рис. 11.24, г) снова появится тангенциальная сила взаимодействия и вращающий момент, но направление их будет противоположным. За время периода переменного тока вращающий момент неподвижного ротора четырежды меняет знак. В первую и третью четверти периода он направлен в сторону вращения поля статора, во вторую и

четвертую четверти — против поля. Максимальным момент становится при наибольшем искажении магнитного поля, что имеет место при пространственном смещении между осями полюсов статора и ротора на угол Θ , равный 45 электрическим градусам (см. рис. 11.24, б, в).

Если ротору за счет посторонней механической силы придать синхронную скорость вращения в направлении поля статора, то он будет продолжать вращаться с синхронной скоростью самостоятельно, развивая собственный вращающий момент, обусловленный силами притяжения между полюсами ротора и поля статора. Этот момент называется реактивным. Он создается тангенциальной составляющей силы притяжения полюсов, которая появляется при искажении магнитного поля, стремящегося пройти по пути наименьшего магнитного сопротивления

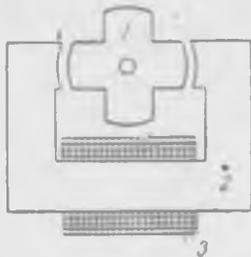


Рис. 11.25

ния, т. е. вдоль продольной оси полюсов ротора.

Поэтому ротор такого двигателя должен быть обязательно явнополюсным. В случае неявнополюсного ротора искажения поля происходить не будет, и между полюсами статора и ротора будут действовать только радиальные силы притяжения. В рабочем режиме при изменении нагрузки изменяется угол между осями полюсов ротора и поля статора в пределах от нуля до 45 электрических градусов. Если нагрузка превысит значение максимального момента, двигатель выпадает из синхронизма.

Пуск в ход осуществляется за счет пусковой клетки ротора. Однофазные реактивные двигатели снабжаются пусковой обмоткой в статоре, которая включается в сеть через фазосдвигающий элемент.

Изготавливают также конденсаторные двигатели с двухфазной обмоткой статора (см. § 10.20). Возможно применение однофазных синхронных реактивных двигателей с расщепленными полюсами и короткозамкнутыми витками в статоре для получения вращающегося поля.

В некоторых случаях находят применение однофазные реактивные двигатели с пульсирующим полем, схема устройства которых представлена на рис. 11.25.

Если ротору 1 такого двигателя придать синхронную скорость вращения в любую сторону, то, притягиваясь за счет магнитных сил в положение, показанное на рис. 11.25, по инерции он будет проходить дальше, чему способствует также уменьшение поля вследствие снижения тока в катушке 3 ста-

тора 2. При последующем увеличении тока и поля будет притягиваться следующая пара полюсов ротора и т. д.

Недостатком этих двигателей является пульсация вращающего момента (с двойной частотой) и связанная с этим неравномерность хода ротора, а также отсутствие пускового момента. Для получения более или менее равномерного вращения ротора приходится увеличивать его момент инерции.

Реактивные синхронные двигатели, так называемого редукторного типа, могут изготавливаться на весьма малую синхронную скорость вращения.

Реактивные синхронные двигатели отличаются простотой конструкции, небольшой стоимостью, отсутствием скользящих контактов. Вместе с тем они имеют невысокие экономические

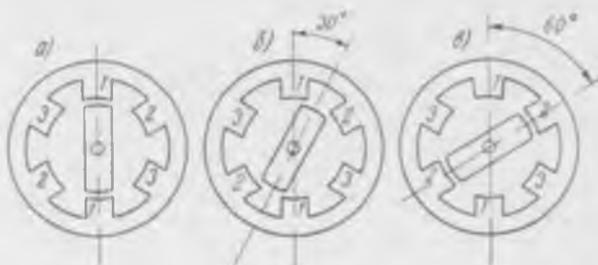


Рис. 11.26

показатели. Их широко применяют для привода лентопротяжных механизмов в различных устройствах (кино, осциллографы, звукозапись) и в других случаях, где требуется постоянная скорость вращения.

В системах программного управления электроприводами получили широкое применение синхронно-импульсные шаговые двигатели, преобразовывающие электромагнитные импульсы в дискретные угловые или линейные перемещения — шаги. Один из таких двигателей схематически изображен на рис. 11.26.

Статор его имеет явно выраженные полюсы. Обмотки возбуждения противоположных полюсов (1—1, 2—2, 3—3) соединяются последовательно и через коммутатор (механический или электронный переключатель) включаются в сеть постоянного тока. С помощью коммутатора обеспечивается определенная последовательность включения обмоток возбуждения статора.

Так, если подать питание на обмотку полюсов 1—1, то за счет реактивного момента ротор займет положение, указанное на рис. 11.26, а. Если затем, не отключая полюсов 1—1, включить обмотку возбуждения полюсов 2—2 и задать им противоположную полярность, то ротор разместится между полюса-

ми 1—1 и 2—2, т. е. повернется на 30° (рис. 11.26, б). При последующем отключении полюсов 1—1 ротор повернется еще на 30° и его продольная ось совместится с осью полюсов 2—2 (рис. 11.26, в) и т. д.

Таким образом, данный двигатель позволяет получить дискретные угловые перемещения с шагом 30° .

Применяются также шаговые двигатели с многополюсной трехфазной обмоткой на статоре. Современные шаговые дви-

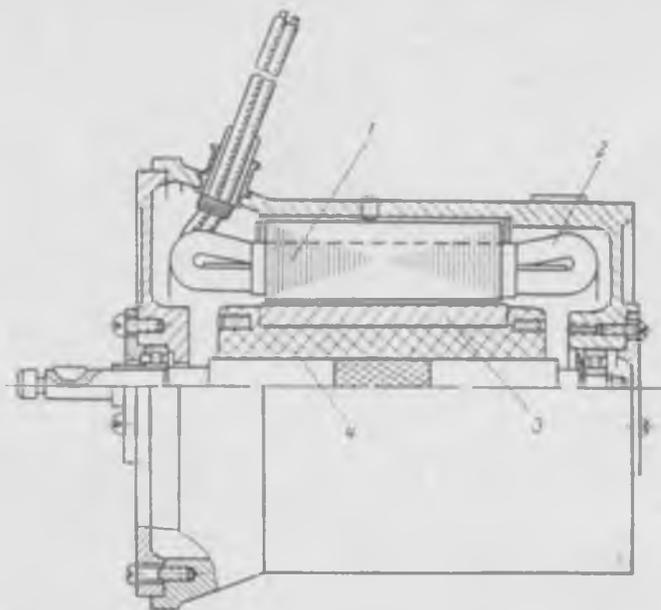


Рис. 11.27

гатели дают возможность получить фиксированные повороты ротора с шагом в несколько градусов или даже в доли градусов. При этом наибольшая частота импульсов, при которой двигатель работает без потери шага, может достигать 200 гц и более.

Гистерезисный двигатель. Гистерезисный двигатель имеет обычный статор 1 с трехфазной или однофазной обмоткой 2, создающей вращающееся магнитное поле. Неявнополюсный ротор выполняется из магнито-твердого материала с широкой петлей гистерезиса. С целью уменьшения момента инерции, а также по экономическим соображениям активная часть ротора изготавливается в виде тонкостенного цилиндра 3, насаженного на втулку 4 (рис. 11.27). Сам цилиндр делается или массивным, или собирается из листовой стали.

По принципу действия гистерезисный двигатель примыкает к синхронным двигателям с постоянными магнитами ротора. При включении статора в сеть его магнитное поле замыкается через активную часть ротора и намагничивает ее. Вследствие гистерезиса намагниченность и направление намагниченности ротора сохраняется и при смещении полюсов статора. При этом между полюсами статора и зонами намагниченности (полюсами) ротора возникают силы магнитного притяжения, которыми создается вращающий момент. Гистерезисный вращающий момент не зависит от скольжения ротора. Если он преобладает над тормозным моментом сопротивления, то ротор разгоняется и достигает синхронной скорости. При случайном увеличении скорости выше синхронной гистерезисный момент меняет свое направление, что способствует возвращению ротора к синхронной скорости вращения.

В случае выполнения активной части ротора массивной при скоростях, отличных от синхронной, ротор создает также асинхронный момент, за счет которого улучшаются пусковые свойства двигателя. При этом возможен также асинхронный режим работы гистерезисного двигателя, который, однако, в практике используется редко.

Для увеличения максимального гистерезисного момента и других показателей двигателя можно прибегнуть к кратковременному (на доли секунды) повышению напряжения на зажимах двигателя в рабочем режиме. По сравнению с реактивными гистерезисные двигатели имеют несколько выше к.п.д. (до 60%), $\cos\varphi$. Важным их преимуществом является возможность изменения скорости вращения путем переключения числа пар полюсов обмотки статора. Реактивные двигатели, имеющие явнополюсный ротор, такой возможности не имеют.

Гистерезисные микродвигатели используются в электроприборах малой мощности, устройствах автоматического управления, для целей звукозаписи и т. д. Находят применение в ряде систем также синхронные микродвигатели, работающие на реактивно-гистерезисном принципе. Ротор таких двигателей делается из магнито-твердой стали, как и у гистерезисного двигателя, и с различным магнитным сопротивлением по поперечной и продольной осям, как у реактивного.

Вопросы для самопроверки

Особенности синхронных машин с постоянными магнитами и область их применения.

Устройство, принцип и область применения синхронных реактивных двигателей.

Особенности реактивных двигателей с пульсирующим полем.

Как работает синхронно-импульсный шаговый двигатель?

Устройство и принцип работы гистерезисного синхронного двигателя.

ГЛАВА 12

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Несмотря на основное применение в промышленности переменного тока, существует ряд отраслей, где необходим постоянный ток или по технологическим условиям, или благодаря некоторым преимуществам двигателей постоянного тока. Это и обуславливает необходимость использования машин постоянного тока в качестве генераторов и двигателей в таких отраслях производства как электрохимия, в электротяговых и подъемных устройствах, в отдельных областях электропривода с широким диапазоном регулирования скорости и т. д.

Генераторы постоянного тока в настоящее время вытесняются статическими преобразователями переменного тока в постоянный (электронные, полупроводниковые и ионные выпрямители).

§ 12.1. Устройство машин постоянного тока

Конструктивно генератор и двигатель выполняются одинаково и состоят из двух основных частей: неподвижного электромагнита — индуктора, создающего основное магнитное поле машины, и вращающегося якоря, в обмотке которого механическая энергия преобразуется в электрическую (генератор), или электрическая — в механическую (двигатель).

Неподвижный индуктор состоит (рис. 12.1) из стальной литой станины 1, главных 2 и дополнительных 3 полюсов с обмотками возбуждения.

На главных (основных) полюсах размещаются катушки с обмотками возбуждения, к которым подводится постоянный ток и в магнитной цепи машины (полюс — воздушный зазор — якорь — воздушный зазор — полюс — станина — полюс) создается основное магнитное поле.

Главные полюса набирают из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм для уменьшения по-

терь от вихревых токов, возникающих из-за пульсации магнитного поля при вращении якоря.

Дополнительные полюса выполняют обычно из ковanej стали, а их обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря. Дополнительное магнитное поле, создаваемое ими, служит для улучшения коммутации.

Вращающаяся часть машины постоянного тока — якорь с обмотками и коллектором (см. рис. 12.1). В современных машинах применяется якорь барабанного типа. Сердечник якоря набирается из лакированных пластин электро-технической стали (0,5 мм) для уменьшения потерь на вихревые токи, которые возникают при вращении якоря в магнитном поле. На внешней поверхности якоря имеются пазы, в которые укладывается замкнутая обмотка.

Обмотка якоря выполняется из медного изолированного провода в виде секций. Секции обмотки укладываются в пазы в два слоя (двухслойная обмотка), изолируются и закрепляются в них деревянными клиньями, а части обмотки, выходящие по торцам якоря из пазов, крепят стальными проволочными бандажами, чтобы предотвратить вырывание обмотки из пазов при вращении якоря. Секции обмотки соединяются между собой и с коллекторными пластинами и образуют замкнутую обмотку с определенным числом параллельных ветвей. Количество ветвей определяется типом обмотки.

Различают параллельные (петлевые) и последовательные (волновые) обмотки. Петлевые (рис. 12.2, а) имеют число параллельных ветвей, равное числу пар полюсов машины, а волновые (рис. 12.2, б) образуют одну пару параллельных ветвей.

Простота и надежность последовательной обмотки обуславливают их наибольшее распространение в машинах общего применения.

Коллектор, к которому присоединяется обмотка якоря, состоит из отдельных медных пластин, изолированных друг от

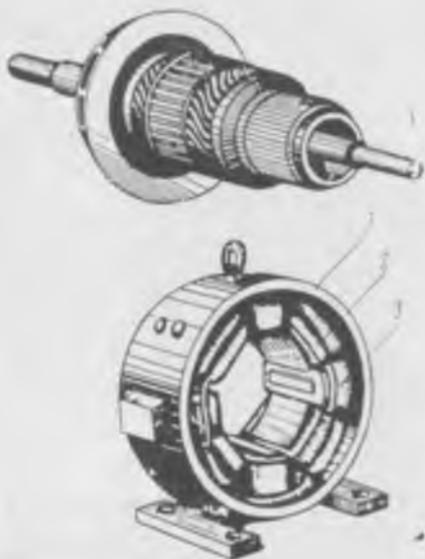


Рис. 12.1

друга и от вала прокладками из миканита (изоляционный материал на основе слюды) (рис. 12.3).

Коллектор предназначен для выпрямления переменного тока якоря в постоянный для внешней цепи у генераторов; у

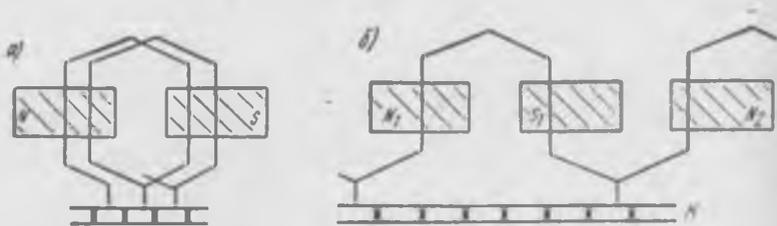


Рис. 12.2

двигателей — для изменения направления тока в проводниках обмотки якоря при его вращении. С одной стороны к пластинам коллектора припаиваются секции обмотки якоря. По коллектору скользят неподвижные щетки, закрепляемые в специальных щеткодержателях. В большинстве машин применяют электрографитированные щетки.

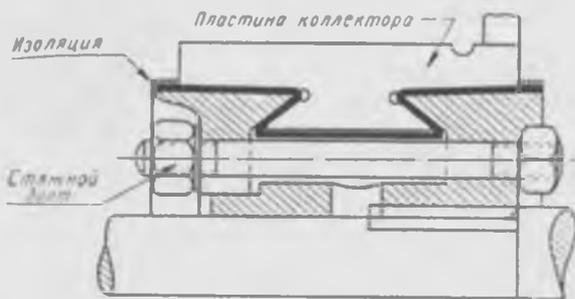


Рис. 12.3

Медно-графитные и бронзо-графитные щетки применяются в машинах низкого напряжения (до 40 в), например в зарядных агрегатах.

§ 12.2. Принцип действия генератора постоянного тока

В генераторе постоянного тока происходит преобразование механической энергии, подводимой от первичного двигателя, в электрическую, снимаемую с обмотки якоря с помощью коллектора и щеток. К щеткам генератора присоединяются потребители электрической энергии постоянного тока.

В основе принципа действия генератора лежит явление электромагнитной индукции, согласно которому при перемещении проводника в магнитном поле в нем наводится электродвижущая сила индукции. Величина и направление этой э.д.с. определяется законом электромагнитной индукции и принципом Ленца (см. § 3.7).

Рассмотрим принципиальную схему генератора постоянного тока (рис. 12.4, а). В магнитном поле, создаваемом полюсами *N* и *S*, вращается один виток обмотки якоря. Концы витка соединены с простейшим коллектором в виде двух изолированных друг от друга полуколец, к которым прилегают щетки *a* и *b*, соединенные с нагрузкой.

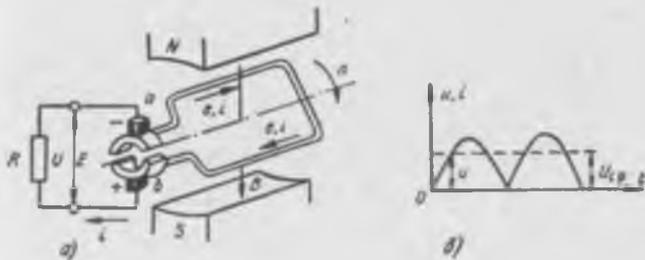


Рис. 12.4

Если виток вращается с постоянной скоростью и магнитное поле равномерно, то в нем будет наводиться э.д.с. и протекать переменный синусоидальный ток. Так как нагрузка присоединена через щетки к двум полукольцам, то, несмотря на то что при перемене сторон витка местами, ток в них меняет свое направление, во внешней цепи он будет протекать в одном направлении.

Таким образом, полукольца (коллекторные пластины) осуществляют преобразование переменного тока обмотки якоря в пульсирующий постоянный ток во внешней цепи генератора (рис. 12.4, б).

Для уменьшения пульсаций и получения больших э.д.с. обмотка якоря состоит из многих витков, присоединяемых к соответствующему числу коллекторных пластин.

Э.д.с. обмотки якоря машины постоянного тока определяется конструкцией машины, скоростью вращения якоря и величиной магнитного потока, создаваемого системой возбуждения,

$$E = \frac{N}{a} \cdot \frac{pn}{60} \Phi = c n \Phi \text{ в,} \quad (12.1)$$

где $c = \frac{Npn}{a \cdot 60}$ — конструктивная постоянная машины, зависящая от типа обмотки якоря и числа пар полюсов;

N — общее число проводников якоря;
 a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;
 p — число пар полюсов;
 n — скорость вращения, об/мин;
 Φ — магнитный поток пары полюсов машины, вб.

Так как конструктивная постоянная для данной машины является величиной определенной, то э.д.с. якоря прямо пропорциональна скорости вращения машины и магнитному потоку. Обычно скорости вращения якоря тоже является постоянной величиной, поэтому регулирование величины э.д.с., а следовательно, и напряжения генератора получают изменением магнитного потока путем регулирования тока в обмотках возбуждения полюсов.

Если внешняя цепь генератора разомкнута (холостой ход), то напряжение на зажимах машины равно э.д.с. $U_0 = E$. Если генератор нагружен, то по обмотке якоря протекает ток и напряжение на зажимах машины становится меньше э.д.с. на величину падения напряжения в сопротивлении цепи якоря

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (12.2)$$

где $R_{\text{я}}$ — суммарное сопротивление цепи якоря.

§ 12.3. Реакция якоря и коммутация в машинах постоянного тока

Если генератор (двигатель) работает без нагрузки, то магнитное поле образуется только током, протекающим в обмотке возбуждения. Этот основной магнитный поток полюсов Φ_0 (рис. 12.5, а) направлен перпендикулярно геометрической нейтральной ($x-x$). В этом случае физическая магнитная нейтраль (линия $\phi-\phi$, проходящая через точки окружности якоря, где индукция равна нулю) совпадает с геометрической нейтралью.

При работе генератора на нагрузку по обмотке якоря протекает ток и создается дополнительное магнитное поле якоря $\Phi_{\text{я}}$, неподвижное в пространстве, ось которого совпадает с осью щеток (рис. 12.5, б). Интенсивность этого поля зависит от тока нагрузки генератора. Магнитное поле якоря накладывается на основное магнитное поле полюсов, искажает и частично ослабляет его. Это воздействие поля якоря на основной поток полюсов и называется реакцией якоря (рис. 12.5, в). В результате реакции якоря у генераторов происходит усиление магнитного поля под сбегающей половиной полюса и ослабление под набегающей, у двигателей — наоборот.

Вследствие насыщения стали полюсов усиление поля меньше, чем ослабление, поэтому результирующий поток полюсов уменьшается.

Искажение магнитного поля приводит к тому, что происхо-

дит смещение физической магнитной нейтрали на некоторый угол α (у генераторов — в направлении вращения, у двигателей — против вращения). Этот угол зависит от нагрузки генератора (двигателя).

Щетки на коллекторе располагают таким образом, чтобы в секциях обмотки, замыкаемых накоротко, э.д.с. была равна нулю, т. е. они должны быть сдвинуты на физическую нейтраль, что создает неудобства при эксплуатации машины. Если щетки остаются на геометрической нейтрали, то это приводит к уменьшению э.д.с. якоря.

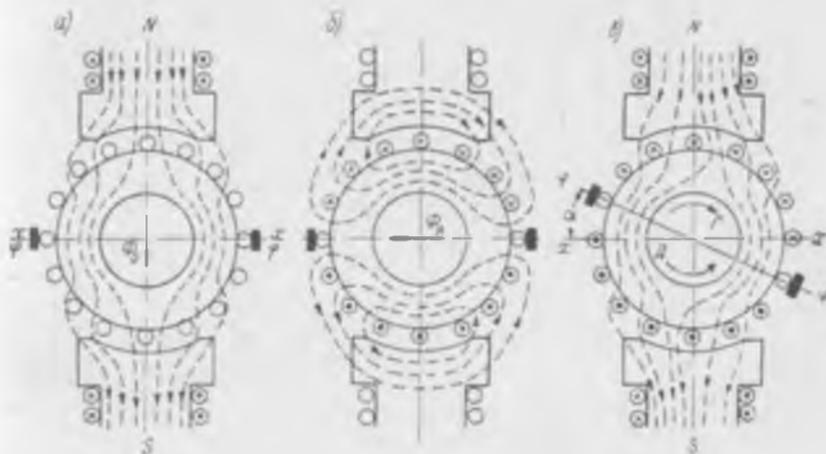


Рис. 12.5

Кроме того, явление реакции якоря ухудшает процессы, происходящие в контакте щетки-коллектор. При вращении коллектора под щетками они замыкают накоротко соседние коллекторные пластины. При этом в секциях обмотки, замкнутых щеткой, происходит изменение направления тока, так как секции обмотки переходят из одной параллельной ветви в другую (рис. 12.6). Быстрое изменение тока в секции приводит к возникновению в ней э.д.с. самоиндукции, а это обуславливает появление электрической дуги между краем щетки и уходящей из под нее коллекторной пластиной. Переключение секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и связанные с этим явления называются процессом коммутации. Реакция якоря оказывает вредное влияние на процесс коммутации, так как в замыкаемой секции появляются добавочные э.д.с. вращения как от магнитного потока полюсов, так и от потока реакции якоря.

Эти добавочные э.д.с. приводят к повышению напряжения между коллекторными пластинами, увеличивают ток в короткозамкнутой секции и искрение под щетками. Искрение на коллекторе машины приводит к порче коллектора и щеток, а в особо неблагоприятных случаях к короткому замыканию машины (круговой огонь на коллекторе).

Для улучшения коммутации в машинах постоянного тока устраиваются дополнительные полюсы, обмотка возбуждения которых включается последовательно с якорем таким образом, чтобы создаваемое ею магнитное поле компенсировало поле реакции якоря в зоне коммутации. Дополнительные полюсы и щетки устанавливаются на линии геометрической нейтрали.

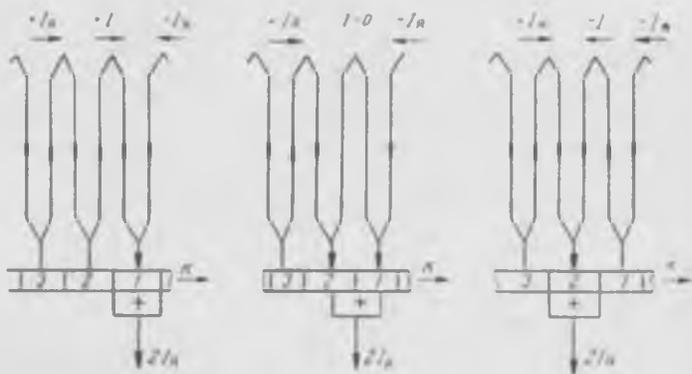


Рис. 12.6

Для устранения влияния реакции якоря на основной поток полюсов и э.д.с. в машинах большой мощности в полюсных наконечниках главных полюсов укладывается компенсационная обмотка, являющаяся зеркальным изображением обмотки якоря. Компенсационная обмотка включается последовательно с якорем таким образом, чтобы ток в ней протекал в направлении, противоположном току обмотки якоря. Тогда магнитный поток этой обмотки будет компенсировать поток обмотки якоря.

Вопросы для самопроверки

Назвать основные части машины постоянного тока и пояснить их конструкцию.

Пояснить принцип действия генератора постоянного тока и назначение коллектора у генератора и двигателя.

Как можно изменить э.д.с. генератора?

Объяснить влияние реакции якоря на величину э.д.с. машины постоянного тока.

Пояснить сущность коммутации машины постоянного тока.

Как уменьшить вредное влияние реакции якоря на работу машины постоянного тока?

§ 12.4. Типы генераторов постоянного тока и их характеристики

В зависимости от способа питания обмоток возбуждения различают генераторы с независимым возбуждением (обмотка возбуждения присоединяется к постороннему источнику

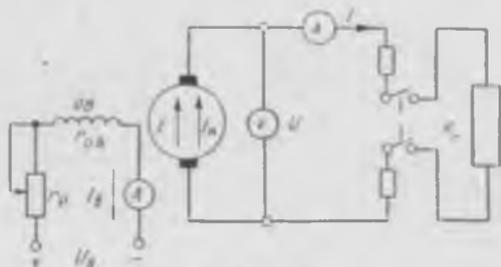


Рис. 127

постоянного тока) и генераторы с самовозбуждением (обмотка возбуждения присоединяется к цепи якоря).

Генераторы с независимым возбуждением. Электрическая схема генератора показана на рис. 12.7. Обмотка возбуждения питается от вспомогательного источника постоянного тока (аккумулятора, генератора постоянного тока, выпрямителя, подключаемого к сети переменного тока). Мощность возбудителя обычно составляет 3 + 4% мощности генератора. Ток в обмотке возбуждения определяется напряжением источника и сопротивлениями цепи возбуждения

$$I_a = \frac{U_B}{r_{об} + r_p} \quad (12.3)$$

и не зависит от нагрузки генератора. Изменяя сопротивление регулировочного реостата r_p , мы имеем возможность плавно

изменять ток возбуждения, а следовательно, магнитный поток машины, э. д. с. и напряжение генератора, так как $U = E - I_a R_a = cn\Phi - I_a R_a$. В режиме холостого хода генератора $I_a = 0$ и $U_0 = E = cn\Phi = f(I_B)$. Эта зависимость э. д. с. от тока возбуждения называется характеристикой холостого хода и имеет вид, показанный на рис. 12.8.

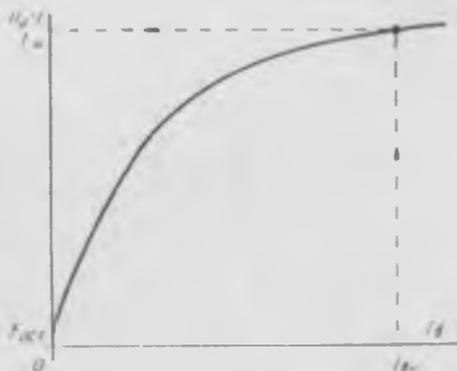


Рис. 128

Характеристика холостого хода начинается со значения $E_{ост}$, обусловленной при $I_A=0$ потоком остаточного магнетизма полюсов. Вид этой характеристики определяется кривой намагничивания магнитной цепи машины.

Характерной особенностью генераторов с независимым возбуждением является возможность плавного регулирования

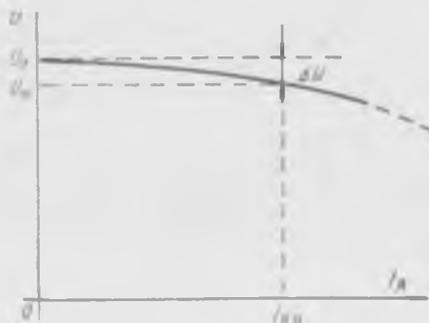


Рис. 12.9

э. д. с., а следовательно, и напряжения на зажимах машины в широких пределах от 0 до U_n , что и обуславливает область их применения для специальных целей (например, для питания электролитических ванн, в схеме генератор — двигатель).

В нагрузочном режиме напряжение на зажимах якоря уменьшается в основном из-за падения напряжения в сопротивлениях цепи якоря, так как $U = E - I_A R_A$. Влияние реакции якоря в пределах номинальной нагрузки генератора невелико. Поэтому снижение напряжения на зажимах машины при увеличении тока якоря от 0 до $I_{я.н}$ незначительно и составляет

$$\Delta U = \frac{U_n - U_0}{U_n} 100 = 5 \div 10\%. \quad (12.4)$$

Зависимость $U = f(I_A)$ называется внешней характеристикой генератора и имеет вид, показанный на рис. 12.9. Напряжение генератора можно поддерживать постоянным, незначительно изменяя ток возбуждения регулировочным реостатом r_p .

Недостаток машины заключается в необходимости иметь вспомогательный источник возбуждения. При перегрузке генератора сверх номинальной мощности напряжение на зажимах машины уменьшается более резко из-за возрастающего размагничивающего действия реакции якоря. Ток якоря возрастает и при коротком замыкании достигает большой величины $I_{к.з.} = (15 \div 20) I_n$. Поэтому, чтобы предотвратить повреждение генератора, должна быть установлена защита, которая отключает его при коротком замыкании (в простейшем случае — плавкие предохранители).

Генераторы с самовозбуждением. Обмотка возбуждения генераторов с самовозбуждением подключается к цепи якоря. В зависимости от способа ее включения различают генераторы с параллельным, с последовательным и со смешанным возбу-

ждением. Возбуждение машин этого типа основано на явлении остаточного магнетизма. Предварительно намагниченные полюса машины сохраняют остаточный магнитный поток $\Phi_{ост}$, который и обуславливает появление в обмотке якоря при вращении остаточной э.д.с. $E_{ост} = c n \Phi_{ост} = (0,02 + 0,04) U_n$.

Эта остаточная э.д.с. обуславливает появление тока в обмотке возбуждения, благодаря чему создается дополнительный магнитный поток, и э.д.с. машины возрастает, так как $E = c n (\Phi_{ост} + \Phi)$. Ток возбуждения опять повышается и увеличивается э.д.с. В результате в обмотке возбуждения

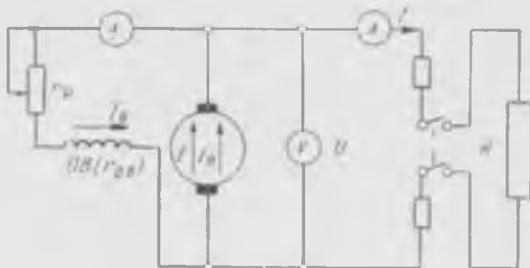


Рис. 12.10

устанавливается определенный ток, величина которого определяется сопротивлением цепи возбуждения. Этот ток обуславливает определенный магнитный поток и соответствующую э.д.с. Самовозбуждение машины происходит при соблюдении следующих условий:

полюса машины должны иметь остаточный магнитный поток;

магнитный поток от тока возбуждения должен совпадать по направлению с остаточным магнитным потоком полюсов, тогда э.д.с. машины будет увеличиваться;

сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше определенной величины.

Генератор с параллельным возбуждением. Электрическая схема генератора приведена на рис. 12.10. Обмотка возбуждения включается параллельно зажимам якоря, рассчитывается на небольшой ток $I_b = (0,01 \div 0,03) I_n$ и имеет большое число витков провода небольшого сечения. Ток в обмотке возбуждения определяется напряжением на зажимах якоря и сопротивлениями цепи возбуждения

$$I_b = \frac{U}{r_b} = \frac{E - I_a R_a}{r_{об} + r_p}. \quad (12.5)$$

Как отмечалось выше, самовозбуждение машины возможно лишь в том случае, если магнитный поток обмотки возбуждения направлен согласно с потоком остаточного магнетизма.

Характеристика холостого хода $E = f(I_a)$ (рис. 12.11) имеет вид, аналогичный характеристике генератора с независимым возбуждением. Генератор устойчиво самовозбуждается в том случае, если $E > I_a r_a$, т. е. если характеристика холостого хода $E = f(I_a)$ идет выше характеристики цепи возбуждения (прямой $U = I_a r_a$). Точка пересечения этих характеристик определяет конечную э. д. с., а следовательно, и напряжение, до которого возбуждается генератор. Если же $E \leq I_a r_a$, самовозбуждения машины не происходит. Сопротивление цепи возбуждения, определяющее начало самовозбуждения (порог самовозбуждения), называется

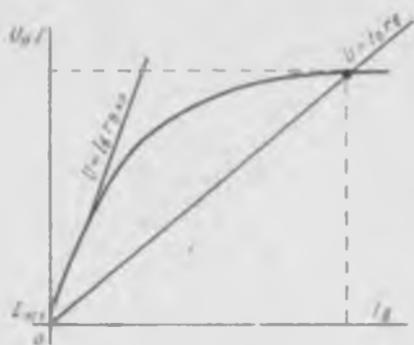


Рис. 12.11

критическим. В этом случае напряжение на зажимах генератора неустойчиво.

Эта особенность снижает регулировочные свойства генератора. У генераторов нормального исполнения устойчивое напряжение в режиме холостого хода составляет $(0,6 \div 0,7) U_{н.}$. Для расширения диапазона регулирования напряжения применяют специальные полюса с насыщающимися участками, что обеспечивает устойчивое напряжение с $0,2 U_{н.}$

В нагрузочном режиме напряжение на зажимах машины снижается в большей мере, чем у генератора с независимым возбуждением. Это объясняется тем, что напряжение уменьшается не только из-за увеличения падения напряжения в цепи якоря ($U = E - I_a R_a$) и реакции якоря, но и вследствие уменьшения тока возбуждения, так как

$$I_a = \frac{U}{r_a} = \frac{E - I_a R_a}{r_a}.$$

Влияние реакции якоря и уменьшение тока возбуждения особенно резко проявляется при увеличении нагрузки сверх номинальной. Изменение сопротивления нагрузки ниже некоторого определенного значения приводит к уменьшению тока нагрузки ввиду резкого уменьшения э. д. с. генератора.

Наибольший возможный ток генератора называется критическим током и составляет $I_{к.р.} = (2 + 2,5) I_{н.}$. Ток короткого замыкания генераторов с параллельным возбужде-

нием определяется остаточной э.д.с. и сопротивлением цепи якоря

$$I_{к.з} = \frac{E_{ост}}{R_{я}}$$

У машин большой мощности ток короткого замыкания несколько больше номинального тока. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением приведена на рис. 12.12. Снижение напряжения на зажимах якоря при увеличении нагрузки генератора до номинальной составляет

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100 = 10 \div 15\%$$

Напряжение генератора можно поддерживать постоянным, изменяя ток возбуждения регулируемым реостатом r_p .

Генераторы с параллельным возбуждением применяются в тех случаях, когда необходимо поддерживать напряжение на нагрузке постоянным или при регулировании напряжения в определенных пределах.

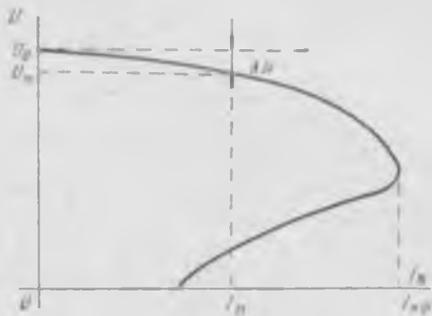


Рис. 12.12

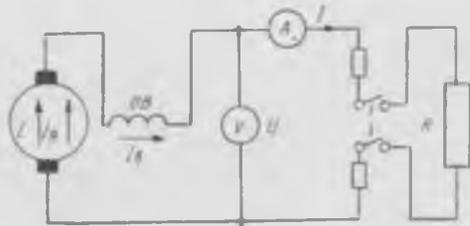


Рис. 12.13

Генератор с последовательным возбуждением. Электрическая схема генератора приведена на рис. 12.13. Обмотка возбуждения этого генератора включается последовательно с якорем, рассчитывается на ток якоря, так как $I_{в} = I_{я} = I$ и имеет малое число витков провода большого сечения. Характеристика холостого хода генератора с последовательным возбуждением может быть снята только при питании обмотки возбуждения от постороннего источника и имеет

такой же вид, как у генератора с независимым возбуждением.

Самовозбуждение генератора происходит при замкнутой цепи якоря. Ток якоря, протекая по обмотке возбуждения, увеличивает магнитное поле полюсов, а следовательно, э.д.с. машины и напряжение на зажимах якоря, так как

$$U = E - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + r_{\text{в}}).$$

С увеличением нагрузки растет ток якоря и напряжение. После насыщения магнитной цепи машины рост напряжения прекращается и при дальнейшем увеличении нагрузки напряжение начинает снижаться из-за увеличения падения его в сопротивлениях якоря и обмотки возбуждения и раз-

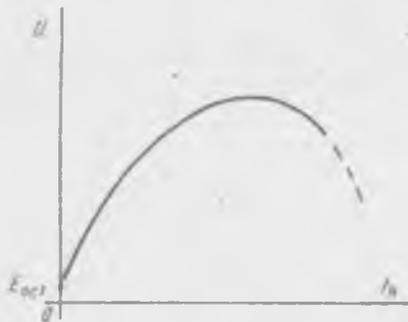


Рис. 12.14

магничивающего действия реакции якоря.

Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением приведена на рис. 12.14. Генератор может применяться для питания постоянной нагрузки.

Свойство последовательной обмотки возбуждения увеличивать напряжение генератора с ростом нагрузки используется для компенсации снижения напряжения, наблюдаемого у генераторов с параллельным возбуждением.

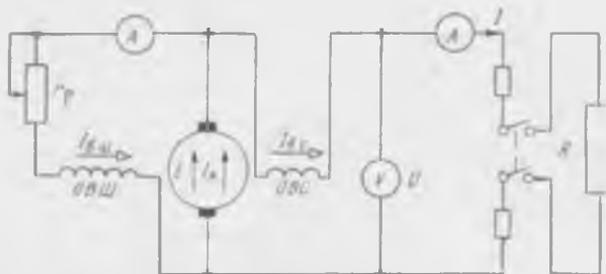


Рис. 12.15

Генератор со смешанным возбуждением. Электрическая схема генератора приведена на рис. 12.15. У генератора имеется две обмотки возбуждения: параллельная *ОВШ* (шунтовая), включаемая параллельно якорю, и последовательная *ОВС* (серийная). Параллельная обмотка рассчитывается на небольшой ток $I_{\text{вш}} = (0,01 - 0,03) I_{\text{я}}$, имеет большое число витков провода малого сечения. Последовательная обмотка

рассчитывается на ток нагрузки $I = I_{в.с} = I_{я} - I_{в.ш}$ и имеет малое число витков провода большого сечения. Благодаря наличию параллельной обмотки генератор со смешанным возбуждением может самовозбуждаться и при разомкнутой цепи нагрузки. Характеристика холостого хода имеет такой же вид, как и у генератора с параллельным возбуждением.

При включении нагрузки появляется ток в последовательной обмотке возбуждения, который создает дополнительное магнитное поле $\Phi_c = f(I)$. Если эта обмотка включена так, что магнитные потоки обеих обмоток возбуждения складываются, т. е. магнитный поток полюсов $\Phi = \Phi_{ш} + \Phi_c$, то э. д. с. машины при увеличении нагрузки будет возрастать, так как увеличивается поток последовательной обмотки. Это позволяет компенсировать снижение напряжения на зажимах машины от реакции якоря и от падения напряжения в сопротивлениях якоря и последовательной обмотки возбуждения, так как

$$U = cn (\Phi_{ш} + \Phi_c) - I_{я} (R_{я} + r_{в.с}). \quad (12.6)$$

Поэтому внешняя характеристика генератора (кривая 2, рис. 12.16) идет выше характеристики генератора с параллельным возбуждением (кривая 1). Если несколько увеличить роль последовательной обмотки, то можно получить увеличение напряжения при росте нагрузки (кривая 3).

Генератор с согласованным включением последовательной и параллельной обмоток возбуждения применяется в тех случаях, когда необходимо регулировать напряжение потребителя (меняя ток $I_{в.ш}$ сопротивлением r_p), или когда необходимо автоматически поддерживать постоянное напряжение при меняющейся нагрузке.

В некоторых случаях (сварочные агрегаты) необходимо, чтобы при росте нагрузки напряжение уменьшалось более резко, чем у генератора с параллельным возбуждением. Для получения такой падающей характеристики (кривая 4, рис. 12.16) последовательную обмотку включают встречно, чтобы результирующий магнитный поток с ростом нагрузки уменьшался $\Phi = \Phi_{ш} - \Phi_c$. Тогда напряжение

$$U = cn (\Phi_{ш} - \Phi_c) - I_{я} (R_{я} + r_{в.с})$$

также будет падать с ростом тока нагрузки.

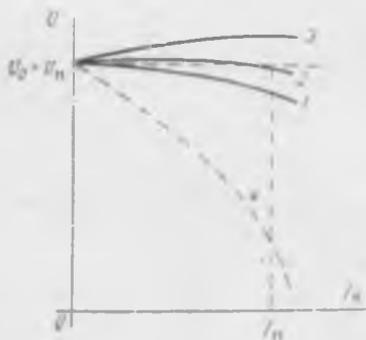


Рис. 12.16

§ 12.5. Электромашинные усилители

Обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением может быть использован в качестве электромашинного усилителя мощности, подводимой к обмотке возбуждения машины. Коэффициент усиления машины определяется отношением мощности,

снятой с якоря генератора, к мощности, подводимой к обмотке возбуждения (цепи управления).

Для машин (0,5 ÷ 30) кВт коэффициент усиления составляет

$$k_y = \frac{P_x}{P_y} = 15 \div 50.$$

Усиление мощности происходит за счет первичного двигателя, вращающего якорь генератора. Коэффициент усиления мощности можно увеличить, если использовать каскадное включение двух генераторов. Мощность управления подводится к обмотке возбуждения первого генератора, а цепь якоря этого генератора присоединяется к обмотке возбуждения второго, более мощного генератора,

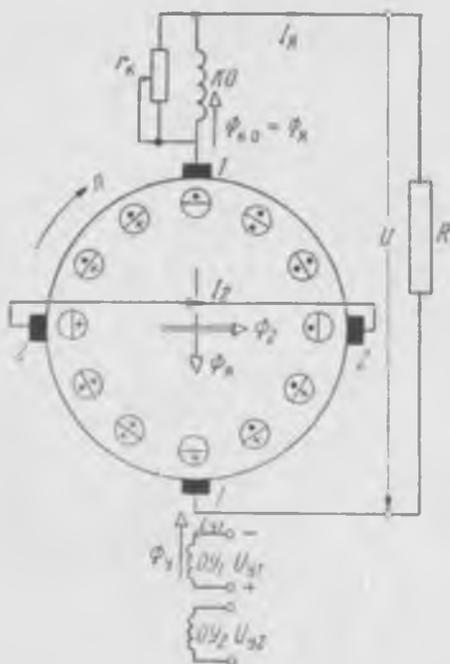


Рис. 12.17

от цепи якоря которого питается нагрузка.

В этом случае, например для каскада машин с выходной мощностью $P_{\text{вых}} = 30$ кВт, можно получить коэффициент усиления $k_y = k_{y1} \cdot k_{y2} = 1000 + 1200$. Однако такой способ усиления мощности непригоден для автоматических устройств из-за большой инерционности (большая индуктивность цепей возбуждения замедляет процесс передачи изменения сигнала управления в основную цепь машины), а также из-за низкого коэффициента усиления, особенно при малых мощностях генераторов.

На практике чаще применяют так называемые электромашинные усилители (ЭМУ) поперечного поля, использующие для усиления мощности магнитный поток реак-

ции якоря. Электрическая схема, поясняющая принцип действия такого усилителя, приведена на рис. 12.17.

Конструктивно ЭМУ представляет собой коллекторную машину постоянного тока с якорем обычного типа, который вращается первичным двигателем. Магнитная система (индуктор) обычно выполняется неявнополюсной. На индукторе размещаются одна или несколько независимых обмоток возбуждения (обмотки управления $OY_1, OY_2...$) и компенсационная обмотка (КО).

На коллекторе размещаются два комплекта щеток:

1—1 — рабочие (продольные) щетки, к которым присоединяется нагрузка — по оси полюсов;

2—2 — вспомогательные (поперечные) щетки, замкнутые накоротко — по линии геометрической нейтрали, как у обычного генератора постоянного тока.

Усилитель работает следующим образом. Ток, протекая по обмоткам управления, создает продольное магнитное поле Φ_y , направленное по оси полюсов машины. При вращении якоря на поперечных щетках 2—2 появляется э. д. с. $E_2 = cn\Phi_y$. Так как они замкнуты накоротко, то в обмотке якоря появится большой ток $I_2 = \frac{E_2}{r_a}$ даже при малых потоках (токах) управления (r_a — мало). Направление этого тока показано во внешних полостях проводников обмотки якоря.

Ток I_2 , протекая в обмотке якоря, создает сильное поперечное магнитное поле реакции якоря Φ_2 , неподвижное в пространстве и направленное по оси щеток 2—2. Это поле будет наводить на рабочих щетках 1—1 э. д. с. $E_1 = cn\Phi_2 \gg E_2$, так как $\Phi_2 \gg \Phi_y$. Направление э. д. с. показано во внутренних половинах проводников обмотки якоря. Поскольку рабочим магнитным полем является поперечное поле реакции якоря, машина называется электромашинным усилителем с поперечным полем.

Если цепь щеток 1—1 замкнута на нагрузку, в обмотке якоря появляется ток I_a , создающий свой поток реакции якоря Φ_a , который будет уменьшать магнитный поток обмотки управления Φ_y и э. д. с. E_2 . Поэтому ЭМУ снабжаются компенсационной обмоткой, действие которой регулируется в процессе наладки машины сопротивлением r_k . В ЭМУ поперечного поля происходит двухступенчатое усиление мощности: обмотка якоря с током I_2 является обмоткой возбуждения второй ступени усиления. Коэффициент усиления машины имеет значительно большую величину, чем каскад из двух машин. Например,

$$k_y = 2000 \div 20\,000.$$

Кроме того, ЭМУ быстро реагирует на изменение тока управления, так как индуктивности обмоток управления

и якоря относительно малы. Электромашинные усилители находят широкое применение для управления большими мощностями путем изменения малой мощности при питании мощных исполнительных двигателей и в качестве вспомогательных машин для различных электроприводов в системах автоматического регулирования.

Задачи. 12.1. Генератор с параллельным возбуждением типа ПН68 дает напряжение на зажимах $U=115$ в при токе нагрузки $I=32$ а.

Определить э. д. с. генератора и сопротивление цепи возбуждения, если сопротивление обмотки якоря $R_{\pi}=0,18$ ом, а ток возбуждения $I_{\text{в}}=1,35$ а.

О т в е т: $E=121$ в, $r_{\text{в}}=85,2$ ом.

12.2. Четырехполюсный генератор постоянного тока с параллельным возбуждением развивает номинальную мощность $P_{\text{н}}=25$ квт при $U_{\text{н}}=115$ в и $n=1300$ об/мин. Обмотка якоря состоит из $N=300$ проводников, соединенных в четыре параллельные ветви ($a=2$). Общее сопротивление цепи возбуждения $r_{\text{в}}=12,5$ ом, сопротивление обмотки якоря $R_{\pi}=0,024$ ом. Определить:

- магнитный поток одной пары полюсов;
- сопротивление одной ветви обмотки якоря.

Р е ш е н и е. Определяем ток якоря генератора

$$I_{\text{я}} = I_{\text{н}} + I_{\text{в}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} + \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{в}}} = \frac{25000}{115} + \frac{115}{12,5} = 226 \text{ а.}$$

Вычисляем э. д. с. генератора

$$E = U_{\text{н}} + I_{\text{я}} R_{\pi} = 115 + 226 \cdot 0,024 = 120,5 \text{ в.}$$

Находим магнитный поток пары полюсов из уравнения э. д. с. генератора

$$E = \frac{pN}{60a} n\Phi,$$

$$\Phi = \frac{60aE}{pNn} = \frac{60 \cdot 2 \cdot 120,5}{2 \cdot 300 \cdot 1300} 1,85 \cdot 10^{-3} \text{ вб.}$$

Сопротивление одной параллельной ветви якоря в четыре раза больше суммарного сопротивления обмотки якоря, т. е.

$$R_{1\pi} = 4R_{\pi} = 4 \cdot 0,024 = 0,096 \text{ ом.}$$

12.3. Э. д. с. якоря генератора постоянного тока со смешанным возбуждением $E=240$ в (см. рис. 12.15).

Определить напряжение на зажимах генератора U и сопротивление параллельной обмотки возбуждения $r_{\text{в.ш}}$, если $K_{\pi}=0,125$ ом, сопротивление последовательной обмотки $r_{\text{в.с}}=0,025$ ом, ток возбуждения $I_{\text{ш.в}}=2$ а, а ток нагрузки $I=64$ а.

Р е ш е н и е. Определяем ток якоря генератора

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{ш.в}} = 66 \text{ а.}$$

Вычисляем напряжение на зажимах нагрузки

$$U = E - I_{\text{я}}(R_{\pi} + r_{\text{в.с}}) = 240 - 66 \cdot 0,15 = 230,1 \text{ в.}$$

Напряжение на зажимах параллельной цепи возбуждения (на зажимах якоря)

$$U_{\text{н}} = E - I_{\text{я}} R_{\pi} = 240 - 66 \cdot 0,125 = 231,7 \text{ в.}$$

Сопротивление параллельной цепи возбуждения

$$r_{\text{в.ш}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{ш.в}}} = \frac{231,7}{2} = 115,85 \text{ ом.}$$

Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения. Каковы особенности генератора с независимым возбуждением?

Пояснить вид внешней характеристики и возможность регулирования напряжения генераторов с независимым возбуждением.

Пояснить принцип и условия самовозбуждения генераторов постоянного тока.

Каковы особенности электрической схемы генератора с параллельным возбуждением?

Чем определяется конечное напряжение, до которого самовозбуждается генератор с параллельным возбуждением?

Каковы особенности внешней характеристики генератора с параллельным возбуждением?

В чем заключаются достоинства и недостатки генератора с последовательным возбуждением?

Какой вид имеет внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением при согласованном и встречном включении обмоток возбуждения?

Недостатки обычного генератора с независимым возбуждением как усилителя мощности.

Пояснить принцип действия электромашинного усилителя мощности с поперечным полем.

§ 12.6. Принцип действия и основные уравнения двигателей постоянного тока

В двигателях происходит преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую энергию, отдаваемую рабочему механизму. В основе принципа действия двигателя лежит взаимодействие магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения, и тока, протекающего в проводниках обмотки якоря.

Рассмотрим принципиальную схему двигателя постоянного тока (рис. 12.18). В магнитном поле, создаваемом полюсами N и S , вращается один виток обмотки якоря. Концы этого витка соединены с простейшим

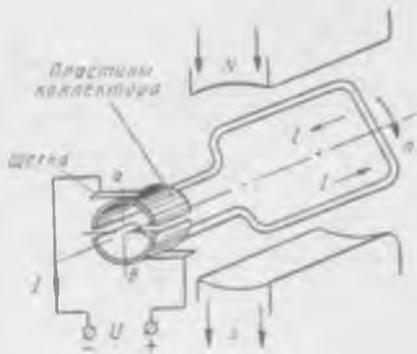


Рис. 12.18

коллектором в виде двух изолированных друг от друга полуколец, к которым с помощью щеток a и b подводится напряжение от сети постоянного тока, и в витке появляется ток. В соответствии с законом Ампера на проводник с током со стороны магнитного поля действует электромагнитная сила

$F \equiv B/l$, и виток приходит во вращение в направлении, которое определяется правилом левой руки (см. § 3.12).

Благодаря наличию полуколец (коллектора) при смене сторон витка под полюсами направление тока в нем изменяется, и электромагнитная сила действует в одном и том же направлении. Обмотка якоря состоит из большого числа витков, каждый из которых соединяется с соответствующей коллекторной пластиной. Вращающий момент двигателя создается суммарным взаимодействием проводников с током и магнитного поля машины.

При вращении якоря проводники обмотки пересекают магнитное поле полюсов и по закону электромагнитной индукции, также как у генератора, в них наводится э. д. с.

$$E = \frac{pN}{60a} n\Phi = cn\Phi. \quad (12.7)$$

Согласно правилу правой руки, э.д.с. обмотки якоря двигателя имеет направление, противоположное току, поэтому ее называют против-э.д.с. По второму закону Кирхгофа, напряжение, подводимое от сети, должно уравновешивать эту против-э.д.с. и падение напряжения в цепи якоря двигателя

$$U = E + I_{\text{я}}R_{\text{я}}. \quad (12.8)$$

Из этого уравнения можно записать, что ток якоря двигателя равен

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}. \quad (12.9)$$

Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ очень мало, поэтому напряжение и против-э.д.с. незначительно отличаются по величине друг от друга.

§ 12.7. Вращающий момент и скорость вращения двигателя

Вращающий момент двигателя создается взаимодействием тока обмотки якоря $I_{\text{я}}$ с результирующим магнитным потоком машины Φ . Формулу вращающего момента можно получить, умножив левую и правую часть уравнения баланса напряжений (12.8) на ток якоря $I_{\text{я}}$. Тогда получим

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2R_{\text{я}}, \quad (12.10)$$

где $UI_{\text{я}}$ — мощность, подводимая из сети к якорю двигателя;
 $EI_{\text{я}}$ — электромагнитная мощность якоря, преобразующаяся в механическую;

$I_{\text{я}}^2R_{\text{я}}$ — потери мощности в сопротивлении цепи якоря, преобразующиеся в тепло.

Электромагнитная мощность и вращающий момент двигателя связаны следующим соотношением:

$$P_{эм} = EI_{я} = M\Omega. \quad (12.11)$$

Учитывая, что $E = \frac{pN}{60a} n\Phi$, а угловая скорость вращения $\Omega = \frac{\pi n}{30}$, можно записать, что

$$M = \frac{EI_{я}}{\Omega} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{я} = k\Phi I_{я}. \quad (12.12)$$

Из этого выражения видно, что величина и направление вращающего момента определяется величиной и направлением тока якоря и тока возбуждения, так как $\Phi = f(I_{в})$. Поэтому для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление тока или в обмотке возбуждения, или в обмотке якоря. При одновременном изменении направления тока в обеих обмотках якорь будет вращаться в том же направлении.

Уравнение скорости двигателя постоянного тока можно получить из формул (12.7) и (12.8) в виде

$$n = \frac{E}{c\Phi} = \frac{U - I_{я}R_{я}}{c\Phi}. \quad (12.13)$$

Из этого соотношения видно, что скорость вращения можно регулировать изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя, и изменением магнитного потока (тока возбуждения). В первом случае скорость регулируется вниз от номинальной, во втором — вверх от номинальной. Характер изменения скорости и вращающего момента при изменении нагрузки и тока возбуждения зависит от типа двигателя.

В зависимости от способа включения обмотки возбуждения различают двигатели постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

§ 12.8. Пуск двигателей постоянного тока

В начальный момент пуска, т. е. при включении двигателя в сеть, скорость вращения, а следовательно, и противо-э. д. с. якоря равны нулю. Поэтому в цепи якоря и питающей сети протекает пусковой ток, равный

$$I_{яп} = \frac{U}{R_{я}}. \quad (12.14)$$

Так как сопротивление цепи якоря мало, то при включении двигателя на номинальное напряжение этот ток достигает

большой величины $I_{я.п} = (10 \div 20)I_n$ и представляет значительную опасность для обмотки якоря, коллектора и щеток. Для ограничения пускового тока и плавного наращивания скорости в цепь якоря включается добавочное сопротивление (R_n) и

$$I_{я.п} = \frac{U}{R_n + R_a} \leq (1,2 \div 2)I_n \quad (12.15)$$

Добавочное сопротивление R_n выполняется в виде пускового реостата с несколькими ступенями, которые постепенно выключаются по мере увеличения скорости.

Из уравнения (12.15) получим

$$R_n = \frac{U}{(1,2 \div 2)I_n} - R_a \quad (12.16)$$

Следует отметить, что пусковой реостат работает временно только в стадии пуска, а при нормальной работе он полностью выводится, и ток якоря определяется выражением

$$I_a = \frac{U - E}{R_a}$$

При остановке двигателя сначала постепенно вводится пусковой реостат и ставится на холостой контакт, а затем двигатель отключается от сети.

§ 12.9. Двигатель с параллельным возбуждением

Электрическая схема двигателя с параллельным возбуждением показана на рис. 12.19. Обмотка возбуждения, имеющая большое число витков, включается параллельно с цепью якоря, и ток, потребляемый двигателем из сети, равен

$$I = I_a + I_n \quad (12.17)$$

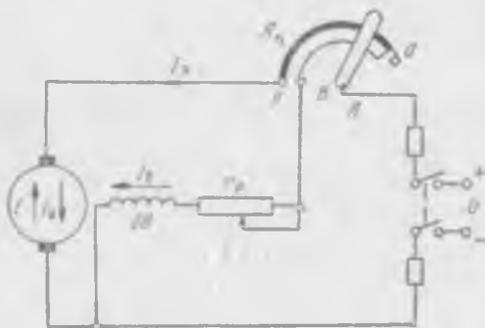


Рис. 12.19

В цепи якоря включается пусковой реостат $R_{п}$, к зажиму Л — сеть (линия), к зажиму Я — цепь якоря, к зажиму В, соединенному с контактной дугой, подключается цепь параллельной обмотки возбуждения. Контактная дуга соединена с сопротивлением реостата $R_{п}$ и цепь возбуждения всегда замкнута на $R_{п}$ и обмотку якоря. Поэтому при остановке двигателя энергия магнитного поля системы возбуждения постепенно переходит в тепловую энергию в сопротивлениях этого контура. Быстрый разрыв цепи возбуждения привел бы к появлению большой э. д. с. самоиндукции, опасной для изоляции обмотки возбуждения. В цепи возбуждения включается регулировочный реостат $r_{р}$, который позволяет регулировать ток возбуждения

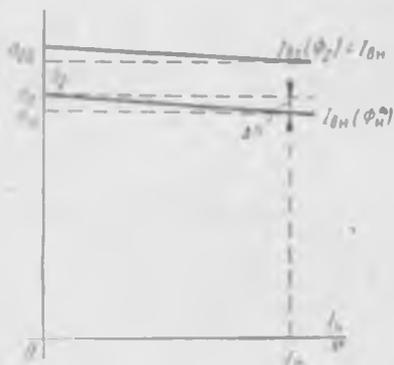


Рис. 12.20

$$I_{в} = \frac{U}{r_{о.в} + r_{р}} = \frac{U}{r_{в}} \quad (12.18)$$

Ограничение пускового тока реостатом $R_{п}$ приводит к уменьшению пускового момента двигателя. Поэтому для его увеличения сопротивление регулировочного реостата цепи возбуждения в период пуска полностью выводится, чем обеспечивается максимальный магнитный поток двигателя, так как в обмотке возбуждения будет протекать максимальный ток

$$I_{в \text{ макс}} = \frac{U}{r_{о.в}} > \frac{U}{r_{о.в} + r_{р}}$$

После разгона двигателя в цепи возбуждения регулировочным реостатом $r_{р}$ устанавливается номинальный ток $I_{вн}$.

Скорость двигателя с параллельным возбуждением при $U = \text{const}$ и $I_{в} = \text{const}$ зависит от тока якоря, который определяется нагрузкой на валу двигателя (моментом сопротивления M_c). Эта зависимость $n = f(I_{я})$ называется скоростной характеристикой, которая представлена на рис. 12.20.

Аналогичный вид имеет и механическая характеристика двигателя $n = f(M)$, так как $M \equiv I_{я}$.

Из уравнения $n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c\Phi}$ видно, что скорость двигателя уменьшается при возрастании нагрузки из-за увеличения падения напряжения в цепи якоря, но, с другой стороны,

скорость увеличивается из-за размагничивающего действия реакции якоря.

Поэтому с увеличением нагрузки скорость двигателя может или уменьшаться, или увеличиваться (при сильно выраженной реакции якоря), или оставаться приблизительно постоянной. Обычно скорость двигателей уменьшается и

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_n}{n_n} 100 = 2 + 6\%. \quad (12.19)$$

Таким образом, механическая характеристика $n=f(M)$ двигателя с параллельным возбуждением является достаточно жесткой. Возможность изменять ток возбуждения реостатом r_p позволяет при необходимости получить постоянную скорость (I_b уменьшают).

Регулирование скорости изменением тока возбуждения при $M_c = \text{const}$ и $U = \text{const}$. Если двигатель вращается со скоростью n_1 при $M_c = \text{const}$, то уменьшение тока возбуждения I_b реостатом r_p приводит к резкому возрастанию тока якоря $I_a = \frac{U - E}{R_a}$ из-за уменьшения противо-э. д. с. $E = cn\Phi$, так как скорость вращения не может быстро увеличиться из-за инерции, а магнитный поток уменьшается.

Увеличение тока I_a приводит к возрастанию момента двигателя $M = k\Phi I_a$, который становится больше тормозного момента ($M > M_c$). Скорость двигателя начинает увеличиваться, возрастает противо-э. д. с., а ток якоря и вращающий момент начинают уменьшаться. Этот процесс продолжается до восстановления равновесия между M и M_c при скорости $n_2 > n_1$ и токе якоря

$$I_{a2} = \frac{M_c}{k\Phi_2} > I_{a1} = \frac{M_c}{k\Phi_1}$$

Переходный процесс изменения скорости и тока якоря при уменьшении тока возбуждения изображен на рис. 12.21.

Механические характеристики $n=f(M)$ при $I_{b2} < I_{bн}$ и $I_{bн}$ показаны на рис. 12.20.

При таком способе регулирования скорости к. п. д. двигателя остается почти неизменным, так как увеличиваются мощности — потребляемая из сети $P_1 = U(I_a + I_b)$ и полезная $P_2 = M \frac{2\pi n}{60}$. Это обуславливает экономичность регулирования. Регулирование скорости можно осуществлять в широких пределах (8 : 1). Верхний предел определяется механической прочностью, коммутационными процессами и устойчивостью работы двигателя.

Представляет интерес зависимость $n=f(I_a)$ при $U = \text{const}$ в режиме холостого хода. В этом случае ток якоря мал и можно считать, что $U = E + I_a R_a \approx cn\Phi$. Отсюда следует почти

обратно пропорциональная (гиперболическая) зависимость между скоростью вращения и током возбуждения ($\Phi = k_n I_n$):

$$n_0 = \frac{U}{c\Phi} = \frac{U}{ck_n I_n}. \quad (12.20)$$

Эта характеристика холостого хода $n = f(I_n)$ показана на рис. 12.22.

Из выражения (12.20) следует, что уменьшение тока I_n до нуля (или обрыв цепи возбуждения) в режиме холостого хода двигателя с параллельным возбуждением приводит к не-

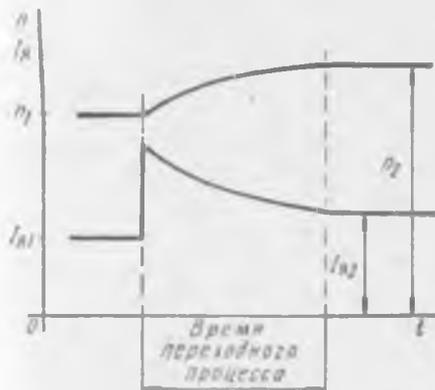


Рис. 12.21

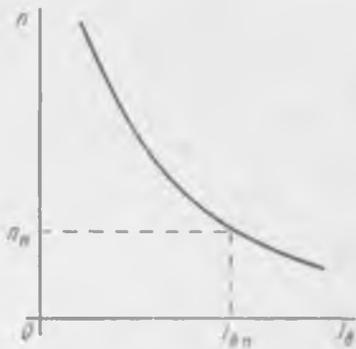


Рис. 12.22

допустимому возрастанию скорости ($n \rightarrow \infty$), так как $\Phi = \Phi_{ост}$ очень мал, что заставляет особенно тщательно выполнять все соединения в цепи возбуждения.

Регулирование скорости изменением напряжения, подводимого к якору двигателя при $I_n = \text{const}$. Если двигатель вращается при $M_c = \text{const}$ со скоростью n_n , то при уменьшении напряжения до значения $U_1 < U_n$ ток якоря $I_{я.н} = \frac{U_n - E}{R_я}$ сначала снизится до $I_{я1} = \frac{U_1 - E}{R_я}$, что приведет к уменьшению момента двигателя, который станет меньше момента сопротивления. Скорость вращения якоря и его противо-э. д. с. уменьшатся, а ток якоря и вращающий момент начнут возрастать. Этот процесс продолжится до восстановления равновесия между M и M_c при скорости $n_2 < n_n$ и прежней величине тока якоря

$$I_{я1} = \frac{M_c}{k\Phi_n} = I_{я.н.}$$

Напряжение, подводимое к якору двигателя, можно изменять включением в цепь якоря регулировочного реостата R_p

(этот реостат одновременно будет использоваться и при пуске двигателя). Тогда

$$I_{я.н} = \frac{U_n - E}{R_{я} + R_p} = \frac{M_c}{k\Phi}, \quad n = \frac{U_n - I_{я.н}(R_{я} + R_p)}{c\Phi_n}$$

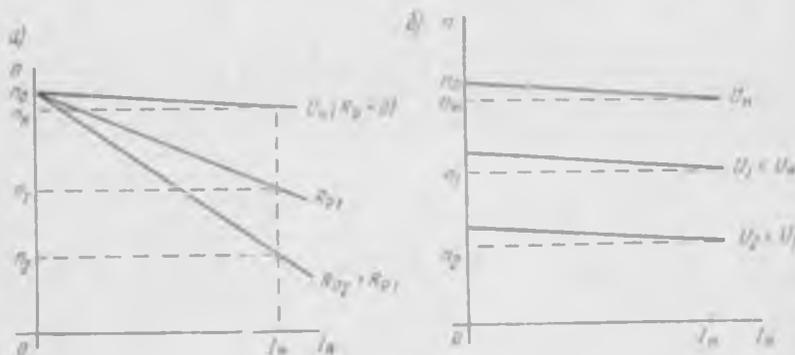


Рис. 12.23

и скоростная (механическая) характеристика становится менее жесткой и будет иметь вид, показанный на рис. 12.23, а. Этот способ регулирования скорости является неэкономичным, так как при той же потребляемой мощности $P_1 = U_n(I_{я.н} + I_n)$ полезная мощность двигателя $P_2 =$

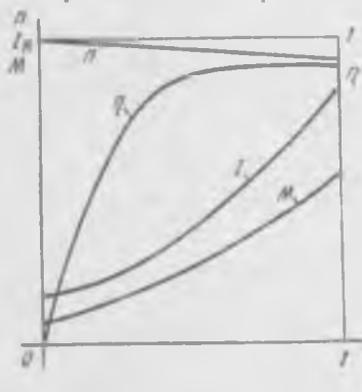


Рис. 12.24

$= M \cdot \frac{2\pi n}{60}$ уменьшается пропорционально скорости, а в регулирующем реостате теряется мощность $I_{я.н}^2 R_p$.

Более экономичным способом регулирования является изменение напряжения, подводимого к якорю двигателя от питающего генератора. Изменение напряжения генератора достигается регулированием малого тока параллельной обмотки возбуждения (система генератор — двигатель, применяемая в специальных установках).

В этом случае жесткость скоростной (механической) характеристики остается одинаковой (рис. 12.23, б). Возможный предел регулирования (10 : 1) вниз от номинальной скорости

В настоящее время генераторы постоянного тока таких систем заменяются управляемыми выпрямителями (ионными и полупроводниковыми).

Таким образом, двигатели с параллельным возбуждением обладают хорошими регулировочными свойствами, что и обуславливает их широкое применение в электроприводах с широким диапазоном плавного регулирования скорости. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением при $I_n = \text{const}$ и $U = \text{const}$ показаны на рис. 12.24.

§ 12.10. Двигатель с последовательным возбуждением

Электрическая схема двигателя с последовательным возбуждением изображена на рис. 12.25. Обмотка возбуждения, имеющая малое число витков, включена последовательно с обмоткой якоря. Ток возбуждения равен току якоря $I_n = I_a = I$, пока магнитная система ненасыщена, вращающий момент

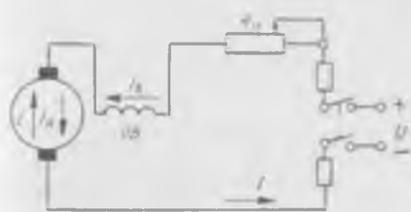


Рис. 12.25

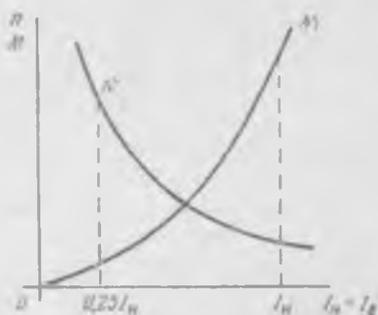


Рис. 12.26

двигателя пропорционален квадрату тока якоря ($M = k\Phi I_a \equiv I_a^2$).

Благодаря такой зависимости двигатель обладает хорошими пусковыми и перегрузочными свойствами. Несмотря на ограничение пускового тока реостатом R_n , двигатель развивает большой пусковой момент, а при перегрузках обеспечивает возрастание момента при умеренном потреблении тока из сети, так как $I = I_a \equiv \sqrt{M}$.

Скорость двигателя с последовательным возбуждением с ростом нагрузки на валу резко уменьшается, так как с увеличением тока якоря магнитный поток также возрастает, а влияние падения напряжения $I_a R_a$ и реакции якоря невелико.

Скоростная характеристика двигателя $n = f(I_a)$, имеющая вид гиперболической зависимости, приведена на рис. 12.26. Там же показана зависимость $M = f(I_a)$, при нагрузках до 0,75 номинальной $M \equiv I_a^2$; при больших нагрузках магнитная система на-

сыщается и момент становится почти пропорциональным току якоря.

Скоростная характеристика двигателя с последовательным возбуждением является мягкой. При уменьшении нагрузки скорость вращения возрастает и при нагрузках менее $0,25 P_{II}$ становится опасной для двигателя. Поэтому двигатель

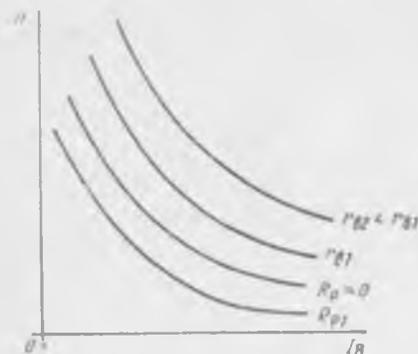


Рис. 12.27

с последовательным возбуждением нельзя использовать при нагрузках менее $0,25 P_{II}$ и тем более на холостом ходу (двигатель идет в «разнос»). Двигатели последовательного возбуждения могут применяться при гарантированной 25% загрузке и надежном соединении с рабочим механизмом (ременные передачи запрещаются).

Регулирование скорости изменением тока возбуждения. Изменение тока $I_{в}$ достигается шунтированием обмотки возбуждения реостатом $r_{в}$. При снижении $r_{в}$ ток в обмотке возбуждения и соответственно магнитный поток уменьшаются, а скорость вращения увеличивается, так как

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c \Phi}$$

где $R_{я}$ — суммарное сопротивление последовательной цепи двигателя.

Скоростные характеристики при разных значениях $r_{в}$ приведены на рис. 12.27.

Регулирование скорости изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя. Для снижения напряжения, подводимого к якорю двигателя, последовательно с ним включают регулировочный реостат $R_{р}$, на котором падает часть сетевого напряжения. Скорость вращения уменьшается, так как

$$n = \frac{U - I_{я}(R_{я} + R_{р})}{c \Phi}$$

и скоростная характеристика идет ниже естественной ($R_{р} = 0$) (рис. 12.27). Этот способ регулирования неэкономичен из-за потерь в регулировочном реостате $I_{я}^2 R_{р}$.

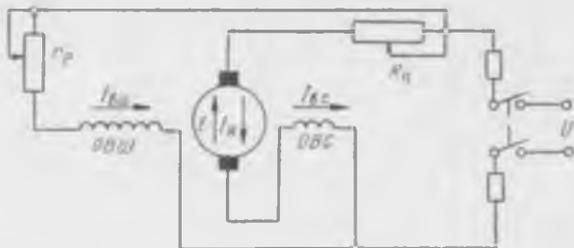
Часто для электропривода используют два двигателя (электротяга, подъемные устройства). В этом случае на малых скоростях их включают последовательно, а на больших — параллельно. В сочетании с последовательно включен-

ным реостатом R_p схема позволяет осуществить более экономичное и плавное регулирование скорости.

Двигатели с последовательным возбуждением применяются в приводах с тяжелыми условиями работы (тяговые двигатели электротранспорта и подъемных устройств).

§ 12.11. Двигатель со смешанным возбуждением

Электрическая схема двигателя со смешанным возбуждением показана на рис. 12.28. У двигателя имеются две обмотки возбуждения: параллельная $ОВШ$ и последовательная



Р и с. 12.28

$ОВС$. Обычно они включаются согласованно, т. е. магнитный поток полюсов равен $\Phi = \Phi_{ш} + \Phi_{с}$. Двигатель потребляет из сети ток $I = I_{я} + I_{в.ш}$. В цепи якоря включается пусковой реостат R_n для ограничения пускового тока двигателя. В цепи параллельной обмотки включается регулировочный реостат r_p для изменения тока возбуждения при регулировании скорости.

Вращающий момент и скорость вращения двигателя определяются магнитными потоками обеих обмоток:

$$M = k(\Phi_{ш} + \Phi_{с})I_{я}, \quad (12.21)$$

$$n = \frac{U - I_{я}R_{я}}{c(\Phi_{ш} + \Phi_{с})}. \quad (12.22)$$

Характеристики двигателя зависят от соотношения между намагничивающими силами обеих обмоток. Если основную роль играет параллельная обмотка ($I_{в.ш}\omega_{ш} > I_{в.с}\omega_{с}$), то двигатель по своим свойствам приближается к характеристикам двигателя с параллельным возбуждением. Его скоростная (механическая) характеристика будет более мягкой, так как с ростом нагрузки поток последовательной обмотки увеличивается, а скорость вращения уменьшается в большей мере (кривая 2, рис. 12.29), чем у двигателя с параллельным возбуждением (кривая 1). Пусковые и перегрузочные свойства

двигателя со смешанным возбуждением лучше в сравнении с двигателем параллельного возбуждения.

Если основную роль играет последовательная обмотка ($I_{в.с}\omega_c > I_{в.ш}\omega_{ш}$), то двигатель по своим свойствам приближается к характеристикам двигателя с последовательным возбуждением. Его скоростная характеристика (кривая 3, рис. 12.29) будет мягкой. При пуске двигатель развивает большой пусковой момент, а при перегрузках значительно увеличивает вращающий момент. Наличие параллельной обмотки ограничивает скорость двигателя при малых нагрузках, и он может работать при нагрузке на валу меньше $0,25 P_n$ и даже в режиме холостого хода.

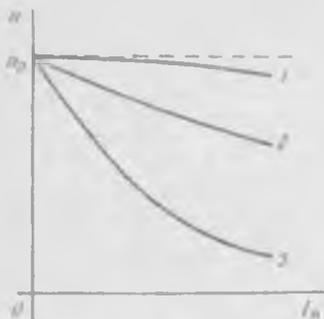


Рис. 12.29

Регулирование скорости двигателя производится аналогично двигателю с параллельным возбуждением.

Хорошие пусковые, перегрузочные и регулировочные свойства двигателя со смешанным возбуждением обуславливают его применение в электроприводах с резко меняющейся нагрузкой (электротяга, прокатные станы, прессы и т. д.).

Хорошие пусковые, перегрузочные и регулировочные свойства двигателя со смешанным возбуждением обуславливают его применение в электроприводах с резко меняющейся нагрузкой (электротяга, прокатные станы, прессы и т. д.).

§ 12.12. Потери мощности, к.п.д.

и номинальные данные машин постоянного тока

При работе генератора (двигателя) постоянного тока полезная (выходная) мощность, отдаваемая машиной, всегда меньше подводимой от первичного двигателя (сети) за счет наличия нескольких видов потерь мощности.

Электрические потери. Электрические потери имеют место:

а) в обмотке якоря, последовательной обмотке возбуждения, обмотке добавочных полюсов и компенсационной обмотке

$$\Delta P_{я} = I_{я}^2 (r_{я} + r_{в.с} + r_{д.п} + r_{к.о}) \quad (12.23)$$

(все сопротивления должны быть приведены к температуре 75°C);

б) в щеточном контакте

$$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} I_{я} \quad (12.24)$$

(падение напряжения $\Delta U_{щ}$ зависит от сорта щеток; для угольных и графитных — $2,0 \text{ в}$, для металло-графитных — $0,6 \text{ в}$);

в) в параллельной обмотке возбуждения

$$\Delta P_{\text{в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}}. \quad (12.25)$$

Потери в стали. Потери в стали складываются из потерь на перемагничивание (гистерезис) и вихревые токи в стальном сердечнике якоря при его вращении в постоянном магнитном поле. Общие потери в стали рассчитываются по удельным потерям ($p_{1,0}$; $p_{1,5}$; $p_{1,7}$; в вт/кг), задаваемым в справочниках для определенной марки стали при индукциях $B=1,0$; $1,5$; $1,7 \text{ тл}$ и частоте $f=50 \text{ гц}$, по формуле, например

$$\Delta P_{\text{ст.я}} = k_{\text{ст}} \cdot p_{1,0} \left(\frac{f}{50}\right)^2 B^2 G, \quad (12.26)$$

где $k_{\text{ст}}$ — коэффициент, учитывающий обработку, сборку стали и неравномерность распределения индукции (для спинки якоря — $2,4+4,0$; для зубцов — $1,7 + + 2,0$);

$f = \frac{n\pi}{60}$ — частота перемагничивания сердечника якоря;

$\beta = 1,2 \div 1,6$ — коэффициент сорта стали;

B — индукция в данной части магнитопровода;

G — вес стали этой части сердечника.

Механические потери. Механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ обусловлены потерями на трение в подшипниках, щеток о коллектор, пропорциональных скорости вращения, и потерями на вентиляцию, пропорциональных кубу скорости.

В машинах нормального исполнения $\Delta P_{\text{мех}} = 4 \div 1\%$ для машин мощностью от 10 до 500 квт .

Добавочные потери. Добавочные потери обусловлены потерями в стали полюсных наконечников от пульсации магнитного потока при вращении зубчатого якоря, на вихревые токи при большом сечении меди обмотки якоря и т. д. По ГОСТ 183—55 эти потери составляют для генераторов 1% от отдаваемой мощности, для двигателей 1% от потребляемой мощности.

К.п.д. машины определяется отношением полезной мощности (P_2) к мощности потребляемой (P_1). Для генераторов можно записать, что

$$\eta_{\text{г}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta P} = \frac{UI}{UI + \Sigma \Delta P}, \quad (12.27)$$

где UI — мощность, отдаваемая потребителю (в сеть);

$\Sigma \Delta P$ — суммарные потери.

Для двигателей

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{UI}, \quad (12.28)$$

где UI — мощность, потребляемая двигателем из сети.

К. п. д. машин постоянного тока зависит от нагрузки и при номинальной мощности составляет $\eta_n = 0,75 \div 0,95$.

Номинальные данные машин постоянного тока. Основные номинальные данные машин постоянного тока: номинальные мощность P_n , напряжение U_n , ток I_n , скорость вращения n_n . Эти величины указываются на паспорте машины.

Для генераторов номинальная мощность, отдаваемая потребителю, равна $P_n = U_n I_n$.

Для двигателей номинальная мощность, отдаваемая с вала рабочему механизму, определяет номинальный вращающий момент

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} \text{ нм} = 975 \frac{P_n}{n_n} \text{ кгм}. \quad (12.29)$$

где P_n в квт; n_n в об/мин.

§ 12.13. Основные типы машин постоянного тока

В зависимости от требований, предъявляемых условиями эксплуатации, машины постоянного тока разделяются на нормальные и специальные. Они выпускаются сериями однотипной конструкции и различных мощностей.

Основная серия *П* нормальных машин постоянного тока заменяет ранее выпускавшуюся серию *ПН*. Машины серии *П* мощностью от 0,3 до 100 квт изготавливаются 11 габаритов (по наружному диаметру), в каждом габарите — две длины сердечника. Серия содержит 22 типоразмера (с *П11*, *П12* до *П111*, *П112*). Первая цифра после буквы *П* (от 1 до 11) обозначает номер габарита, вторая (последняя) — номер длины сердечника.

Серия *П* включает генераторы на напряжение 115, 230, 460 в при скорости вращения 1450 и 2850 об/мин и двигатели на напряжение 110, 220, 440 в при скорости вращения 600, 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин.

Все двигатели изготавливаются с основной параллельной и легкой последовательной обмоткой возбуждения. Выводы концов обмоток маркируются:

$Я_1, Я_2$ — обмотка якоря;

$Д_1, Д_2$ — обмотка добавочных полюсов;

$С_1, С_2$ — последовательная обмотка возбуждения;

$Ш_1, Ш_2$ — параллельная обмотка.

Часть соединений выполняется внутри машины (например, обмотка якоря соединяется с обмоткой добавочных полюсов).

Кроме основного исполнения — брызгозащищенного, серия имеет несколько модификаций:

двигатели с широким диапазоном регулирования скорости; закрытые машины (обдуваемые и радиаторные).

В сравнении с серией ПН машины серии П отличаются меньшим весом и расходом активных материалов (стали и меди на 25%), широкой унификацией деталей (подшипниковых щитов, выводных зажимов и т. д.).

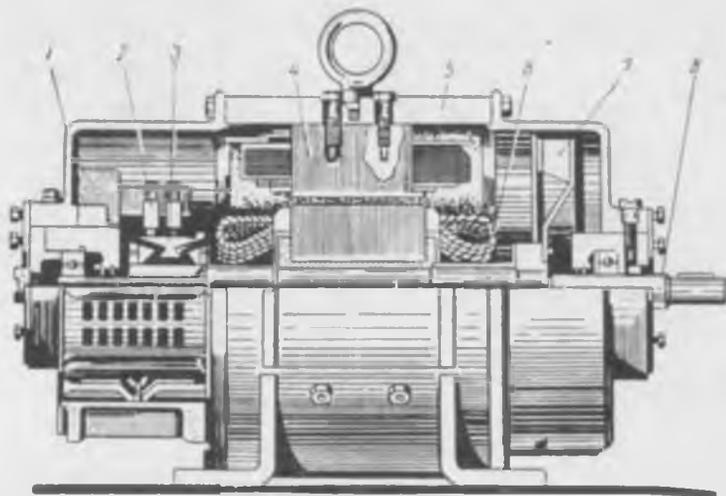


Рис. 12.30. Внешний вид машины постоянного тока:

1 — подшипниковый щит (крышка); 2 — щеткодержатель со щеткой; 3 — коллектор; 4 — основной полюс; 5 — станина; 6 — обмотка якоря; 7 — вентилятор; 8 — вал

Машины серии П предназначены для работы в промышленных приводах с широким диапазоном плавного регулирования скорости (двигатели) или для питания потребителей постоянного тока (генераторы). На рис. 12.30 показан внешний вид машины постоянного тока нормальной серии.

Кроме того, заводами выпускаются машины специальных серий:

тяговые двигатели до 3300 в и мощности до 1000 квт;

машины систем генератор — двигатель для прокатных станов мощностью до 10 000 квт;

электромашинные усилители на мощности до нескольких десятков киловатт;

машины малой мощности (микромашинны).

Задачи. 12.4. Генератор с параллельным возбуждением типа П62 имеет следующие номинальные данные: $P_n = 25$ квт; $U_n = 230$ в; $n_n = 2850$ об/мин. Сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов $R_a = 0,15$ ом; сопротивление цепи возбуждения $r_b = 140$ ом; потери в стали и механические потери $\Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} = 3,2\%$ от P_n .

Определить ток якоря, э. д. с. и к. п. д. генератора при номинальной нагрузке.

Решение. Ток якоря генератора при номинальной нагрузке

$$I_{я.н} = I_n + I_{в.н} = \frac{P_n}{U_n} + \frac{U_n}{r_n} = 110 \text{ а.}$$

Э. д. с. генератора

$$E = U_n + I_{я.н} R_n = 230 + 110 \cdot 0,15 = 246,5 \text{ в.}$$

Потери мощности в цепи якоря

$$\Delta P_n = I_{я.н}^2 R_n = 110^2 \cdot 0,15 = 1820 \text{ вт.}$$

Потери в параллельной цепи возбуждения

$$\Delta P_n = \frac{U_n^2}{r_n} = \frac{230^2}{140} = 380 \text{ вт.}$$

Потери в стали и механические

$$\Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} = \frac{3,2}{100} = 0,032 = 3,2\% = 800 \text{ вт.}$$

Механическая мощность, подводимая к валу генератора,

$$P_1 = P_n + \Sigma \Delta P = 25 + (1,82 + 0,38 + 0,8) = 28 \text{ квт.}$$

К. п. д. генератора при номинальной нагрузке

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_1} = \frac{25}{28} = 0,89.$$

12.5. Определить номинальный момент двигателя типа П71 с номинальными данными: $U_n = 220 \text{ в}$; $P_n = 32 \text{ квт}$; $n_n = 3000 \text{ об/мин}$.

Ответ: $M_n = 101,8 \text{ нм} = 10,4 \text{ кгм}$.

12.6. Дать характеристику машины по паспортным данным (рис. 12.31); определить потребляемую мощность и к. п. д. при номинальной нагрузке.

Ответ: $P_1 = 5,4 \text{ квт}$; $\eta_n = 0,76$.

 Завод „Динамо“ им КИРОВА Москва 1952 г.			
ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА			
Гост	184-47	Зав.№	370390
Тип	ПН-10	кат.№	РП 1067
кВт	4,1	пв%	25
Ампер	49	Вольт	110
об/мин	1450	Возбужд	ПАРАЛ
шунт.обм.	110	Вес	185

Рис. 12.31

12.7. Определить пусковой ток (I_n) двигателя П71 с номинальными данными: $P_n = 11 \text{ квт}$; $U_n = 220 \text{ в}$; $I_n = 62 \text{ а}$; $R_n = 0,09 \text{ ом}$; $I_n = 3 \text{ а}$; $n_n = 1000 \text{ об/мин}$; $\eta_n = 79\%$ при прямом включении в сеть. Подобрать сопротивление пускового реостата R_n для ограничения пускового тока до $2I_n$.

Ответ: $I_n = 2444 \text{ а}$; $R_n = 1,7 \text{ ом}$.

12.8. Определить необходимую скорость вращения якоря двигателя (задача 12.7), работающего в режиме генератора с $U_n = 230 \text{ в}$. Вычислить номинальную мощность этого генератора, если насыщение стали и нагрев принять такими же, как у двигателя.

Решение. Определяем ток якоря двигателя и генератора

$$I_{я.дв} = I_H - I_B = 62 - 3 = 59 \text{ а} = I_{я.г.}$$

Вычисляем э. д. с. двигателя и генератора без учета падения напряжения в щеточном контакте:

$$E_{дв} = U_H - I_{я.дв} R_H = 220 - 59 \cdot 0,09 = 214,7 \text{ в};$$

$$E_{г} = U_{г} + I_{я.г} R_H = 230 + 59 \cdot 0,09 = 235,3 \text{ в}.$$

Скорость вращения якоря определяем из соотношения

$$\frac{E_{г}}{E_{дв}} = \frac{с n_{г} \Phi_{г}}{с n_{дв} \Phi_{дв}} = \frac{n_{г}}{n_{дв}},$$

так как по условию $\Phi_{г} = \Phi_{дв}$,

$$n_{г} = \frac{E_{г}}{E_{дв}} \cdot n_{дв} = \frac{235,3}{214,7} \cdot 1000 = 1090 \text{ об/мин.}$$

Если учесть падение напряжения в щеточном контакте, например при $\Delta U_{щ} = 2 \text{ в}$, то

$$E'_{дв} = U_H - I_{я.дв} R_H - \Delta U_{щ} = 214,7 - 2 = 212,7 \text{ в},$$

$$E'_{г} = U_{г} + I_{я.г} R_H + \Delta U_{щ} = 235,3 + 2 = 237,3 \text{ в}$$

и скорость вращения должна быть

$$n_{г} = \frac{E'_{г}}{E'_{дв}} \cdot n_{дв} = \frac{237,3}{212,7} \cdot 1000 = 1110 \text{ об/мин.}$$

Находим номинальный ток и номинальную мощность:

$$I_{я.г} = I_{я.г} - I_B = 59 - 3 = 56 \text{ а},$$

$$P_{н.г} = U_{г} \cdot I_{я.г} = 230 \cdot 56 = 12,9 \text{ квт.}$$

12.9. Определить скорость вращения якоря генератора ПН145 с $P_H = 16,5 \text{ квт}$, $U_H = 230 \text{ в}$, $n_H = 1460 \text{ об/мин}$, $R_H = 0,18 \text{ ом}$, $r_B = 82 \text{ ом}$ при работе двигателем с $U_{дв} = 220 \text{ в}$, если насыщение стали и нагрев двигателя принять такими же, как у генератора. Вычислить электромагнитную мощность двигателя.

Решение. Находим ток якоря генератора и двигателя:

$$I_{я.г} = I_H + I_B = \frac{P_H}{U_H} + \frac{U_H}{r_B} = 72 + 2,8 = 74,8 \text{ а};$$

$$I_{я.дв} = I_{я.г} \text{ (по условию).}$$

Ток, потребляемый двигателем из сети, равен

$$I_{дв} = I_{я.дв} + I_B = 74,8 + 2,8 = 77,6 \text{ а}.$$

Вычисляем э. д. с. генератора и двигателя:

$$E_{г} = U_H + I_{я.г} R_H = 230 + 74,8 \cdot 0,18 = 243,5 \text{ в};$$

$$E_{дв} = U_{дв} - I_{я.дв} R_H = 220 - 74,8 \cdot 0,18 = 206,5 \text{ в}.$$

Скорость вращения якоря двигателя находим из соотношения

$$n_{дв} = \frac{E_{дв}}{E_{г}} \cdot n_{г} = \frac{206,5}{243,5} \cdot 1460 = 1240 \text{ об/мин.}$$

Определяем электромагнитную мощность двигателя

$$P_{эм} = E_{дв} I_{я.дв} = 206,5 \cdot 74,8 = 15,5 \text{ квт.}$$

Номинальная мощность двигателя будет несколько меньше.

12.10. Тяговый двигатель с последовательным возбуждением при напряжении $U=550$ в развивает на валу полезный момент $M=10$ кгм и потребляет ток $I=27$ а при скорости вращения $n=1120$ об/мин.

Определить полезную мощность двигателя и его к. п. д.

О т в е т: $P_2=11,5$ кВт; $\eta=0,775$.

Вопросы для самопроверки

Пояснить принцип действия двигателя постоянного тока.

Записать уравнения противо-э. д. с. и тока якоря двигателя.

Вывести уравнение вращающего момента двигателя. Как изменить направление вращения якоря двигателя?

Вывести уравнение скорости двигателя и пояснить возможности ее регулирования.

Пояснить назначение пускового реостата и выбор величины его сопротивления.

Особенности схемы двигателя с параллельным возбуждением.

Пояснить регулирование скорости двигателя изменением тока возбуждения. Почему разрыв цепи возбуждения опасен для двигателя?

Как регулируется скорость этого двигателя изменением напряжения?

Как изменяется скорость двигателя с последовательным возбуждением при изменении нагрузки на его валу? Почему работа с малой нагрузкой для двигателя недопустима?

Пояснить регулирование скорости двигателя с последовательным возбуждением.

Как изменяются вращающий момент и скорость двигателя со смешанным возбуждением с ростом нагрузки?

Какие из потерь в машине постоянного тока зависят от нагрузки? Какие потери являются постоянными?

ГЛАВА 13

ЭЛЕКТРОПРИВОД

§ 13.1. Общие сведения

Из общего объема производимой электрической энергии, годовая выработка которой в СССР в 1967 г. составила около 600 млрд. кВт · ч, большая ее часть используется в электрических двигателях для приведения в движение различных механизмов. Устройство, состоящее из электрического двигателя, аппаратуры управления и передаточных механизмов, необходимых для осуществления связи двигателя с рабочей машиной, называется электрическим приводом. Различают групповой, или трансмиссионный, электропривод, при котором электрический двигатель приводит в движение трансмиссию, связанную с несколькими рабочими машинами, одиночный, когда каждый рабочий механизм имеет свой электрический двигатель, и многодвигательный электропривод, состоящий из нескольких двигателей, каждый из которых приводит в движение определенную часть рабочей машины.

При групповом электроприводе оказываются существенными потери энергии в трансмиссионных передачах. Кроме того, возникают трудности в управлении отдельными механизмами и почти исключается возможность их автоматизации. Поэтому такой привод в настоящее время не применяется.

Этих недостатков не имеют одиночный и многодвигательный приводы. Главным их преимуществом, особенно многодвигательного привода, являются хорошие возможности автоматизации производственных механизмов за счет осуществления автоматического управления электроприводами с помощью электрической аппаратуры. Кроме того, многодвигательный электропривод сложных механизмов позволяет освободиться от внутренних передаточных устройств, что удешевляет механизмы и повышает экономичность их работы. Многие сложные современные механизмы (крупные металлообрабатывающие станки, прокатные станы и др.) имеют де-

сятки или даже сотни электрических двигателей, управление которыми в большинстве случаев автоматизируется.

Автоматическое управление электроприводами является важным условием и средством автоматизации производственных процессов.

§ 13.2. Уравнение движения электропривода

При работе электропривода вращающий момент электродвигателя уравнивается статическим моментом сопротивления, который обусловлен нагрузкой рабочего механизма и потерями в нем, и динамическим моментом, который определяется изменением запаса кинетической энергии движущихся масс. Соответственно этому уравнение движения электропривода записывается в следующем виде:

$$M - M_c = M_d, \quad (13.1)$$

где M — момент электродвигателя;

M_c — статический момент сопротивления рабочего механизма на валу двигателя;

M_d — динамический момент сил инерции, приведенный к валу двигателя.

Динамический момент вращающегося тела, как известно из механики, равен

$$M_d = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (13.2)$$

где J — момент инерции тела вращения относительно оси вращения;

Ω — угловая скорость вращения.

Момент инерции вращающегося тела

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}, \quad (13.3)$$

где m — масса тела ($m = \frac{G}{g}$);

G — вес тела;

g — ускорение силы тяжести;

ρ — радиус инерции;

D — диаметр инерции.

Величина GD^2 называется маховым моментом. Обычно при практических расчетах в уравнение движения электропривода вводится маховой момент GD^2 вместо момента инерции J . При этом уравнение движения привода принимает вид

$$M - M_c = M_d = J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2\pi}{4g \cdot 30} \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$M - M_c = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (13.4)$$

где n — скорость вращения электропривода.

Отсюда

$$\frac{dn}{dt} = \frac{M - M_c}{GD^2} \cdot 375. \quad (13.5)$$

Из уравнения (13.5) вытекает, что при $M = M_c$ скорость вращения электропривода будет неизменной ($n = \text{const}$), а динамический момент отсутствует, так как $\frac{dn}{dt} = 0$. Такой режим называется установившимся. При $M > M_c$ $\frac{dn}{dt} > 0$, что соответствует ускорению двигателя. Динамический момент в этом случае направлен противоположно моменту двигателя, ограничивая ускорение. Если $M < M_c$, то $\frac{dn}{dt} < 0$ и двигатель замедляется. Динамический момент при этом действует согласно с моментом двигателя.

Ускорение и замедление (отрицательное ускорение) электропривода находятся в обратной зависимости от махового момента GD^2 . Так как всегда $GD^2 > 0$, то при заданной разности $M - M_c$ переход электропривода от одной скорости к другой не может происходить мгновенно.

Режим работы электропривода при изменяющейся скорости вращения ($\frac{dn}{dt} \neq 0$) называется п е р е х о д н ы м. Переходный режим имеет место при пуске, торможении, изменении нагрузки, регулировании скорости и т. д.

Продолжительность переходного режима зависит от махового момента или от момента инерции движущихся тел.

На основании уравнения движения (13.4) может быть решена важная практическая задача о зависимости скорости от времени в переходном режиме или о времени переходного режима электропривода. Из формулы (13.4) вытекает, что

$$dn = \frac{375(M - M_c)}{GD^2} dt \text{ и } dt = \frac{GD^2}{375(M - M_c)} dn.$$

Однако для ее решения необходимо знать зависимости $M = F(n)$ и $M_c = F(n)$. Зависимость $M = F(n)$ определяется механической характеристикой двигателя (см. гл. 10, 11, 12). Так же как и для двигателя, зависимость момента статического сопротивления рабочего механизма от скорости вращения называют механической характеристикой рабочего механизма. Ее характер определяется исключительно свойствами рабочего механизма.

На рис. 13.1 показаны механические характеристики некоторых механизмов. Линия 1 относится к механизмам, момент сопротивления которых постоянен и не зависит от скорости вращения (например, подъемные механизмы); линия 2 ха-

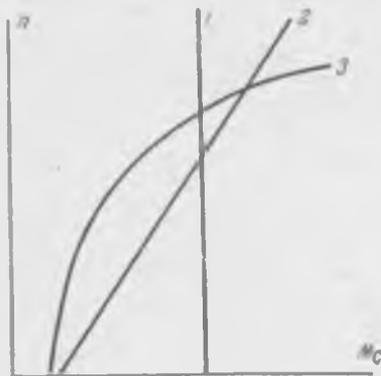


Рис. 13.1

актерна для механизмов, момент сопротивления которых пропорционален скорости вращения, а линия 3 свойственна механизмам, у которых момент зависит от квадрата или более высокой степени скорости вращения (вентиляторы, насосы и т. п.).

Так как механические характеристики весьма разнообразны, то уравнение (13.4) не может быть решено в общем виде. Кроме того, часто оказывается невозможным выразить аналитически зависимость моментов от скорости. В таких

случаях приходится прибегать к тем или иным приближенным методам решения. В более простом случае, когда можно считать $M = \text{const}$ и $M_c = \text{const}$, время переходного процесса равно

$$t = \frac{GD^2}{375(M - M_c)} \int_{n_1}^{n_2} dn = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(M - M_c)}.$$

§ 13.3. Приведение моментов к одной оси

Если отдельные звенья электропривода имеют различные скорости вращения, то, для того чтобы избежать трудоемкой задачи решения уравнений движения при различных скоростях, прибегают к приведению моментов сопротивления, инерции и маховых моментов к одной оси вращения, обычно к валу электродвигателя. Так же поступают и в случаях, когда в кинематической схеме электропривода содержатся элементы, движущиеся поступательно.

Приведение моментов сопротивления. В основе приведения статических моментов сопротивления к валу двигателя лежит равенство статических мощностей на валах двигателя (Д) и рабочего механизма (РМ) с учетом к. п. д. промежуточных передач (рис. 13.2, а). При установившемся режиме мощность на валу двигателя

$$P = M\Omega = M_c\Omega,$$

где Ω — угловая скорость двигателя;

M_c — статический момент сопротивления на валу двигателя.

Эту же мощность можно выразить через момент на валу рабочей машины и к. п. д. передачи, т. е.

$$P = M_c \Omega = \frac{M_{с.м} \Omega_m}{\eta},$$

где $M_{с.м}$ — момент на валу рабочего механизма;
 η — к. п. д. передачи;

Ω_m — угловая скорость вала рабочего механизма.

Отсюда приведенный момент сопротивления

$$M_c = \frac{M_{с.м} \cdot \Omega_m}{\eta \cdot \Omega} = \frac{M_{с.м} \cdot n_m}{\eta \cdot n} = \frac{M_{с.м}}{\eta i}. \quad (13.6)$$

Здесь $i = \frac{\Omega}{\Omega_m} = \frac{\pi n \cdot 30}{30 n_m} = \frac{n}{n_m}$ — передаточное отношение.

Если передаточное устройство содержит несколько элементов с различными скоростями, то в формулу (13.6) следует вводить общий к. п. д.

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_m$$

и общее передаточное отношение

$$i = i_1 i_2 \dots i_m.$$

Для механизмов с поступательным движением вместо уравнения моментов (13.1) записывается уравнение сил

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt},$$

где F — движущая сила;

F_c — сила статического сопротивления;

v — линейная скорость перемещения;

m — масса движущихся поступательно тел;

$m \frac{dv}{dt}$ — сила инерции.

В установившемся режиме сила инерции отсутствует, и мощность, требуемая для данной скорости перемещения, равна

$$P = \frac{F_c v}{\eta}.$$

Отсюда

$$M_c \Omega = \frac{F_c v}{\eta}$$

или

$$M_c = \frac{F_c v}{\Omega \eta} = \frac{F_c v \cdot 30}{\pi n \eta}. \quad (13.7)$$

Приведение моментов инерции и маховых моментов. Такое приведение производится исходя из общего запаса кинетической энергии во всех звеньях движущихся масс электро-

привода. На примере (рис. 13.2, а) общий запас кинетической энергии равен

$$A = J_{\text{д}} \frac{\Omega^2}{2} + J_1 \frac{\Omega_1^2}{2} + J_{\text{м}} \frac{\Omega_{\text{м}}^2}{2}.$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции должен обеспечивать тот же запас кинетической энергии, т. е.

$$A = J \frac{\Omega^2}{2} = J_{\text{д}} \frac{\Omega^2}{2} + J_1 \frac{\Omega_1^2}{2} + J_{\text{м}} \frac{\Omega_{\text{м}}^2}{2}.$$

Отсюда приведенный момент инерции J равен

$$J = J_{\text{д}} + J_1 \left(\frac{\Omega_1}{\Omega} \right)^2 + J_{\text{м}} \left(\frac{\Omega_{\text{м}}}{\Omega} \right)^2.$$

Обозначим

$$\frac{\Omega_1}{\Omega} = \frac{n_1}{n} = \frac{1}{i_1}; \quad \frac{\Omega_{\text{м}}}{\Omega} = \frac{n_{\text{м}}}{n_1} \cdot \frac{n_1}{n} = \frac{1}{i_1 i_{\text{м}}},$$

где $i_1 = \frac{n}{n_1}$, $i_{\text{м}} = \frac{n}{n_{\text{м}}}$ — передаточные отношения,

тогда

$$J = J_{\text{д}} + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_{\text{м}} \frac{1}{i_1^2 i_{\text{м}}^2}. \quad (13.8)$$

Так как $GD^2 = 4gJ$, то подобное выражение будет и для приведенного махового момента

$$GD^2 = GD_{\text{д}}^2 + GD_1^2 \frac{1}{i_1^2} + GD_{\text{м}}^2 \frac{1}{i_1^2 i_{\text{м}}^2}. \quad (13.9)$$

Следовательно, влияние на величину приведенных моментов инерции и махового момента отдельных элементов электропривода тем меньше, чем меньше их скорость вращения. Поэтому часто является допустимым определение приведенного махового момента по маховому моменту двигателя

$$GD^2 = k \cdot GD_{\text{д}}^2, \quad (13.10)$$

где k — коэффициент, приближенно учитывающий влияние остальных звеньев электропривода ($k \approx 1,05 + 1,25$).

Конечно, такое допущение неприемлемо, если механизм содержит крупные вращающиеся массы.

В случае привода механизма с поступательным движением приведенный момент инерции поступательно перемещающихся элементов определяется из равенства

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\Omega^2}{2},$$

откуда

$$J = m \left(\frac{v}{\Omega} \right)^2, \quad (13.11)$$

а приведенный маховой момент

$$GD^2 = 4gm \left(\frac{v}{\Omega} \right)^2 = 4G \left(\frac{v}{\Omega} \right)^2. \quad (13.12)$$

где m — масса движущихся поступательно частей;

v — скорость их движения;

Ω — угловая скорость двигателя;

g — ускорение силы тяжести.

Рассчитанный по (13.12) маховой момент следует суммировать с приведенным моментом, полученным по формуле (13.9) для вращающихся частей электропривода.

Задачи. 13.1. Электродвигатель нагружен на постоянный, не зависящий от скорости, момент сопротивления $M_c = 7$ кгм. Суммарный приведенный момент инерции $J = 0,3$ кгм сек².

Определить время разгона двигателя до номинальной скорости $n_n = 960$ об/мин из состояния покоя, если средний вращающий момент за время разгона $M_n = 15$ кгм.

Решение. Приведенный маховой момент

$$GD^2 = 4gJ = 4 \cdot 9,81 \cdot 0,3 = 11,7 \text{ кгм}^2.$$

Среднее значение динамического момента на валу двигателя во время разгона

$$M_d = M_n - M_c = 15 - 7 = 8 \text{ кгм}.$$

Для определения времени разгона воспользуемся уравнением (13.4), из которого следует

$$dt = \frac{GD^2 dn}{375 (M_n - M_c)}$$

$$t = \int_{n=0}^{n=n_n} \frac{GD^2 dn}{375 (M_n - M_c)} = \frac{GD^2 n_n}{375 (M_n - M_c)} = \frac{GD^2 n_n}{375 M_d}$$

Подставляя значения, получаем время разгона

$$t = \frac{11,7 \cdot 960}{375 \cdot 8} = 3,8 \text{ сек}$$

13.2. Определить приведенные к валу двигателя момент статического сопротивления и маховой момент механизма подъемной лебедки с грузом (рис. 13.2, б).

Известны: вес груза $G = 1000$ кг, скорость подъема груза $v = 25$ м/мин, скорость вращения двигателя 730 об/мин, маховой момент двигателя $GD_d^2 = 3$ кгм², маховой момент муфты и механизма лебедки 0,8 кгм², к.п.д. лебедки $\eta = 0,8$.

Решение. Приведенный маховой момент поступательно перемещающегося груза

$$GD_n^2 = 4G \left(\frac{v}{\Omega} \right)^2 = 4G \left(\frac{v \cdot 30}{\pi \cdot n} \right)^2 = 365G \left(\frac{v}{n} \right)^2$$

($G = 1000 \text{ кг}$ — вес груза; $v = 25 \text{ м/мин} = \frac{25}{60} \text{ м/сек}$;
 $n = 730 \text{ об/мин}$);

$$GD^2 = 365 \cdot 1000 \frac{25^2}{730^2 \cdot 60^2} = 0,12 \text{ кгм}^2.$$

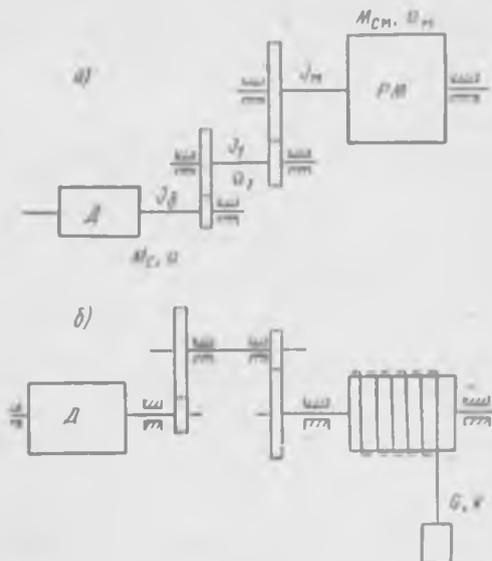


Рис. 13.2

Суммарный приведенный маховой момент

$$GD^2 = GD_{д}^2 + GD_{м}^2 + GD_{п}^2 = 3 + 0,8 + 0,12 = 3,92 \text{ кгм}^2.$$

Приведенный статический момент сопротивления на валу двигателя, согласно (13.7), равен

$$M_c = \frac{F_c v 30}{\pi n \eta} = \frac{1000 \cdot 25 \cdot 30}{3,14 \cdot 730 \cdot 0,8 \cdot 60} = 6,8 \text{ кгм}.$$

Вопросы для самопроверки

Что называется электроприводом и в чем особенности группового, одиночного и многодвигательного электропривода?

Как записывается уравнение движения электропривода?

Какие бывают режимы работы электропривода?

От чего зависит время переходного режима электропривода?

Для чего производится приведение моментов к одной оси?

На каком условии и как пересчитывается к валу двигателя момент сопротивления?

Какие условия и формулы приведения момента инерции и махового момента к валу двигателя?

§ 13.4. Общие положения по выбору мощности двигателя

Из рассмотрения электрических машин известно, что потери в двигателе состоят из постоянных и переменных. С ростом нагрузки двигателя возрастают суммарные потери мощности в нем. Тепловая энергия, выделяемая в двигателе вследствие потерь мощности, частью аккумулируется в самом двигателе, вызывая повышение его температуры, и частично рассеивается в окружающей среде. Последняя часть возрастает с ростом превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Поэтому при данной нагрузке через некоторое время после включения двигателя установится состояние теплового равновесия, когда количество тепла, выделяемое в единицу времени в двигателе, сравняется с количеством тепла, отдаваемого в единицу времени двигателем окружающей среде. При этом превышение температуры двигателя достигает определенного для данной нагрузки установившегося, т. е. неизменного, значения. Наиболее чувствительным элементом двигателя к температурным воздействиям является изоляция. В зависимости от класса изоляции устанавливаются предельно допустимые температуры нагрева двигателей. Нормы допустимого нагрева составлены с учетом температуры окружающей среды, равной 35°. Так, для изоляции класса А допустимое превышение температуры принято 60—65°, что соответствует температуре изоляции 95—100°.

Исходя из допустимого нагрева, устанавливается понятие номинальной мощности двигателя. Для большинства двигателей в паспортном щитке приводится номинальная мощность, соответствующая режиму длительной постоянной нагрузки. Это такая наибольшая механическая мощность на валу, которую двигатель может развивать длительно, не перегреваясь выше допустимой температуры.

Как видим, длительная номинальная мощность и соответственно нагрузка двигателя определяются допустимым нагревом. Однако не всегда двигатели эксплуатируются в режиме длительной постоянной нагрузки. Нагрузочный режим двигателя обуславливается характером рабочего механизма. Поскольку режимы работы производственных механизмов бывают весьма разнообразны, то это в свою очередь сказывается на протекании тепловых процессов в электрических двигателях.

В соответствии с нормами при выборе мощности двигателей все многообразие возможных режимов их работы сводится к трем основным режимам, а именно:

- а) длительный режим;
- б) кратковременный режим;

в) повторно-кратковременный режим.

В любом режиме двигатель не должен перегреваться свыше допустимой температуры. Перегревы, даже кратковременные, резко сокращают срок его службы. Так, например, срок службы двигателя с изоляцией класса А при нагрузке, соответствующей 200°C , сокращается примерно до трех часов.

С другой стороны, нет большого смысла и в «вечном» по сроку службы двигателе. Это потребовало бы завышения его мощности и удорожания установки. Поэтому важно, чтобы при работе нагрев двигателя был на уровне допустимого. Лишь при этом условии использование двигателя будет наиболее полным, соответствующим рациональному технико-экономическому решению.

Выбранный по допустимому нагреву двигатель в ряде случаев должен быть проверен по перегрузочной способности и пусковому моменту. При частых пусах двигатель проверяется также по допустимому числу включений в час.

§ 13.5. Выбор мощности двигателя при длительном режиме нагрузки

Длительным режимом работы двигателя называется такой режим, при котором продолжительность его работы без отключения может быть сколь угодно большой, но не менее времени, необходимого для достижения двигателем установившейся температуры.

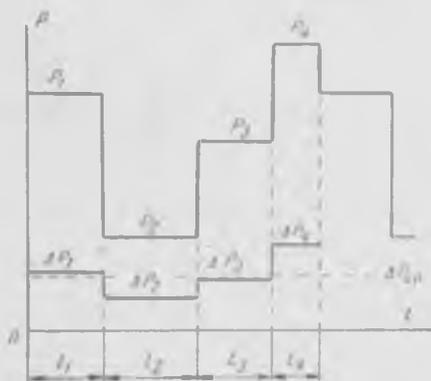


Рис. 13.3

При этом нагрузка на двигатель может быть постоянной во времени или переменной (рис. 13.3).

В первом случае выбор мощности двигателя прост. Если P_1 — полезная мощность нагрузки рабочего механизма, то требуемая мощность двигателя

$$P_d = \frac{P_1}{\eta},$$

где η — к. п. д. рабочего механизма и промежуточных передач.

Затем по каталогу выбирается электрический двигатель, номинальная длительная мощность которого равна или несколько больше (ближайшая большая) требуемой мощности двигателя, т. е.

$$P_n \geq P_d. \quad (13.13)$$

В качестве примера двигателей с длительной неизменной нагрузкой можно назвать электроприводы вентиляторов, насосов, транспортеров и др. Проверка двигателей по перегрузочной способности в данном случае не требуется. Если нагрузка двигателя в длительном режиме работы изменяется по известному графику (рис. 13.3), то мощность его выбирается или по методу средних потерь или методом эквивалентных величин.

Метод средних потерь. Этот метод основан на равенстве номинальных потерь мощности в двигателе, соответствующих его номинальной нагрузке, и средних потерь, соответствующих действительному графику нагрузки. При таком условии наибольшее превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды (в обоих случаях) будет одинаковым. Но при работе с номинальной нагрузкой наибольшее превышение температуры остается неизменным, а при работе по действительному графику такого же наибольшего превышения температуры двигатель будет достигать в определенные моменты времени каждого цикла. В пределах цикла температура двигателя будет несколько изменяться.

Задача выбора мощности двигателя решается в этом случае методом последовательных приближений. Выбирают двигатель по средней мощности действительного графика с учетом небольшого коэффициента запаса

$$P_d = k_{\text{зап}} P_{\text{ср}},$$

где P_d — требуемая мощность двигателя;

$P_{\text{ср}}$ — средняя мощность нагрузки;

$k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса ($k_{\text{зап}} = 1,1 \div 1,3$).

По величине P_d из каталога подбирается номинальная мощность двигателя $P_n \geq P_d$ и устанавливается его номинальная мощность потерь

$$\Delta P_n = \frac{P_n}{\eta} - P_n.$$

Затем рассчитывается средняя мощность потерь, соответствующих действительному графику нагрузки. Для этого определяется мощность потерь для каждого участка цикла по формулам:

$$\Delta P_1 = \frac{P_1}{\eta_1} - P_1, \quad \Delta P_2 = \frac{P_2}{\eta_2} - P_2 \text{ и т. д.,}$$

где P_1 и P_2 — мощности нагрузок двигателя (см. рис. 13.3);

η_1, η_2 — к. п. д. двигателя при данных нагрузках.

Значения η_1, η_2 можно установить на основании данных заводов-изготовителей о к. п. д. при частичных нагрузках 25, 50, 75, 100% от номинальной, построив по ним кривую $\eta = F(P)$.

Средняя мощность потерь за цикл

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 + \Delta P_4 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}. \quad (13.14)$$

Величины, входящие в эту формулу, показаны на рис. 13.3. Если

$$\Delta P_{\text{н}} \geq \Delta P_{\text{ср}}, \quad (13.15)$$

то останавливаются на принятом двигателе. В случае несоблюдения условия (13.15) расчет повторяется для двигателя другой, большей или меньшей, мощности в зависимости от того, как расходятся значения $\Delta P_{\text{н}}$ и $\Delta P_{\text{ср}}$.

Этот метод применим для всех электрических двигателей, хотя и является трудоемким.

Метод эквивалентных величин (тока, мощности, момента). Этот метод основан на замене действительного тока, потребляемого двигателем при изменяющейся нагрузке, эквивалентным током, которому соответствуют потери мощности в двигателе, равные по величине средним потерям от действительного тока. При этом исходят из допущений: а) потери в стали и механические постоянны в течение всего рабочего цикла и не зависят от нагрузки; б) активное сопротивление обмоток в любом режиме практически остается неизменным.

С учетом сказанного можно записать равенство для переменных составляющих потерь энергии от эквивалентного и действительных токов

$$I_s^2 (t_1 + t_2 + t_3 + \dots) = I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots$$

Отсюда

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}, \quad (13.16)$$

где I_s — эквивалентный ток;

I_1, I_2, I_3, \dots — действительные токи, потребляемые двигателем при заданном графике его нагрузки.

Таким образом, эквивалентный ток равен среднеквадратичному значению действительных токов двигателя. Выбранный двигатель считается удовлетворяющим данному электроприводу по условию нагрева, если

$$I_s \leq I_{\text{н}}$$

где $I_{\text{н}}$ — номинальный ток выбранного двигателя.

Мощность двигателя предварительно выбирается так же, как и по методу средних потерь.

Каких-либо существенных сокращений расчетов этот метод не дает. Для последовательных двигателей постоянного тока, у которых потери в стали и механические нельзя считать по-

стоянными, а также асинхронных короткозамкнутых двигателей с глубоким пазом и двойной клеткой, у которых значительно изменяется активное сопротивление ротора, метод эквивалентного тока носит приближенный характер.

Так как момент электрических двигателей пропорционален магнитному потоку и току, то при постоянном магнитном потоке вращающий момент

$$M \cong I.$$

Это справедливо для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением, синхронных двигателей и приближенно для асинхронных.

Поэтому для таких двигателей вместо токов в формуле (13.12) можно ввести моменты

$$M_a = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}. \quad (13.17)$$

Располагая графиком момента на валу двигателя, по этому выражению рассчитывается эквивалентный момент и по нему подбирается двигатель из условия

$$M_a \leq M_n,$$

где $M_n = \frac{P_n}{\Omega}$ — номинальный момент выбираемого двигателя.

По методу эквивалентного момента не требуется предварительно выбирать двигатель, что является его достоинством.

Для двигателей, имеющих жесткую механическую характеристику, между моментом и мощностью на валу существует приблизительно линейная зависимость, т. е.

$$P \cong M, \text{ так как } P = M\Omega, \text{ а } \Omega = \frac{\pi n}{30} \approx \text{const.}$$

Поэтому выражение эквивалентного момента (13.17) может быть переписано для эквивалентной мощности

$$P_a = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}. \quad (13.18)$$

Мощность двигателя подбирается по условию

$$P_a \leq P_n.$$

Этот метод имеет те же ограничения, что и метод эквивалентного момента. При расчете мощности двигателя для длительной изменяющейся нагрузки по любому методу выбранный двигатель должен быть проверен по перегрузочной способности и при пусках с нагрузкой по пусковому моменту. Перегрузочная способность асинхронных и синхронных двигателей характеризуется коэффициентом перегрузочной способ-

ности k_m , который должен быть больше с некоторым запасом (на 20-25%) отношения максимального в течение цикла момента нагрузки к номинальному моменту двигателя. Для двигателей постоянного тока перегрузочная способность ограничивается наибольшим допустимым током по условию безыскровой коммутации. Обычно кратковременно допускается не более чем двухкратная перегрузка по току.

§ 13.6. Выбор мощности двигателя для повторно-кратковременного и кратковременного режимов

Повторно-кратковременным режимом называется такой режим, когда рабочие периоды чередуются с периодами отключения, причем за период работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время отключения не успевает остыть до температуры окружающей среды. В таком режиме работают, например, двигатели подъемных механизмов, некоторых металлорежущих станков, металлургических прокатных станов и др.

Повторно-кратковременный режим характеризуется относительностью продолжительности включения, которая определяется отношением времени работы двигателя к полному времени цикла.

На рис. 13.4 показан один из возможных графиков нагрузки двигателя

в данном режиме. Применительно к нему относительная продолжительность включения равна

$$ПВ = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} 100 = \frac{t_p}{t_u} 100\%. \quad (13.19)$$

Для повторно-кратковременного режима изготавливаются электрические двигатели специальных серий, например крановые, на паспорте которых указывают допустимые мощности нагрузки (номинальные мощности) для различных значений $ПВ$. Стандартными значениями $ПВ$ приняты 15, 25, 40 и 60. Чем меньше $ПВ$, тем большую мощность может развивать двигатель, не перегреваясь. К концу рабочего периода любого цикла температура двигателя не превысит допусти-

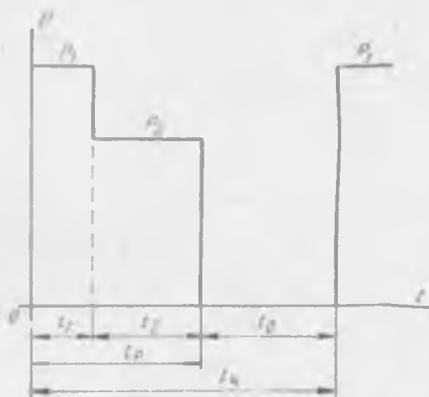


Рис. 13.4

мой, если его нагрузка равна или меньше паспортной для данного $PВ$. Двигатель подбирается исходя из эквивалентной мощности.

По формуле (13.18) рассчитывается эквивалентная мощность $P_э$ за период работы t_p для заданного графика нагрузки (см. рис. 13.4). Затем определяется действительное значение $PВ$ (13.19). Если оно окажется стандартным, то по величине $P_э$ подбирается из каталога двигатель, номинальная мощность которого для данного $PВ$ равна или больше $P_э$, т. е.

$$P_n \geq P_э.$$

Если действительное значение $PВ$ отличается от стандартного, то необходимо пересчитать полученное значение мощности $P_э$ на ближайшее стандартное $PВ$. Такой пересчет, если $PВ$ близки, можно приближенно сделать по формуле

$$P'_э = P_э \sqrt{\frac{PВ_1}{PВ_2}}, \quad (13.20)$$

где $P'_э$ — пересчитанная на стандартное значение $PВ$ эквивалентная мощность нагрузки;

$PВ_1$ — фактическое значение $PВ$ по заданному графику;

$PВ_2$ — ближайшее к $PВ_1$ стандартное значение $PВ$.

По величине $P'_э$ выбирается двигатель. Если $PВ > 60\%$, то двигатель выбирается, так же как и для длительного режима. Общая продолжительность цикла при повторно-кратковременном режиме не должна превышать 10 мин. Выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности и пусковым условиям, в том числе на допустимую частоту включений, так как при пуске он потребляет повышенный ток и хуже охлаждается. Для асинхронных короткозамкнутых двигателей допустимое число включений в час можно с некоторым приближением подсчитать по формуле

$$h = \frac{36(100 - PВ_{\text{факт}})}{t_n \left(\frac{I_n}{I_n}\right)^2}, \quad (13.21)$$

где $PВ_{\text{факт}}$ — фактическая продолжительность включения, %;

t_n — время пускового процесса;

$\frac{I_n}{I_n}$ — кратность пускового тока.

Кратковременным режимом называется такой режим, при котором за рабочий период двигатель не достигает установившейся температуры нагрева, а время остановки достаточно для полного остывания двигателя до температуры окружающей среды. Кратковременный режим характерен для шлюзовых механизмов гидросооружений, приводов монтажных кранов, вспомогательных приводов металлорежущих станков и др.

Изготавливается специальная серия электродвигателей для такого режима. В их паспортном щитке указывается кратковременная мощность для определенной продолжительности работы (6, 10, 15, 30, 60 мин). Такие двигатели отличаются повышенными перегрузочными и пусковыми свойствами. Соответственно мощности нагрузки P_k и продолжительности работы t_k (рис. 13.5) по каталогу двигателей кратковременных режимов подбирается двигатель.

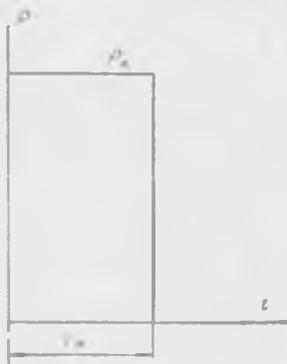


Рис. 13.5

При использовании для кратковременной работы двигателей, предназначенных для длительного режима, мощность выбирается по коэффициенту тепловой перегрузки, который рассчитывается с помощью уравнения нагревания двигателей.

Часто в этом случае условием, определяющим требуемую мощность двигателя, являются перегрузочная способность и пусковой момент.

Задачи. 13.3. На рис. 13.6 изображен график момента нагрузки механизма, работающего в длительном режиме. Выбрать для данного привода

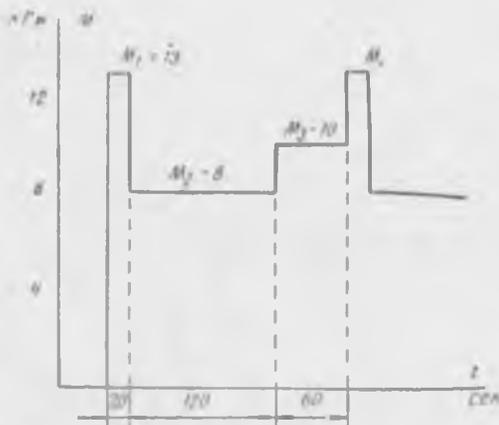


Рис. 13.6

асинхронный короткозамкнутый двигатель серии АО. Скорость вращения $n=970$ об/мин.

Решение. Определяем эквивалентный момент нагрузки

$$M_0 = \sqrt{\frac{M^2 t_1 + M^2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}} = \sqrt{\frac{13^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 120 + 10^2 \cdot 60}{20 + 120 + 60}} = 9,4 \text{ кгм.}$$

Эквивалентная мощность двигателя

$$P_0 = M_0 \cdot \Omega = M_0 \cdot \frac{\pi n}{30} = 9,4 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 970}{30} = 93000 \text{ вт} = 9,3 \text{ квт.}$$

Изменениями скорости двигателя при изменениях нагрузки пренебрегаем.

По каталогу принимаем двигатель АО63-6, $P_n = 10 \text{ квт}$;

$$n = 980 \text{ об/мин}, \quad \gamma_1 = 87\%, \quad \frac{M_k}{M_n} = 2,2, \quad \frac{M_p}{M_n} = 1,4.$$

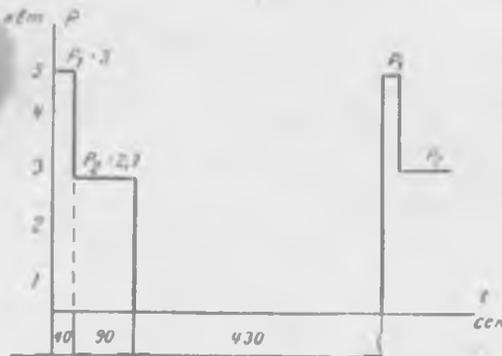


Рис. 13.7

Сделаем проверку по перегрузочной способности и пусковому моменту:

$$M_n = 975 \frac{P_n}{n} = 975 \frac{10}{980} \approx 10 \text{ кгм};$$

$$M_k = 10 \cdot 2,2 = 22 \text{ кгм};$$

$$M_p = 10 \cdot 1,4 = 14 \text{ кгм}.$$

По перегрузочным и пусковым свойствам двигатель подходит.

13.4. Пользуясь каталогом, выбрать асинхронный короткозамкнутый двигатель для подъемного механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме, с графиком нагрузки, приведенном на рис. 13.7. Скорость вращения 900 об/мин.

Решение. Определяем эквивалентную мощность за рабочий период

$$P_0 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{5^2 \cdot 40 + 2,7^2 \cdot 90}{40 + 90}} = 3,6 \text{ квт.}$$

Фактическая продолжительность включения

$$ПВ_1 = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} \cdot 100 = \frac{40 + 90}{40 + 90 + 430} \cdot 100 = 23\%.$$

Пересчитаем эквивалентную мощность на стандартное значение $ПВ_2 = 25\%$

$$P'_0 = P_0 \sqrt{\frac{ПВ_1}{ПВ_2}} = 3,6 \sqrt{\frac{23}{25}} = 3,46 \text{ квт.}$$

По величине $P_n = 3,46 \text{ кВт}$ из каталога выбираем асинхронный короткозамкнутый двигатель крановой серии типа МТК12-6, для которого при $P_B = 25\%$ $P_n = 3,5 \text{ кВт}$, $n = 883 \text{ об/мин}$:

$$\frac{M_{\Sigma}}{M_n} = 2,6; \quad \frac{M_{\Pi}}{M_n} = 2,6$$

Данный двигатель подходит также по перегрузочным и пусковым свойствам.

Вопросы для самопроверки

- От чего зависит нагрев электрического двигателя?
- Возможные режимы работы электродвигателей и по каким условиям выбирается их мощность?
- Как выбирается мощность двигателя для режима длительной постоянной нагрузки?
- Как выбирается двигатель по методу средних потерь?
- В чем сущность метода эквивалентного тока и область его применения?
- В чем сущность и область применения метода эквивалентного момента?
- Как выбирается двигатель по методу эквивалентной мощности?
- Какой режим называется повторно-кратковременным и как выбирается мощность двигателя для данного режима?
- Какой режим называется кратковременным?

§ 13.7. Аппаратура управления и защиты

В схемах управления электроприводами применяются различные аппараты, с помощью которых осуществляется пуск и остановка, реверсирование, торможение, регулирование скорости вращения двигателя, защита их от ненормальных режимов, сигнализация состояния и т. п. По тем функциям, которые аппарат выполняет в схеме управления, различают аппараты управления главными (силовыми) цепями (выключатели, контакторы, реостаты и др.), командные аппараты (кнопки и ключи управления), аппараты защиты электродвигателей и схем управления (предохранители, реле), аппараты технологического контроля и др.

В зависимости от условий окружающей среды аппараты выпускаются в открытом, защищенном и специальном исполнении. По напряжению различают аппараты высоковольтные (для переключений в цепях свыше 1000 в) и низковольтные (до 1000 в). В большинстве аппаратов для приведения их в действие требуется механическая сила, которая может быть получена или с помощью ручного воздействия, или с помощью автоматических устройств, реагирующих на изменение режима цепи, положения отдельных частей механизма и т. п. В последнем случае для получения механической силы широко используются электромагниты.

Ниже рассмотрим некоторые из наиболее употребительных аппаратов управления и защиты.

А. Аппараты ручного управления

К аппаратам ручного управления относятся рубильники, контроллеры, пакетные выключатели и др. Первые являются простейшими аппаратами для включения и отключения цепей. Они применяются в цепях постоянного и переменного тока

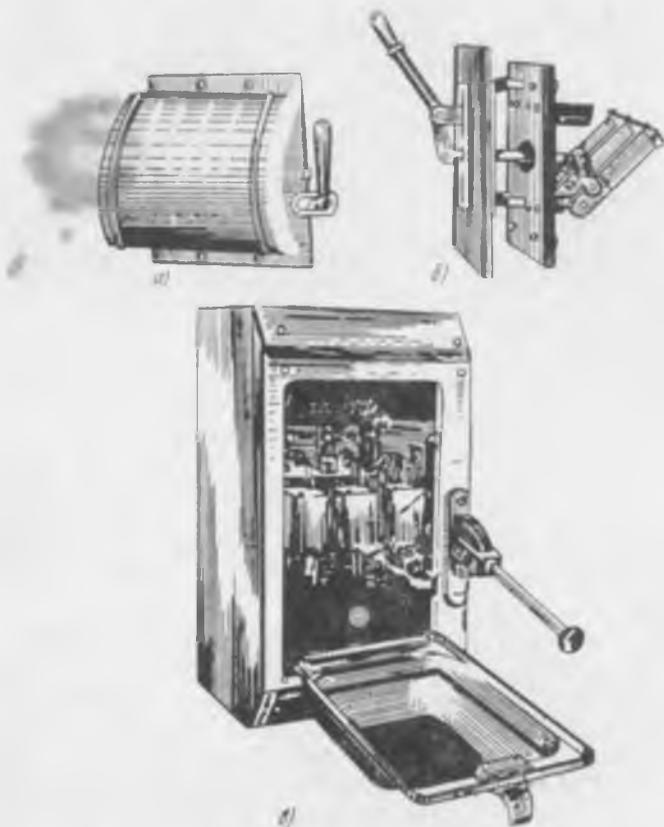
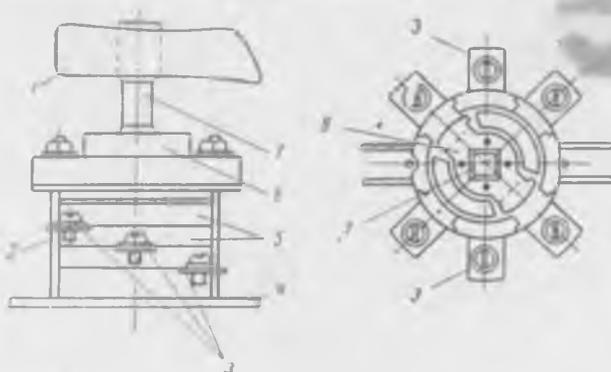


Рис. 13.8

напряжением до 500 в. На рис. 13.8 а, б, в показаны три разновидности трехполюсных рубильников для трехфазных сетей, причем на рис. 13.8, в дан совмещенный рубильник-предохранитель. У него контактные ножи заменены предохранителями. Переключатели выполняются подобно рубильникам, но имеют два комплекта неподвижных контактов. Рубильники, изготовляемые на большие токи, снабжаются специальными дугогасящими приспособлениями.

Пакетный выключатель (рис. 13.9) представляет собой малогабаритный отключающий аппарат для цепей переменного тока до 380 в и постоянного тока 220 в. Он используется для пуска небольших двигателей в силовых цепях, а также находит применение во вспомогательных цепях управления и сигнализации. Этот аппарат состоит из неподвижных колец из изоляции 5, в которые вмонтированы контакты 3, и подвижных дисков с контактными пластинами 8, закрепленных на оси 7. В крышке 6 размещено пружинное приспособление, с помощью которого достигается быстрое замыка-



Р и с. 13.9

ние и размыкание контактов независимо от скорости поворота ручки 1. Выключатель собирается и крепится к крышке с помощью скобы 4 и шпилек 2.

Для осуществления переключений в силовых цепях электроприводов, содержащих большое число переключаемых цепей, и при большой частоте переключений применяются контроллеры. (Последние широко используются для управления крановыми двигателями.) По конструкции переключающего устройства различают барабанный и кулачковый контроллеры. Первый изображен на рис. 13.10, а.

Его подвижные контакты в виде сегментов 2 крепятся на валу 1. Неподвижные контакты 3 размещаются на вертикальной рейке 4 и к ним присоединяются внешние цепи. Контактные сегменты соединяются между собой по определенной схеме и, кроме того, они имеют разную длину дуги. При повороте вала контроллера за счет контактных сегментов достигаются те или иные соединения между неподвижными контактами, а следовательно, и во внешних цепях. Вал контроллера снабжается фиксатором 5, обеспечивающим несколько фиксированных положений при поворотах в обе стороны.

На рис. 13.10, б показана схема кулачкового контроллера. На его валу крепятся диски фасонного профиля 7, которые воздействуют своей боковой поверхностью на ролик контактного рычага 6, определяя тем самым замкнутое или разомкнутое положение контактов 2 и 3. Недостатком барабанного контроллера является трение и связанный с этим износ кон-

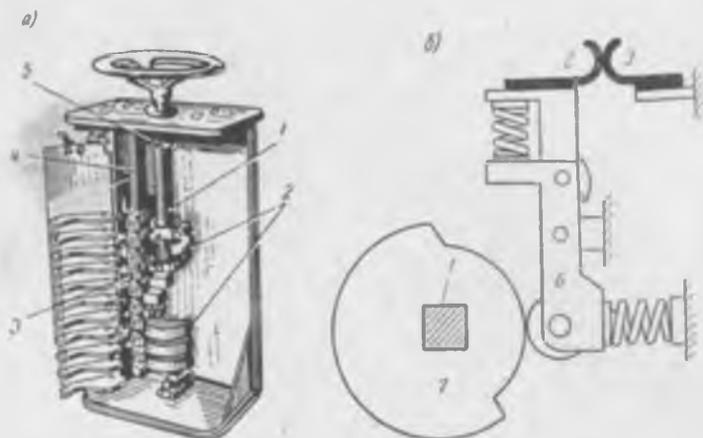


Рис. 13.10

тактных поверхностей при работе. Этого нет у кулачковых контроллеров. Поэтому в последнее время кулачковые контроллеры вытесняют контроллеры барабанного типа.

Б. Аппараты для дистанционного и автоматического управления

В эту группу входят командные аппараты, контакторы, пускатели, автоматы, реле защиты, управления и др.

С помощью командных аппаратов осуществляются переключения в цепях управления (цепи вспомогательного тока). Простейшими из них являются кнопки управления.

Кнопки бывают одноцепные и двухцепные с нормально открытыми и нормально закрытыми контактами. Под нормальным положением контактов условилось понимать их положение при отсутствии механического нажатия на кнопку. В большинстве случаев кнопки делаются с самовозвратом, т. е. при снятии механического давления ее контакты возвращаются к исходному состоянию самостоятельно. На рис. 13.11, а изображена двухцепная кнопка управления с одной парой нормально открытых 2 и парой закрытых 1 контактов (3 — контактный мостик).

Комплект из двух или нескольких кнопок управления, смонтированных на пульте управления, называют кнопочной станцией (рис. 13.11, б.).

При необходимости переключать одновременно или по определенной программе большое число цепей управления применяют командоконтроллеры, универсальные переключатели, ключи управления. К командоаппаратам относятся также путевые выключатели, особенностью которых является то, что они приводятся в действие не оператором, а автоматически в зависимости от положения или пройденного пути той или

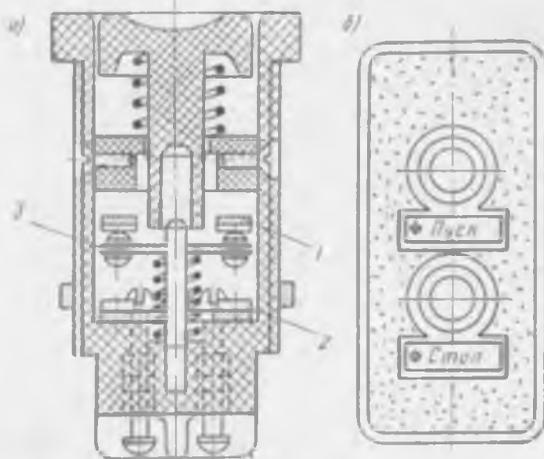


Рис. 13.11

иной частью управляемого механизма. Путевые выключатели бывают кнопочного, рычажного и поворотного (шпindelного) типов с самовозвратом и без самовозврата.

На рис. 13.12 изображен путевой выключатель рычажного типа. Контактная система командоаппаратов выполняется на небольшие токи цепей управления.

Контакты служат для замыканий и размыканий силовых электрических цепей и широко используются в схемах управления электроприводами. Управление контактором осуществляется автоматически или с помощью ручных командных устройств дистанционно.

Контакты изготавливаются для постоянного и переменного токов. Основными частями их является контактная система, состоящая из подвижных и неподвижных контактов, и магнитная система, состоящая из электромагнита с подвижным якорем, с которым механически связаны подвижные контакты. Главные контакты контактора, через которые прохо-

дят силовые цепи, обычно размещаются в специальных камерах, обеспечивающих быстрое гашение электрической дуги, возникающей при работе контактов. Помимо главных, контакторы часто имеют еще вспомогательные контакты, которые используются в цепях управления. Эти контакты называются блок-контактами. Как главные, так и блок-контакты могут быть нормально открытыми или нормально закрытыми. Под нормальным положением контактов понимают положение, которое они занимают при отсутствии тока в катушке

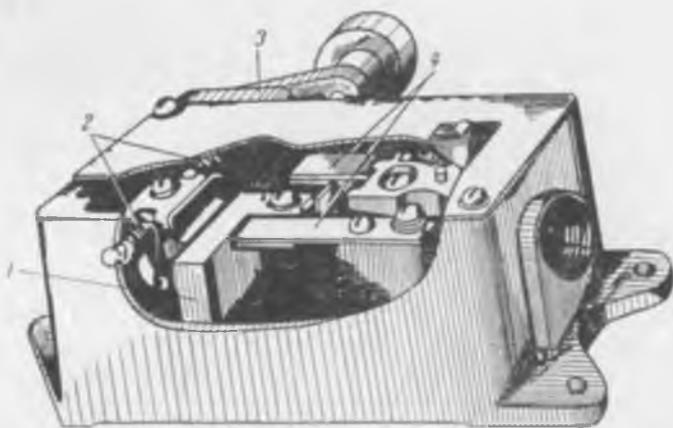


Рис. 13.12. Путьевой выключатель рычажного типа:
1 — контактный мостик; 2 — пружина возврата; 3 — рычаг; 4 — контакты

электромагнита. Катушка электромагнита включается в цепь управления, она рассчитывается на небольшой ток и потребление ею электроэнергии незначительно.

Конструктивная схема контактора переменного тока показана на рис. 13.13, а, контактора постоянного тока — на рис. 13.13, б. Они отличаются устройством магнитной системы и дугогасительных камер. Контактторы допускают до 1500 включений в час.

Магнитный пускатель состоит из контактора, теплового реле и кнопок управления. Наличие теплового реле обеспечивает защиту силовой цепи от перегрузок. Магнитные пускатели с двумя контакторами позволяют осуществлять реверсирование двигателей. Они называются реверсивными.

Магнитные пускатели широко применяются главным образом для включения, отключения и защиты асинхронных короткозамкнутых двигателей при напряжении до 500 в.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы) предназначены для включения и отключения силовых цепей постоянного и переменного токов при напряжении до 500 в и небольшой частоте включений. Они занимают промежуточное положение между аппаратурой ручного и автоматического действия. Включение их — ручное (крупные автоматы снабжаются механическим приводом с дистанционным управлением), отключение — ручное и автоматическое. Последнее может достигаться при перегрузках, коротких замыканиях,

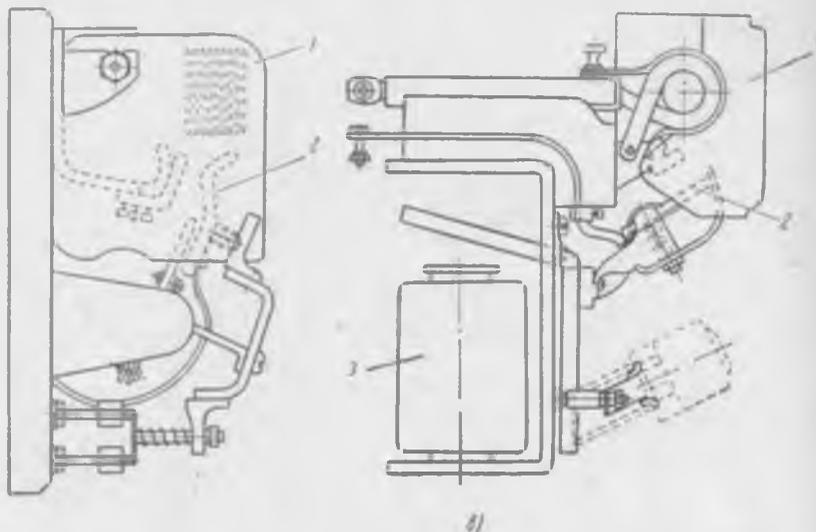


Рис. 13.13. Конструктивная схема контактора:
1 — дугогасительная камера; 2 — подвижные контакты; 3 — электромагнит

резком снижении или исчезновении напряжения, изменении направления потока мощности и т. д.

В этих целях применяются устройства, действующие на механизм свободного расцепления автомата при наступлении указанных режимов. Их называют расцепителями. Для приведения расцепителя в действие используется магнитное или тепловое действие тока.

На рис. 13.14 изображен трехполюсный автомат АП-25, применяемый для управления небольшими двигателями. В нем применены тепловой расцепитель в виде биметаллической пластинки 9 и электромагнитный расцепитель в виде небольшой катушки с подвижным сердечником 7. Биметаллическая пластинка и катушка включены последовательно с главными контактами. Автомат отключается при перегрузках от действия теплового, а при коротких замыканиях — электро-

магнитного расцепителя. Оба они действуют на рычаг механизма свободного расцепления 8.

Защита электроустановок на предохранителях часто не удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для этой цели при нарушениях нормального режима работы цепей установок широко используются реле защиты. Последнее вызывает автоматическое замыкание или размыкание вспомогательных цепей при изменении какого-либо параметра главной силовой цепи.

Это приводит или к отключению, или к вводу в действие сигнализации о недопустимых режимах. Применяются также

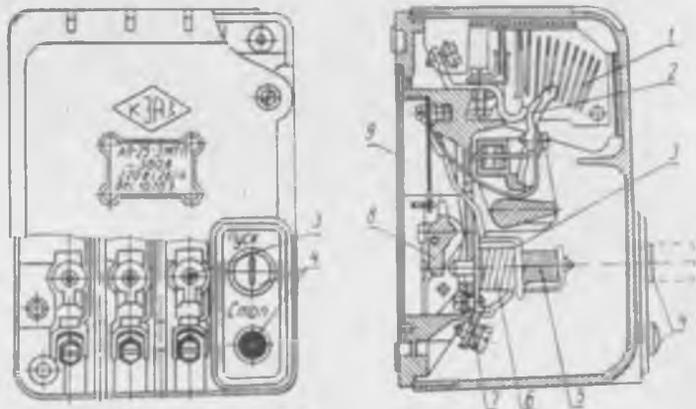


Рис 13.14. Конструктивная схема трехполюсного автомата АП-25:

1 — дугогасительная камера; 2 — контакты; 3 — электромагнитный расцепитель; 4 — кнопки ручного управления; 5 — пружина; 6 — катушка; 7 — сердечник; 8 — рычаг; 9 — тепловой расцепитель

реле управления, с помощью которых осуществляется автоматическое управление работой электропривода.

В электрических схемах электропривода наиболее широко применяются тепловые реле защиты, электромагнитные реле защиты и управления (токовые, напряжения, частоты), промежуточные реле, реле времени и др.

Тепловое реле служит для защиты двигателя от перегрузок током. Его конструктивная схема представлена на рис. 13.15.

Реле состоит из нагревательного элемента 1, который выбирается по номинальному току двигателя, биметаллической пластинки 2 и контактов 3, через которые проходит цепь управления контактором. При превышении током двигателя номинального значения биметаллическая пластинка нагревается и изгибается кверху, освобождая защелку 5 рычага 4. При

этом происходит разрыв контактов 3 и тем самым разрывается цепь управления контактором. Двигатель отключается. Тепловые реле защищают двигатель от перегрузок, но вследствие тепловой инерции плохо защищают от коротких замыканий.

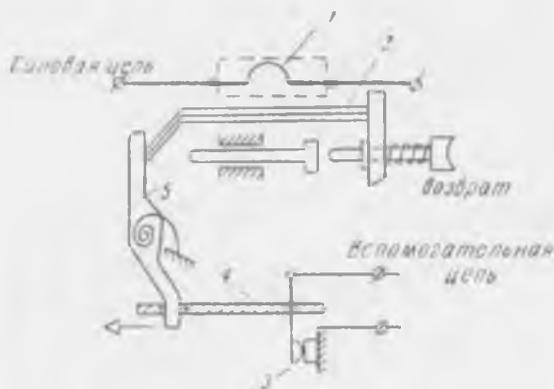


Рис. 13.15

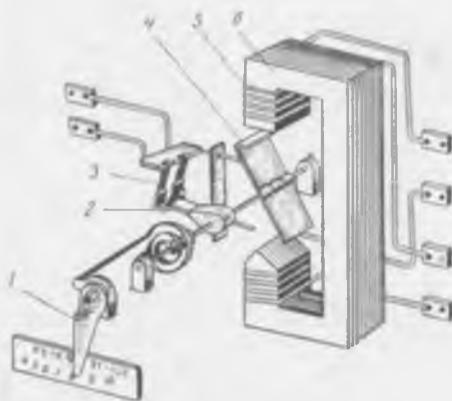


Рис. 13.16. Токовое реле типа ЭТ-520:

1 — рычаг регулирования уставки (тока срабатывания); 2 — контактный мостик; 3 — контакты; 4 — якорь; 5 — катушка; 6 — сердечник

Электромагнитное реле максимального тока применяется для защиты силовых цепей от перегрузок и коротких замыканий. Оно состоит из электромагнита с подвижным якорем и контактной системы, которая может иметь как нормально открытые, так и нормально закрытые контакты. Регулирова-

ние величины тока срабатывания (уставки реле) достигается изменением схемы включения катушки электромагнита, если она выполнена из нескольких частей, и изменением силы, требуемой для перемещения якоря.

На рис. 13.16 показано токовое реле типа ЭТ-520. Его токовая катушка выполнена из двух частей. При переходе с последовательной схемы их соединения на параллельную ток срабатывания возрастает. При больших токах в силовой защищаемой цепи это реле включается через трансформатор тока.

Изготавливаются также токовые реле для непосредственного включения на большие токи. Подобным образом выполняются и электромагнитные реле напряжения. Катушка реле напряжения включается параллельно сети непосредственно или через трансформатор напряжения.

Промежуточные реле (рис. 13.17) используются в качестве реле управления и предназначены для усиления командного импульса или распределения его по нескольким цепям. Как правило, они имеют несколько пар контактов. К реле управления относятся также реле времени. Они применяются для обеспечения определенной последовательности и продолжительности включения и отключения отдельных аппаратов в схеме.

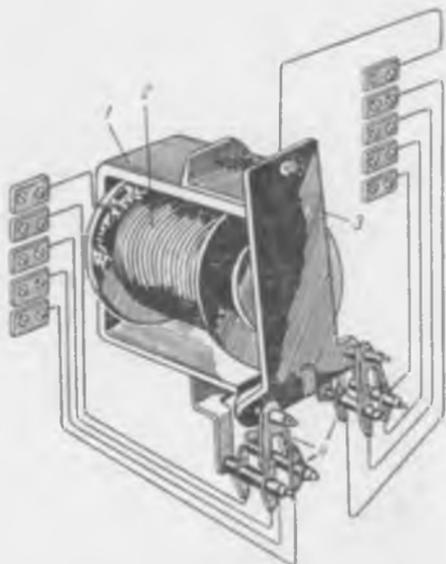


Рис. 13.17. Промежуточное реле:
1 — сердечник; 2 — катушка; 3 — якорь; 4 — контакты

Вопросы для самопроверки

Как классифицируются электрические аппараты?

Какие аппараты ручного управления применяются для управления силовыми цепями схемы электропривода?

Назначение командных аппаратов. Назовите некоторые из них.

Область применения контакторов. Как устроен контактор?

Как выполняются магнитные пускатели?

Для каких целей используются автоматы и как они выполняются?

Принцип устройства теплового реле и область его применения.

Назначение и принцип устройства электромагнитного реле.

§ 13.8. Изображение схем управления электроприводами

Различают элементные (развернутые), монтажные и принципиальные электрические схемы управления электроприводами.

На элементных схемах изображаются как силовые (цепи главного тока), так и вспомогательные цепи управления. Первые принято изображать утолщенными линиями, вторые, по которым соединяются катушки управления контакторами,

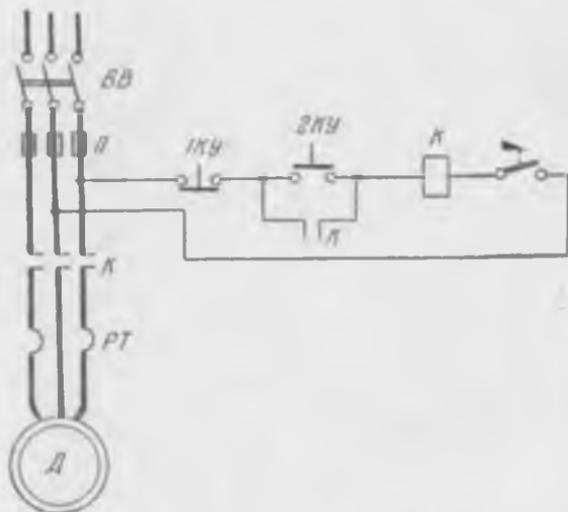


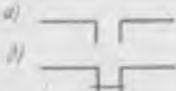
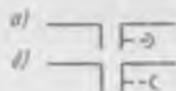
Рис. 13.18

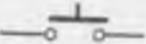
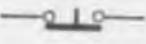
блок-контакты, катушки и контакты реле, контакты командных аппаратов,— вычерчиваются тонкими линиями. Отдельные элементы аппаратуры изображаются с помощью принятых условных обозначений вне связи с их действительным территориальным расположением.

На монтажных схемах аппараты показываются соответственно их действительному расположению (на панелях, в шкафу, пультах и т. д.). Показывается также разводка электрических цепей между ними с указанием количества, марки и сечения проводов, прокладываемых в трубах или гибких шлангах. На принципиальных схемах изображаются лишь силовые цепи электрических двигателей и элементы входящей в них аппаратуры.

В таблице ниже даны основные условные обозначения отдельных элементов аппаратуры управления.

Таблица условных обозначений

Обозначение	Наименование
	Выключатель. Общее обозначение
	Выключатель многополюсный (трехполюсный)
	Выключатель автоматический (воздушный)
	Катушка контактора, реле
	Контакты контактора, контроллера, пускателя: а) замыкающий; б) размыкающий
	Контакты с выдержкой времени: а) при замыкании; б) при размыкании
	Контакт электрического реле: а) замыкающий; б) размыкающий
	Контакт реле с выдержкой времени: а) при замыкании; б) при размыкании

Обозначение	Наименование
	Нагревательный элемент
	Линия механической связи частей машин, аппаратов или приборов
	Контакт температурного реле
	Кнопка с самовозвратом и замыкающим контактом
	Кнопка с самовозвратом и размыкающим контактом
а) 	Контакт путевого конечного выключателя: а) замыкающий; б) размыкающий; в) переключающий
б) 	
в) 	
	Контроллер на два рабочих положения в каждую сторону на три направления. Два контакта замыкающие, один (среднее направление) — размыкающий
	Предохранитель плавкий
	Лампа сигнальная
	Заземление (соединение провода с землей)

Простая схема управления короткозамкнутым двигателем с помощью магнитного пускателя приведена на рис. 13.18. Работает она следующим образом.

Включением вводного выключателя ВВ подается напряжение на силовую и вспомогательные цепи управления. Кнопкой 2КУ (пуск) замыкается цепь питания катушки контактора К. При этом контактор замыкает свои рабочие контакты К в силовой цепи питания двигателя и одновременно блок-контакт К, шунтирующий кнопку 2КУ. Дальнейшее

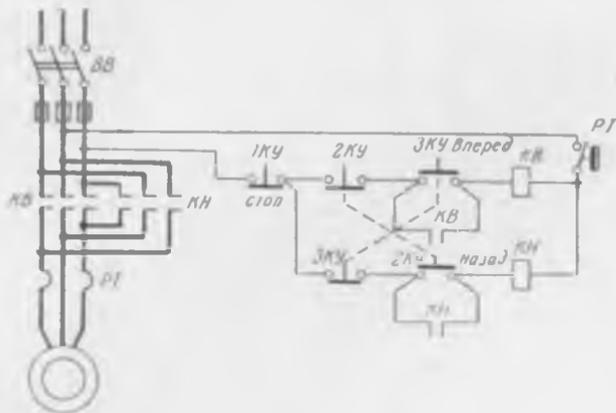


Рис. 13.19

удержание кнопки 2КУ после этого не требуется. Для остановки двигателя нажимаем кнопку 1КУ (стоп), которая размыкает цепь катушки контактора К, и контактор отключается. Схема приходит в исходное состояние.

При перегрузках двигатель автоматически отключается за счет теплового реле РТ, которое, нагреваясь, размыкает свой нормально закрытый контакт РТ в цепи питания катушки контактора. Схема обеспечивает также отключения двигателя при исчезновении или значительном снижении напряжения питающей сети (нулевая защита). Это необходимо для того, чтобы предотвратить самозапуск двигателя после восстановления напряжения. Для защиты схемы от коротких замыканий в питающей сети устанавливаются предохранители.

На рис. 13.19 изображена схема управления короткозамкнутым двигателем с помощью реверсивного пускателя. Такой пускатель имеет два контактора: KB (вперед) и KH (назад). Кнопки управления пуском 2КУ и 3КУ двухцепные, благодаря чему исключается одновременное включение контакторов. Кнопка 1КУ и контакты теплового реле РТ действуют на лю-

бой включенный контактор. В остальном схема работает так же, как и предыдущая.

Для автоматического ограничения пути перемещения рабочего механизма путем отключения асинхронного двигателя схема управления контакторами КВ (вперед) и КН (назад) замыкается через нормально закрытые контакты путевых вы-

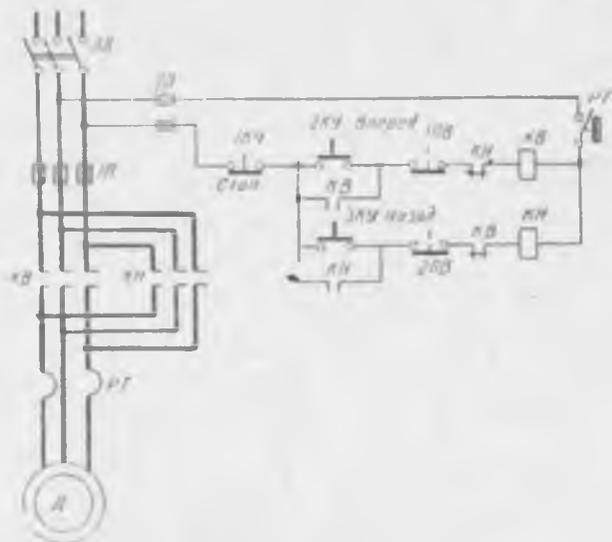


Рис. 13.20

ключателей 1ПВ и 2ПВ, которые открываются при достижении механизмом (или его частью) границы пути.

Такая схема представлена на рис. 13.20. В ней для блокировки от одновременного включения контакторов использованы нормально закрытые блок-контакты контакторов КВ и КН. Благодаря этому при включенном контакторе КВ контактор КН включить нельзя, поскольку цепь его катушки разомкнута открывшимся нормально закрытым блок-контактом КВ и, наоборот, при включенном КН нельзя включить КВ. Остановка и защита двигателя осуществляются так, как и в первых двух случаях.

Вопросы для самопроверки

В чем различие между элементной, монтажной и принципиальной электрическими схемами?

Как работает схема управления и защиты двигателя с помощью магнитного пускателя (см. рис. 13.18)?

Как осуществляется управление и защита двигателя в схеме, приведенной на рис. 13.19?

Как работает схема управления и защиты двигателя, изображенная на рис. 13.20?

Международная система единиц СИ (SI — система интернациональная)

Наименование величины	Обозначение величины	Единица измерения	Сокращенные обозначения единицы			Размерность	Примечание
			русские	латинские, греческие			
1	2	3	4	5	6	7	

Основные единицы (ГОСТ 9867—61)

Длина	<i>l</i>	метр	<i>m</i>	m	<i>L</i>	1 $\text{Å} = 10^{-10}$ м
Масса	<i>m</i>	килограмм	<i>kg</i>	kg	<i>M</i>	1 карат = $2 \cdot 10^{-4}$ кг
Время	<i>t</i>	секунда	<i>сек</i>	s	<i>T</i>	
Сила тока	<i>I</i>	ампер	<i>a</i>	A	<i>I</i>	
Термодинамическая температура	<i>T</i>	градус Кельвина	$^{\circ}\text{K}$, град	$^{\circ}\text{K}$, deg	θ	$t = T - 273,15$
	<i>I</i>	свеча	<i>св</i>	cd	<i>J</i>	

Производные единицы

Площадь	<i>S</i>	квадратный метр	м^2	m^2	L^2	1 ар = 100 м^2
Объем	<i>V</i>	кубический метр	м^3	m^3	L^3	1 л = 1,000028 дм ³
Сила	<i>F</i>	ньютон	<i>н</i>	N	LMT^{-2}	1 н = 1 кг · 1 м/1 сек ²

Примечание: 1 дин = 10^{-5} н, 1 кэс = 1 кГ = 9,80665 н.

1	2	3	4	5	6	7
Удельный вес	γ	ньютон на кубический метр	н/м^3	N/m^3	$Z^{-2}MT^{-2}$	$1 \text{ кгс/м}^3 = 1 \text{ кГ/м}^3 = 9,80665 \text{ н/м}^3$
Момент инерции (динамический)	J	килограмм-метр в квадрате	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	L^2M	$1 \text{ г} \cdot \text{см}^2 = 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Частота	f	герц	гц	Hz	T^{-1}	
Работа	A	джоуль	дж	J	L^2MT^{-2}	$1 \text{ дж} = 1 \text{ н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ вт} \times 1 \text{ сек}$ $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ дж}$
$1 \text{ кГ} \cdot \text{м} = 1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,80665 \text{ дж}; 1 \text{ ккал} = 10^3 \text{ кал} = 4186,8 \text{ дж}; 1 \text{ квт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ дж} = 860 \text{ ккал}$						
Мощность	P	ватт	вт	W	L^2MT^{-3}	$1 \text{ л. с.} = 1 \text{ HP} = 736 \text{ вт}$
Количество электричества	q, Q	кулон, ампер, секунда	к $\text{а} \cdot \text{сек}$	C A·s	TI	
Электрическое смещение	D	кулон на квадратный метр	к/м^2	C/m^2	$L^{-2}TI$	
Напряжение	U	вольт	в	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	$1 \text{ в} = \frac{1 \text{ вт}}{1 \text{ а}}$
Напряженность электрического поля	E	вольт на метр	в/м	V/m	$LMT^{-3}I^{-1}$	Часто пользуются единицей $1 \text{ кв/см}; 10 \text{ кв/см} = 1 \text{ Мв/м} = 10^6 \text{ в/м}$
Электрическое сопротивление	$Z, z, r, (R), x$	ом	ом	Ω	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	$1 \text{ ом} = 1 \text{ в/1 а}$

1	2	3	4	5	6	7
Электрическая проводимость	Y, y, g, b	$\frac{1}{\text{ом}}$ сименс	$\frac{1}{\text{ом}}$ сим	Ω^{-1}	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	$\frac{1}{\text{ом}} = 1 \text{ а/1 в}$
Электрическая емкость	C	фарада	ф	F	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	$1 \text{ ф} = 1 \text{ к/1 в}; 1 \text{ см} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ ф}$
Магнитный поток	Φ	вебер	вб	Wb	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	$1 \text{ мкс} = 10^{-8} \text{ вб}$ $1 \text{ вб} = 1 \text{ к} \cdot 1 \text{ ом} = 1 \text{ в сек}$
Магнитная индукция	B	тесла	тл	T	$MT^{-2}I^{-1}$	$1 \text{ тл} = 1 \text{ вб/1 м}^2; 1 \text{ гс} = 10^{-4} \text{ тл}$
Индуктивность	L	генри	гн	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	$1 \text{ гн} = 1 \text{ вб/1 а}; 1 \text{ см} = 10^{-9} \text{ гн}$
Магнитодвижущая сила	F	ампер ампер-виток	$\text{а}, \text{ав}$	A, At	I	
Напряженность магнитного поля	H	ампер на метр	$\frac{\text{а}}{\text{м}}$ $\frac{\text{ав}}{\text{м}}$	A/m At/m	$L^{-1}I$	$1 \text{ а} = \frac{1}{4\pi} 10^3 \text{ ав/м}$

Для образования дольных и кратных единиц применяются следующие приставки (ГОСТ 7863—55)

Кратность	Приставка	Обозначения		Дольность	Приставка	Обозначения	
		русскими буквами	латинскими и греческими буквами			русскими буквами	латинскими и греческими буквами
10	дека	да	da	10 ⁻¹	деци	д	d
10 ⁰	гекто	г	h	10 ⁻²	санти	с	c
10 ³	кило	к	k	10 ⁻³	милли	м	m
10 ⁶	мега	М	M	10 ⁻⁶	микро	мк	μ
10 ⁹	гига	Г	G	10 ⁻⁹	нано	н	n
10 ¹²	тера	Т	T	10 ⁻¹²	пико	п	p
				10 ⁻¹⁵	фемто	ф	f
				10 ⁻¹⁸	атто	а	a

Примечания. Показатели степени относятся к тем единицам, которые получились после присоединения приставок. Например: 1 км² = 1 (км)² = (10³ м)² = 10⁶ м²; 1 км² ≠ 1000 м².

Русскими буквами приставки пишутся курсивом, а латинскими (греческими) (в основном применяются в журналах) — прямым шрифтом. Например, емкость в 10⁻⁹ фарады: 1000 пф = 1 нФ.

Не допускаются двойные приставки (например, мегакилограмм, микромикрофарада. Эти единицы соответственно следует выражать таким образом: гигаграмм, пикофарада.

Расчеты выполняются в непосредственных единицах СИ, а приставки применяются только лишь в окончательных результатах расчетов или измерений.

Кратные и дольные единицы нельзя вводить в знаменатель производных единиц. Так, например, единицы н/см² и кв/см к системе СИ не относятся; для перевода в систему СИ эти единицы надо соответственно переписать в н/м² и в/м. Например: 10 н/см² = 10³ н/м² и 100 кв/см = 10⁷ в/м = 10 Мв/м.

Приложение 2

Некоторые уравнения электромагнетизма в рационализованной форме*

Диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0 = \frac{\epsilon}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$$

* Нерационализованной формой уравнений пользовались, примерно, до 1946 г.

Например:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon r^2}; \quad N = 4\pi \Sigma q; \quad \epsilon_0 \mu_0 = 1;$$

$$\oint H \, d\vec{l} = \frac{4\pi}{c} \Sigma I.$$

Закон Кулона

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2}$$

Связь между электрической и магнитной постоянными*

$$\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2.$$

Закон полного тока

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma I.$$

Напряженность поля точечного заряда

$$E = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r^2}.$$

Теорема Гаусса

$$N = \oint \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} = \Sigma q.$$

Сила, действующая на заряд в электрическом поле,

$$F = qE.$$

Потенциал поля точечного заряда

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r}.$$

Работа перемещения заряда в электрическом поле

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Электрическая емкость

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}.$$

Энергия заряженного проводника

$$W = \frac{C\varphi^2}{2}.$$

Энергия поля конденсатора

$$W = \frac{Cu^2}{2}.$$

Закон Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R}.$$

Мощность постоянного тока

$$P = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Активная мощность трехфазной системы

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi.$$

Сопротивление постоянному току

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Магнитная проницаемость

$$\mu_a = \mu_0 \mu = 1,25 \cdot 10^{-6} \mu.$$

Закон Био — Савара — Лапласа

$$dH = \frac{I \cdot \sin \alpha \cdot dl}{4\pi r^2}$$

Напряженность магнитного поля прямого тока

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Индукция магнитного поля

$$B = \mu_a H.$$

Магнитный поток однородного поля

$$\Phi = BS.$$

Напряженность магнитного поля тороида

$$H = \frac{Iw}{l_{cp}}$$

Закон Ампера

$$F = BIl \cdot \sin \alpha.$$

Сила взаимодействия двух бесконечно длинных параллельных токов

$$F = \frac{\mu_a \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi r}$$

Потокоцепление соленоида

$$\Psi = w\Phi = LI.$$

Закон электромагнитной индукции

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}, e = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha.$$

Уравнение трансформаторной э. д. с.

$$E = 4,44 \Phi_m f \cdot w.$$

Индуктивность соленоида

$$L = \frac{\mu_a w^2 S}{l}$$

Подъемная сила электромагнита

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$$

Ток через индуктивность после включения на постоянное напряжение

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Энергия магнитного поля в соленоиде

$$W = \frac{I^2}{2}.$$

Магнитный поток в неразветвленной цепи (закон Ома для магнитной цепи)

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2}}$$

Магнитодвижущая сила (м. д. с.), намагничивающая сила (н. с.)

$$F = Iw.$$

Реактивное сопротивление

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

Приложение 3

Провода с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией
и шнуры с резиновой изоляцией и медными жилами

Сечение токоведущей жилы, мм ²	Токовые нагрузки, а					
	Провода, проложенные открыто	Провода, проложенные в одной трубе				
		два одно- жильных	три одно- жильных	четыре одно- жильных	один двух- жильный	один трех- жильный
0,5	10	—	—	—	—	—
0,75	13	—	—	—	—	—
1	15	14	13	12	13	12
1,5	20	17	15	14	16	13
2,5	27	24	22	22	22	19
4	36	34	31	27	28	24
6	46	41	37	35	35	30
10	70	60	55	45	50	45
16	90	75	70	65	70	60
25	125	100	90	80	90	75
35	150	120	110	100	110	90
50	190	165	150	135	140	120
70	240	200	185	165	175	155
95	290	245	225	200	215	190
120	340	280	255	230	260	220
150	390	320	290	—	—	—
185	450	—	—	—	—	—
240	535	—	—	—	—	—
300	615	—	—	—	—	—
400	735	—	—	—	—	—

Приложение 4

Длительно допустимые нагрузки током на кабели с медной жилой и бумажной пропитанной изоляцией, проложенные в воздухе, а

Сечение жил кабеля, мм ²	Со свинцовой или алюминиевой оболочкой при напряжении, кВ					С полихлорвиниловой оболочкой при напряжении, кВ		
	одно-жилые I	двух-жилые I	трехжильные с поясной изоляцией			четырёх-жилые I	трех-жилые I	четырёх-жилые I
			до 3	6	10			
	максимальная допустимая температура							
80	80	80	65	60	80	65	65	
1,5	30	25	18	—	—	—	—	—
2,5	40	30	28	—	—	25	—	—
4	55	40	37	—	—	35	—	—
6	75	55	45	—	—	45	35	35
10	95	75	60	55	50	60	45	45
16	120	95	80	65	60	80	65	65
25	160	130	105	90	85	100	85	80
35	200	150	125	110	105	120	110	105
50	245	185	155	145	135	145	135	130
70	305	225	200	175	165	185	170	135
95	360	275	245	215	200	215	—	—
120	415	320	285	250	240	260	—	—
150	470	375	330	290	270	300	—	—
185	525	—	375	325	305	340	—	—
240	610	—	430	375	350	—	—	—

Приложение 5

Наибольшие значения номинальных токов плавких вставок предохранителей, соответствующих сечениям изолированных проводов, проложенных открыто на роликах или изоляторах, а

Сечение провода, мм ²	Сети для освещения		Сети для двигателей в производственных помещениях	
	в жилых домах, бытовых и общественных помещениях	в производственных помещениях	на магистралях	на ответвлениях к отдельным двигателям
1	10	15	20	20
1,5	15	20	25	25
2,5	20	25	35	35
4	25	35	60	60
6	35	35	60	60
10	60	60	80	80
16	80	100	125	125
25	100	125	160	160
35	125	160	200	200
50	160	200	225	225
70	200	225	300	300
95	225	300	350	350
120	260	350	430	480
150	300	350	500	500



Прибор измерительный:

а) показывающий;

б) регистрирующий;

в) интегрирующий (например, счетчик)

Примечание. Для указания назначения прибора в его обозначение вписываются буквенные обозначения единиц измерения или измеряемых величин, либо начальные или характерные буквы наименований приборов. Например:

A	амперметр,
V	вольтметр,
VA	вольтамперметр (измеритель полной мощности),
W	ваттметр,
var	варметр (измеритель реактивной мощности),
μA	микроамперметр,
mA	миллиамперметр,
mV	милливольтметр,
Ω	омметр,
M Ω	мегаомметр,
Hz	частотомер,
λ	волномер,
φ	фазометр
Ah	счетчик ампер-часов.
Wh	счетчик ватт-часов,
varh	счетчик вольт-ампер-часов реактивный,

G

гальванометр,

svN

синхроноскоп,

OSC

осциллоскоп,

n

тахометр.

В обозначение измерительных приборов допускается вписывать необходимые данные, согласно действующим стандартам на измерительные приборы.



Электрометр



Болометр



Термопреобразователь:



а) бесконтактный,

б) контактный.

Примечание. Допускается знаки полярности не указывать.



Гальванометр осциллографический:

а) тока или напряжения;



б) мгновенной мощности.



Осциллограф светолучевой.



Шунт.

