

ОСНОВЫ КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Под редакцией
проф. В. А. Привезенцева

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

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



«ЭНЕРГИЯ»

Москва 1975

6П2.1.06

О 75

УДК 621.315.2(075.8)

Авторы: В. А. Привезенцев, И. И. Гроднев, С. Д. Холодный,
И. Б. Рязанов

Основы кабельной техники. Учеб. пособие для
О 75 вузов. Под ред. В. А. Привезенцева. Изд. 2-е, пе-
рераб. и доп. М., «Энергия», 1975.

472 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: В. А. Привезенцев, И. И. Гроднев,
С. Д. Холодный, И. Б. Рязанов

Во втором, переработанном издании книги изложены теория силового электрического кабеля, его электрический и тепловой расчеты, основы теории и технологии скрутки токопроводящих жил, изолирования, сушки, пропитки и наложения свинцовых и алюминиевых оболочек. Описаны также защитные покрытия кабелей. Кроме того, даны основы теории и конструирования кабелей связи, радиочастотных кабелей, а также кабелей и проводов с пластмассовой и резиновой изоляцией.

Первое издание книги было выпущено в 1967 г. В настоящем издании учтены все последние достижения в кабельной технике.

Книга предназначена в качестве учебного пособия по курсу «Основы кабельной техники» для студентов электроизоляционной и кабельной специализаций вузов.

О 30308-002
051[01]-75 141-75

6П2.1.06

© Издательство «Энергия», 1975 г.

Владимир Алексеевич Привезенцев,
Игорь Измайлович Гроднев,
Станислав Дмитриевич Холодный,
Игорь Борисович Рязанов

ОСНОВЫ КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Редактор
Н. Х. Сорочкин
Редактор издательства
М. И. Николаева
Переплет художника
Е. В. Никитина
Технический редактор
Л. А. Молодцова
Корректор
В. С. Антипова

Сдано в набор 30/VII 1974 г.
Подписано к печати 17/XII 1974 г.
Т-21314 Формат 84×108¹/₃₂
Бумага типографская № 3
Усл. печ. л. 24,78 Уч.-изд. л. 27,02.
Тираж 15 000 экз.
Зак. 881 Цена 1 р. 11 к.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Школьная наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
113114, Москва, М-114, Школьная наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи с бурным развитием многочисленных отраслей народного хозяйства Советского Союза непрерывно возрастает потребность в кабельных изделиях различного рода. Так, решениями XXIV съезда КПСС предусмотрено строительство ряда мощных электростанций и линий электропередачи высокого напряжения. В связи с этим нашей кабельной промышленности предстоит выполнение большого объема работ, связанных с освоением производства кабелей переменного тока на напряжение 380—750 кВ и постоянного тока на напряжение 800—1500 кВ.

Химическая промышленность в последнее время освоила производство новых электроизоляционных пластмасс, пленок и волокон, что в свою очередь создало предпосылки для разработки новых конструкций и технологии изготовления различных кабельных изделий с применением этих материалов.

Использование явления сверхпроводимости, криогенная техника, космическая и современная авиационная техника и т. п. также требуют создания целого ряда новых, часто очень сложных и трудных в производстве кабельных изделий.

В решениях XXIV съезда КПСС большое внимание уделено вопросам, связанным с разработкой и созданием автоматических систем управления и возможно широким применением современной вычислительной техники, для которых также требуются новые виды обмоточных и монтажных проводов. Решение этих сложных задач на заводах и в научно-исследовательских организациях нашей кабельной промышленности требует соответствующего

щего количества высококвалифицированных инженерно-технических и научных работников, а также пособий, которые отражали бы теоретические основы и современное состояние кабельной промышленности. Такие пособия необходимы также и многочисленным инженерно-техническим работникам тех отраслей нашей промышленности, в которых кабельные изделия находят широкое применение.

Основное назначение настоящей книги заключается в том, чтобы служить учебным пособием по курсу «Основы кабельной техники» для студентов электроизоляционной и кабельной специализаций очного, вечернего и заочного обучения. Поэтому книга составлена в соответствии с утвержденной программой этого курса, а также с учетом наличия других учебных пособий по кабельной технике. Вместе с тем авторы приложили все усилия, чтобы отразить в этой книге современные достижения в области теории, технологии и конструирования кабельных изделий. По сравнению с первым новое издание существенно переработано и дополнено рядом новых разделов, имеющих в настоящее время существенное значение (кабельные изделия для сверхпроводящей и криогенной техники, кабели с натриевыми жилами, кабельные изделия для автоматических систем управлений, новые конструкции кабелей связи и радиочастотных кабелей, новые виды пластмасс и кабельных изделий с их применением и т. п.). Поэтому авторы выражают надежду, что их труд будет способствовать подготовке квалифицированных инженерных и научных кадров для кабельной промышленности и таким образом в какой-то степени содействовать выполнению исторических решений XXIV съезда КПСС.

Материал книги составлен следующим образом: гл. 1 (за исключением § 1-10), гл. 4—7 и 10 написаны проф. В. А. Привезенцевым, гл. 2 и 3 — доц. С. Д. Холодным, гл. 8 — ст. преподавателем И. Б. Рязановым, гл. 9 и § 1-10 — проф. И. И. Гродневым.

Авторы будут признательны за все замечания и пожелания по содержанию книги, которые следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10.

Авторы

Глава первая

КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Из весьма многочисленного ассортимента современных кабельных изделий можно выделить следующие основные виды: а) неизолированные провода для воздушных электропередач и других различных целей; б) силовые кабели с пропитанной бумажной изоляцией, включая кабели высокого напряжения переменного и постоянного тока; в) кабели, провода и шнуры с пластмассовой и резиновой изоляцией самого различного назначения (этот вид кабельных изделий имеет исключительно обширный ассортимент); г) городские и междугородные кабели связи, радиочастотные и различные специальные высокочастотные кабели и провода; д) обмоточные и монтажные провода с эмаливой, волокнистой, пленочной и пластмассовой изоляцией; е) кабельная арматура.

1-1. НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Неизолированные провода предназначаются для воздушных линий электропередачи, электрических соединений на подстанциях (шины и пр.), электрифицированного транспорта, при устройстве антенн и т. п. Из многочисленного ассортимента неизолированных проводов наибольшее значение и распространение имеют алюминиевые и сталеалюминиевые провода, которые изготавливаются в соответствии с ГОСТ 839-74.

Неизолированные медные провода (марки М) ввиду большой дефицитности меди применяются на линиях электропередачи только в тех случаях, когда они не могут быть заменены алюминиевыми или сталеалюминиевыми проводами (вблизи морских побережий, соленых озер и химических заводов, где иногда наблюдается разрушение алюминиевых проводов вследствие коррозии).

Несколько большее применение (для присоединения к подвижным контактам) находят

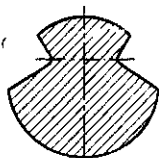


Рис. 1-1. Сечение контактного провода.

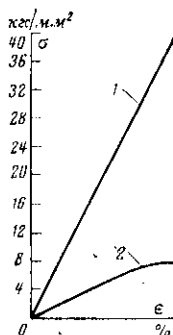


Рис. 1-2. Зависимость напряжений в сталеалюминиевом проводе от удлинения.

1 — стальной сердечник; 2 — алюминиевые проволоки.

гибкие медные провода (марок МГГ и МГГЭ ГОСТ 5991-68), а также круглые или фасонные контактные провода из меди и ее сплавов (рис. 1-1) для питания токоприемников электрифицированного транспорта (ГОСТ 2584-63).

Для устройства больших переходов линий электропередачи (через широкие реки, в горных условиях и т. п.), а также антенн применяются усиленные сталеалюминиевые провода марки АС, а также в ряде случаев бронзовые и сталебронзовые провода, обладающие повышенной механической прочностью. В качестве шин электрических подстанций иногда применяются полые медные (сечением 240—300 мм²) и алюминиевые (сечением 500 мм²) провода.

Механические свойства проводов, изготовленных из однородных проволок, определяются соответствующими характеристиками исходных материалов.

Сталеалюминиевый провод состоит из двух частей: стального сердечника и наружных повивов из твердых алюминиевых проволок. При наличии растягивающих усилий напряжение в стальной и алюминиевой частях провода будет пропорционально их модулям упругости. На рис. 1-2 показана зависимость этих напряжений от удлинения. Нетрудно видеть, что предельно допустимому напряжению для алюминия $\sigma_{\text{макс}} = 80$ МПа соответствует напряжение в стальной части $\sigma = 400$ МПа, т. е. эта часть будет несколько недогружена.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКР) для алюминиевой твердотянутой проволоки $\alpha_a = 23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, а для стальной $\alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, т. е. почти в 2 раза меньше. Поэтому при нагревании выше температуры, при которой производилось скручивание провода и при которой алюминиевая и стальная части получили определенную температурную деформацию, в стальном сердечнике возникают растягивающие, а в повивах алюминиевых проволок — сжимающие усилия.

Обозначим отношение площадей поперечного сечения алюминиевых проволок и стального сердечника через k_a . Учитывая физико-механические свойства применяемой стальной проволоки, а также возможность дополнительных напряжений при изгибах и в натяжных зажимах, обычно k_a выбирают равным не более 10. Наименьшее значение k_a , при котором вся нагрузка практически воспринимается стальным сердечником, составляет примерно 3,5.

При разработке конструкций сталеалюминиевых проводов значения k_a обычно принимаются в пределах 4,1—8,2, при этом учитываются технологические возможности изготовления проводов. Так, например, для проводов сечением 95 мм² и менее целесообразно применение $k_a \approx 6$. В этом случае провод можно изготавливать с одной стальной проволокой в центре.

В настоящее время сталеалюминиевые провода в основном изготавливаются марок АС, АСК, АСКС и АСКП, причем в проводах последних трех марок для повышения стойкости против коррозии

Таблица 1-1

Значения коэффициента k_a для сталеалюминиевых проводов разных марок

Номинальное сечение алюминиевых проводов марок АС, АСКС, АСКП, АСК, мм ²	Значения коэффициента k_a	Номинальное сечение алюминиевых проводов марок АС, АСКС, АСКП, АСК, мм ²	Значения коэффициента k_a
10	6,0	300	1,47; 4,55; 6,25;
16	6,0		7,7
25	5,95	330	7,67; 12,8
50	6,25	400	4,30; 6,25; 7,84;
70	0,97; 6,35		18,18
95	0,71; 5,92; 6,32	450	8,03
120	4,44; 6,32	500	1,49; 7,81; 18,5
150	4,44; 6,25; 7,9	550	7,74
185	1,44; 4,22; 6,38;	600	8,33
	7,72	650	8,22
205	7,6	700	8,13
240	4,28; 6,16; 7,52	750	8,07
		800	7,62

межпроводочное пространство стального сердечника, а в проводах марки АСКС и наружная поверхность этого сердечника заполнены нейтральной смазкой повышенной нагревостойкости. В проводах марки АСК стальной сердечник после покрытия смазкой обматывается полиэтилентерефталатной лентой, предупреждающей вытекание смазки.

Учитывая рекомендации МЭК, ГОСТ 839-74 предусматривает для одних и тех же сечений проводов всех вышеуказанных марок различные величины k_a , в чем нетрудно убедиться из табл. 1-1, в которой приведены номинальные сечения всех алюминиевых проводов и значения величины k_a .

Увеличение сечения стального сердечника ($k_a < 6-6,3$) значительно повышает предел прочности их при разрыве. Иногда, например, при расщеплении фаз целесообразно применение более экономичных проводов с уменьшенным сечением стального сердечника ($k_a > 6-6,3$).

Для замены бронзовых и сталебронзовых проводов с повышенной механической прочностью ГОСТ 839-74 предусматривает возможность изготовления сталеалюминиевых проводов вышеприведенных марок с увеличенным сечением стального сердечника ($k_a = 0,71-1,44$, см. табл. 1-1).

Предел прочности при растяжении проводов можно определить с помощью следующего уравнения

$$P = b \Sigma p_a + C \Sigma p_{ст}$$

Здесь R_a — разрывное усилие одной алюминиевой проволоки, $R_{ст}$ — усилие в одной стальной проволоке при растяжении на 1%, b и C — коэффициенты, учитывающие наличие мест сращивания проволок и принимаемые для различных случаев в пределах 0,92—1,0.

В ограниченном количестве изготавливаются алюминиевые провода марок А и АКП сечением 16—800 мм² без стального сердечника. У проводов последней марки внутренние межпроволочные пространства заполнены нейтральной смазкой повышенной нагревостойкости.

Описанные конструкции сталеалюминиевых проводов имеют очень большое значение при строительстве и эксплуатации крупных электропередач, так как стоимость воздушных линий, например по данным США, в 6—15 раз меньше стоимости подземных кабельных линий той же передающей мощности. Этим отчасти объясняется и тот факт, что до последнего времени протяженность подземных кабельных линий во многих странах составляет только доли одного процента протяженности воздушных линий.

1.2. СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ С ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ 1—10 кВ

Эти кабели изготавливаются с медными и алюминиевыми токопроводящими жилами, в свинцовой или алюминиевой оболочке, с различными защитными покровами в зависимости от назначения и условий эксплуатации.

Каждому типу кабеля, в том числе силового, присвоена определенная марка — обозначение, состоящее из одной или нескольких букв, которые представляют собой начальные буквы слов, характеризующих основные конструктивные особенности кабеля и, иногда, его назначение.

Так, буква С указывает, что кабель имеет свинцовую оболочку. Буквы Б, П и К обозначают тип брони (соответственно — ленточная броня и броня из плоских и круглых проволок). Буква А в начале маркировки указывает, что кабель имеет алюминиевые токопроводящие жилы; если буква А стоит вместо буквы С, это означает, что кабель имеет алюминиевую оболочку.

Для примера ниже приводится маркировка некоторых основных типов силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, которые уже много лет изготавливаются нашими кабельными заводами:

СБ и АСБ — силовые кабели соответственно с медными и алюминиевыми жилами, в свинцовой оболочке, с ленточной броней и наружными покровами из волокнистых материалов;

ААБв — силовой кабель с алюминиевыми жилами, в алюминиевой оболочке, с ленточной броней и усиленными защитными покровами (подушкой);

ОСБ, АОСБ, ОСК и АОСК — силовые кабели с тремя отдельно изолированными и оцинкованными медными и соответственно алюминиевыми токопроводящими жилами, с ленточной и проволочной броней.

С 1975 г. вместо ГОСТ 340-59 и 6515-55 у нас войдет в действие новый стандарт на силовые кабели с пропитанной бумажной изоляцией всех конструкций, кроме кабелей, пропитанных нестекающими составами, на которые с 1975 г. будет распространяться другой стандарт.

Кроме того, с этого времени в силу вступит новый стандарт на защитные покровы (взамен ГОСТ 7006-72), в котором предусматривается целый ряд новых типов защитных покровов с пластмассовыми и другими покрытиями. В связи с этим значительно возрастет ассортимент силовых кабелей, так как кабели с различными защитными покровами должны иметь отдельную маркировку.

Медные токопроводящие жилы одножильных и многожильных кабелей сечением 6—16 мм² изготавливаются из одной круглой проволоки, жилы сечением 25—95 мм² могут быть однопроволочными или многопроволочными, а сечением 120—800 мм² — только многопроволочными. Алюминиевые жилы сечением 6—50 мм² должны изготавливаться только однопроволочными, сечением 70—240 мм² могут быть как однопроволочными, так и многопроволочными и сечением 300—800 мм² — только многопроволочными.

Новый стандарт значительно повышает требования к электрической проводимости токопроводящих жил, электрическое сопротивление которых постоянному току при 20 °С не должно превышать следующих значений:

Одножильные кабели сечением до 500 мм ² :	
медные жилы	17,76 нОм·м
алюминиевые жилы	29,11 нОм·м
Одножильные кабели сечением 625—800 мм ² и все многожильные кабели:	
медные жилы	17,93 нОм·м
алюминиевые жилы	29,41 нОм·м

Наибольшее применение находят трехжильные кабели, которые изготавливаются на напряжения 1, 3, 6 и 10 кВ.

Двух- и четырехжильные кабели изготавливаются только на напряжение 1 кВ.

На рис. 1-3 приведена конструкция трехжильного кабеля с поясной изоляцией и ленточной броней. Электрическое поле в кабелях с поясной изоляцией имеет очень сложный вид. Здесь появляется напряженность электрического поля вдоль слоев пропитанной бумаги, что значительно снижает электрическую прочность изоляции кабеля, так как вдоль слоев она примерно в 10 раз меньше, чем поперек их. Поэтому существенно важно наиболее полное и качественное заполнение межфазных пространств (рис. 1-3). Обычно для этого применяется бумажный кордель, который скручивается из сульфатной или кабельной бумаги марки К-12.

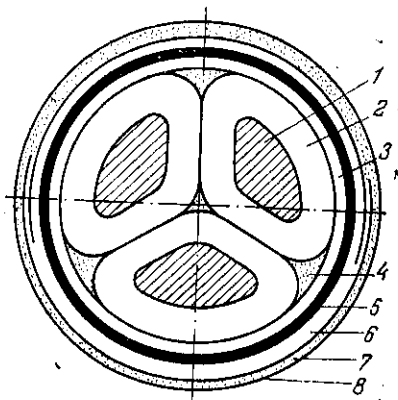


Рис. 1-3. Трехжильный кабель с поясной изоляцией.

1 — токопроводящая жила; 2 — жилная изоляция; 3 — поясная изоляция; 4 — межфазные заполнения; 5 — свинцовая алюминиевая оболочка; 6 — подушка под броню; 7 — броня из двух стальных лент; 8 — наружный защитный покров.

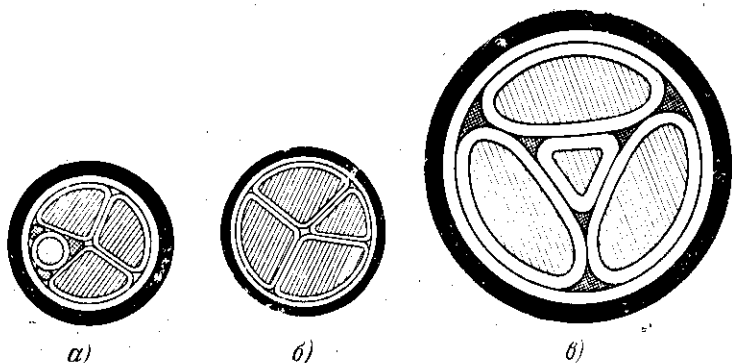


Рис. 1-4. Сечения четырехжильного кабеля.

a — нулевая жила круглой формы; *б* — нулевая жила секторной формы; *в* — нулевая жила в центре кабеля.

Скрутка четырехжильных кабелей и придание им строго круглой формы связаны с технологическими трудностями. На рис. 1-4 приведены возможные конструкции четырехжильных кабелей, которые по новому стандарту могут иметь номинальное сечение основных жил в пределах 10—185 мм² и нулевой жилы в пределах 6—50 мм².

Во время нормальной эксплуатации кабелей напряжение между жилами в $\sqrt{3}$ раза больше, чем между жилой и оболочкой, и поэтому толщина поясной изоляции берется значительно меньшей в сравнении с жильной.

При заземлении одной из фаз напряжение между жилой и оболочкой двух других фаз будет зависеть от падения напряжения в заземляющем сопротивлении нейтральной точки трансформатора.

В ГДР и ФРГ в сетях с глухим заземлением нейтрали кабели при аварийных режимах отключаются, и поэтому они имеют изоляцию, рассчитанную по примерно одинаковой средней напряженности электрического поля между жилами и между жилой и оболочкой. В Англии значительная часть кабелей изготавливается для работы с таким заземлением нейтрали, при котором в случае замыкания на землю одной из фаз напряжение между жилами других фаз и оболочкой будет не более 80% линейного напряжения, что и имеет в виду при определении толщины изоляции жил и поясной изоляции.

В СССР силовые кабели предназначены для работы с изолированной нейтралью. Следовательно, при заземлении одной из фаз напряжение между жилой и оболочкой у других фаз возрастает до линейного. Это обстоятельство учитывается при выборе толщины поясной и жильной изоляции. На основании исследований ГОСТ 340-59 и новым стандартом на силовые кабели установлены толщины изоляции (табл. 1-2).

Электрическое сопротивление изоляции при 20 °С, измеряемое в соответствии с ГОСТ 3345-67, должно быть у кабелей на напряжения 1 и 3 кВ не менее 100 Гом·м и у кабелей на напряжение 6 кВ и выше — не менее 200 Гом·м.

Испытания напряжением производятся в соответствии с ГОСТ 2990-72, причем длительность каждого испытания у трех- и четырехжильных кабелей должна составлять 40 мин, у двухжильных 15 мин и у одножильных 20 мин. Кабели на напряжение 6 кВ с обедненной изоляцией должны испытываться в течение 15 мин напряжением постоянного тока 45 кВ.

Испытательные напряжения переменного тока кабелей 1, 3, 6 и 10 кВ равны соответственно 3,5; 10; 16 и 25 кВ (см. § 10-8).

Кроме того, образцы кабелей на напряжение 6 и 10 кВ длиной не менее 5 м должны выдержать в течение 4 ч испытание напряжением переменного тока, равным четырехкратному номинальному напряжению. Наконец, после прокладки кабели 1—10 кВ должны выдержать в течение 10 мин испытание напряжением постоянного тока, равным $6U_{ном}$, а кабели 20 и 35 кВ — напряжением $5U_{ном}$.

Значение $\operatorname{tg} \delta$, измеренное на строительной длине кабелей 10 кВ и более при напряжении, равном половине номинального, должно быть не более 0,008. Приращение $\operatorname{tg} \delta (\Delta \operatorname{tg} \delta)$ при повышении напряжения должно быть не более указанного в табл. 1-3.

Таблица 1-2

Толщина изоляции силовых кабелей на напряжения 1—35 кВ

Напряжение кабеля, кВ	Сечение жил, мм ²	Номинальная толщина, мм	
		изоляции жил	полной изоляции
1	6—95	0,75	0,5
	120 и 150	0,85	0,6
	185 и 240	0,95	0,6
3	6—240	1,35	0,7
6	10—240	2,0	0,95
6*	16—120	2,75	1,25
10	16—240	2,75	1,25
20	25—95	7,0	—
	120—400	6,0	—
35	120—300	9,0	—

* Обедненно-пропитанная изоляция.

Таблица 1-3

Максимально допустимое увеличение $\operatorname{tg} \delta$ изоляции силовых кабелей

Параметр	Напряжение кабеля, кВ					
	10		20		35	
Напряжения при измерении $\operatorname{tg} \delta$, кВ	5 и 12,5	12,5 и 20	10 и 25	25 и 40	17,5 и 44	44 и 70
$\Delta \operatorname{tg} \delta$ не более	0,002	0,004	0,0008	0,0016	0,0008	0,0016

1.3. КАБЕЛИ С РАДИАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ НА НАПРЯЖЕНИЯ 20 И 35 кВ

В этих кабелях поверх изоляции каждой жилы накладывается проводящий экран или металлическая оболочка, благодаря чему силовые линии электрического поля имеют радиальное направление. Кабель с экранированными жилами в общей свинцовой оболочке был предложен в 1913 г. М. Хохштедтером и иногда называется по первой букве фамилии изобретателя Н-кабелем. На рис. 1-5 приведена усовершенствованная конструкция Н-кабеля с уплотненными секторными жилами и с наличием дополнительных экранов из полупроводящей бумаги. Такие кабели применяются в некоторых зарубежных странах.

В СССР трехжильные кабели на напряжения 20 и 35 кВ с вязкой пропиткой изготавливаются только с отдельно освинцованными жилами (марки ОСБ, ОСК, АОСБ, АОСК), а одножильные кабели 20—35 кВ в соответствии с новым стандартом будут выпускаться с медными и алюминиевыми жилами, в свинцовой и алюминиевой оболочках, с различными типами защитных покровов (марки СГ, АСГ, ААГ, ААШВ).

На рис. 1-6 приведена современная конструкция трехжильного кабеля марки ОСК для подводной прокладки. Наличие экранов из полупроводящей бумаги по жиле и под свинцовой оболочкой и усовершенствование технологии производства кабелей позволяет снизить (в соответствии с нормами нового стандарта) толщину изоляции у кабелей 20 кВ сечением 25—95 и 120—400 мм² до 7 и 6 мм и у всех кабелей 35 кВ до 9 мм. Новым стандартом минимальное сечение жил кабелей 35 кВ ограничивается сечением 120 мм², так как у кабелей с меньшим сечением жил толщина изоляции значи-

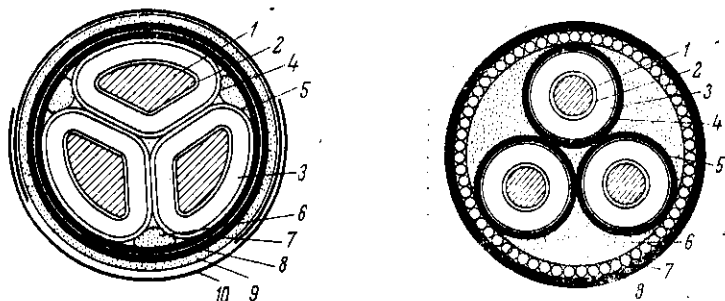


Рис. 1-5. Кабель с экранированными секторными жилами.

1 — токопроводящая жила; 2 — экран из полупроводящей бумаги; 3 — пропитанная бумажная изоляция; 4 — экран из полупроводящей бумаги; 5 — экран из перфорированной медной ленты; 6 — межфазные заполнения; 7 — металлическая лента поверх трех жил; 8 — свинцовая оболочка; 9 — подушка под броней; 10 — броня из двух стальных лент.

Рис. 1-6. Трехжильный кабель с отдельно освинцованными жилами для подводной прокладки.

1 — токопроводящая жила; 2 — экран из полупроводящей бумаги; 3 — пропитанная бумажная изоляция; 4 — экран из полупроводящей бумаги; 5 — свинцовая оболочка; 6 — заполнение из пропитанной кабельной пряжи; 7 — проводящая броня; 8 — наружный защитный покров.

тельно увеличивается и применение таких кабелей становится неэкономичным.

Испытательные напряжения кабелей 20 и 35 кВ соответственно 50 и 88 кВ, причем каждая жила должна выдержать это напряжение в течение 20 мин. Кроме того, образцы кабелей длиной не менее 5 м в течение 4 ч должны испытываться напряжением переменного тока соответственно 75 и 115 кВ.

Значение $\operatorname{tg} \delta$, измеренное на строительной длине кабеля, должно быть не более 0,008, а увеличение $\operatorname{tg} \delta$ при подъеме напряжения должно быть не более приведенного в табл. 1-3. Кроме того, у кабелей 20 и 35 кВ определяется $\operatorname{tg} \delta$ после нагрева образцов до 50 °С, при этом $\operatorname{tg} \delta$ должен быть не более 0,008, а приращение $\operatorname{tg} \delta$ у кабелей 20 и 35 кВ при подъеме напряжения соответственно с 10 до 25 кВ и с 17,5 до 44 кВ не более 0,001 и соответственно с 25 до 40 и с 44 до 70 кВ не более 0,0019.

1-4. КАБЕЛИ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОКЛАДOK

Применение кабелей с вязкой пропиткой для вертикальных прокладок затрудняется тем, что в них пропиточный состав при нагревании во время эксплуатации начинает постепенно стекать в нижнюю часть трассы проложенного кабеля. При этом верхний участок кабеля лишается значительной части пропиточного состава, что приводит к образованию пустот и возникновению в них ионизации при определенной напряженности электрического поля. В то же время в нижнем участке кабеля создается повышенное давление от образующегося столба жидкого состава, что может приводить к повреждению металлических оболочек кабеля.

В связи с этим новый стандарт допускает при прокладке кабелей с вязкой пропиткой разность уровней для кабелей 1—3 кВ не более 20—25 м, для кабелей 6—10 кВ в свинцовой оболочке не более 15 м и для кабелей 20—35 кВ не более 5 м. Кабели 3 и 6 кВ с обедненной изоляцией в свинцовой и алюминиевой оболочках могут прокладываться при разности уровней до 100 м (для кабелей 3 кВ с обедненной изоляцией в алюминиевой оболочке разность уровней вообще не ограничивается).

Основным типом кабелей для вертикальных прокладок у нас и за рубежом являются кабели, пропитанные нестекающим составом. На эти кабели с 1975 г. будет распространяться вновь составленный государственный стандарт, в соответствии с которым их предусматривается изготавливать в свинцовой и алюминиевой оболочках, с различными защитными покровами (марки ЦСВ, ЦАСВ, ЦОСВ, ЦАОСВ) напряжением 6 и 10 кВ с сечением токопроводящих жил 25—185 мм² и напряжением 35 кВ сечением 120—150 мм². Одножильные кабели 35 кВ марок ЦАШВ, ЦСШВ и ЦАСШВ могут изготавливаться с токопроводящими жилами 120—300 мм².

Кабели 6 кВ должны иметь толщину жильной изоляции 2,35 мм и поясной изоляции 1,15 мм, кабели 10 кВ соответственно 3,40 и 1,40 мм и кабели 35 кВ — 12 мм, причем у последних кабелей слой изоляции толщиной не менее 1,1 мм, прилегающий к жиле, должен быть из лент высоковольтной бумаги толщиной 0,08 мм, а остальная изоляция из высоковольтной бумаги толщиной 0,12 мм.

Бумажная изоляция пропитывается нестекающими составами, подробно описанными ниже. Толщины свинцовых оболочек рассмат-

риваемых кабелей предусматриваются такими же, как и у кабелей, пропитанных вязким составом, причем в свинцовых оболочках допускается наличие таких же присадок, как и в других кабелях. Алюминиевые оболочки должны соответствовать ГОСТ 14099-68, который распространяется и на оболочки силовых кабелей с вязкой пропиткой.

Кабели, пропитанные нестекающим составом, подвергаются примерно тем же испытаниям напряжением переменного тока, что и кабели с вязкой пропиткой. Кроме того, для них предусматривается испытание напряжением постоянного тока в течение 15 мин, причем значения испытательного напряжения для кабелей 6, 10 и 35 кВ должны быть соответственно 45, 73 и 270 кВ.

Значение $\operatorname{tg} \delta$, измеренное на строительной длине кабеля на 10 и 35 кВ при напряжении, равном половине номинального, не должно превышать 0,008, а приращение $\operatorname{tg} \delta$ при подъеме напряжения с 5 до 12,5 кВ у кабелей 10 кВ должно быть не более 0,008. Такое же приращение допускается и у кабелей 35 кВ, но при подъеме напряжения с 17,5 до 70 кВ.

Кабели должны быть стойкими к наививанию, что проверяется повышенным напряжением после испытаний наививанием. После прокладки кабели 6 и 10 кВ должны выдерживать испытание напряжением постоянного тока, равным $6U_{ном}$, а кабели 35 кВ — напряжением, равным $5U_{ном}$.

1.5. КАБЕЛИ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

Производство силовых кабелей с вязкой пропиткой на напряжение выше 35 кВ связано с большими трудностями, так как процесс изготовления этих кабелей таков, что в изоляции их всегда остается некоторое количество воздушных включений, значительно снижающих электрическую прочность изоляции. Если эти включения находятся в местах высокой напряженности электрического поля, в них возникает ионизация, которая сначала приводит к повышению температуры, а потом к ускоренному старению этих мест изоляции.

Если воздушные включения находятся в местах, где напряженность электрического поля недостаточна для возникновения ионизации, то и в этом случае следует учитывать, что в процессе эксплуатации кабель подвергается периодическим нагревам и охлаждениям. При нагреве все элементы кабеля увеличиваются в объеме, а при охлаждении вследствие остаточных деформаций происходит увеличение объема воздушных включений и, кроме того, воздушные включения, которые раньше были у оболочки, перемещаются ближе к токопроводящей жиле, т. е. в область повышенной напряженности электрического поля.

Значительного увеличения электрической прочности изоляции кабеля можно достигнуть исключением в ней воздушных включений или значительным увеличением давления в газовых включениях, что, как известно, существенно повышает электрическую прочность этих включений.

Первое направление используется в маслонаполненных кабелях с каналами для масла внутри токопроводящей жилы (так называемые кабели низкого и среднего давления), второе — в кабелях высокого давления в стальных трубопроводах, а также в газонаполненных кабелях.

А. Маслонаполненные кабели низкого и среднего давления

Максимальное внутреннее давление масла у кабелей низкого давления составляет около 0,2 МПа и у кабелей среднего давления — около 0,4—0,5 МПа.

Опыт эксплуатации маслонаполненных кабелей показал, что из этих двух групп более экономичными являются кабели среднего давления, которые изготавливаются на наших кабельных заводах на напряжения 110 и 220 кВ с токопроводящими жилами сечением 120—800 мм² (ГОСТ 16441-70). Отдельные заказы выполняются и на напряжение 380 кВ.

Эти кабели имеют следующую маркировку:

МСС — кабель с медными жилами, в свинцовой оболочке, с упрочняющими медными лентами и лентами из поливинилхлорида;

МССА — то же, но с дополнительным защитным покровом из поливинилхлоридных или резиновых лент и пропитанной кабельной пряжи;

МССК — кабель с медными жилами, в свинцовой оболочке, с упрочняющими лентами, защитными покровами, с броней из стальных оцинкованных проволок диаметром 4 и 6 мм.

Жилы маслонаполненных кабелей среднего давления изготавливаются преимущественно из луженых Z-образных медных проволок,

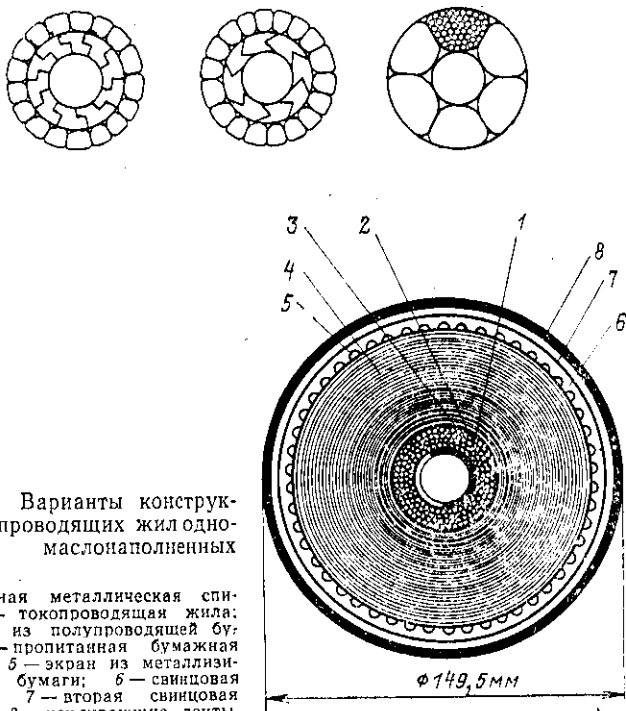


Рис. 1-7. Варианты конструкции токопроводящих жил одножильных маслонаполненных кабелей.

1 — опорная металлическая спираль; 2 — токопроводящая жила; 3 — экран из полупроводящей бумаги; 4 — пропитанная бумажная изоляция; 5 — экран из металлизированной бумаги; 6 — свинцовая оболочка; 7 — вторая свинцовая оболочка; 8 — усиливающие ленты.

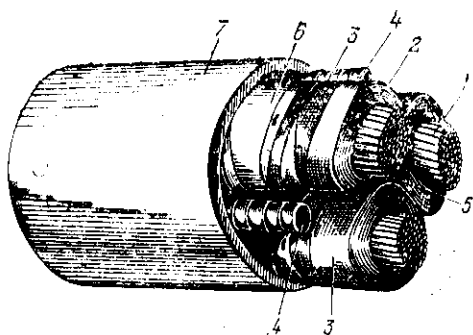


Рис. 1-8. Трехжильный маслонаполненный кабель.

1 — токопроводящие жилы; 2 — изоляция; 3 — перфорированная медная лента; 4 и 5 — каналы для масла; 6 — металлические ленты; 7 — свинцовая оболочка.

образующих в центре жилы канал диаметром обычно 12—14 мм и одного или двух повивов сегментных проволок — в зависимости от сечения жилы (рис. 1-7). Поверх токопроводящей жилы накладывается экран из трех-четырех лент полупроводящей бумаги и изоляция из высоковольтной кабельной бумаги толщиной в зависимости от сечения; 9,6—11 мм в кабелях напряжением 110 кВ и 18—20,8 мм в кабелях на напряжение 220 кВ (ГОСТ 16441-70).

За рубежом широко применяются также токопроводящие жилы, у которых внутренний канал образуется с помощью спирально намотанной круглой или прямоугольной проволоки из нержавеющей стали. Такие токопроводящие жилы (рис. 1-7) обладают повышенной гибкостью и легче в изготовлении.

За рубежом применяются также на напряжение 110 кВ трехжильные маслонаполненные кабели (рис. 1-8), которые при малых сечениях жил экономичнее одножильных. У трехжильных маслонаполненных кабелей каналы для масла делаются из спирально намотанных лент и располагаются под металлической оболочкой (рис. 1-8). С целью увеличения гибкости для таких кабелей начи-

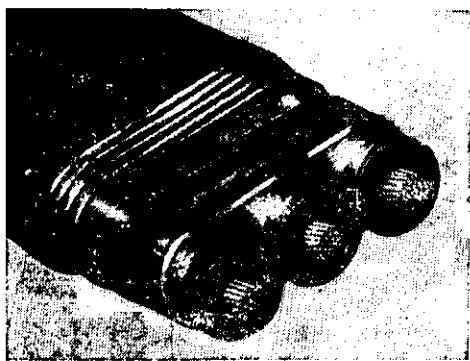


Рис. 1-9. Плоский маслонаполненный кабель на напряжение 120 кВ.

Нают применять гофрированные алюминиевые оболочки, на которые для защиты от коррозии в свою очередь накладывается оболочка из пластмассы (поливинилхлорида).

Кроме того, за рубежом на напряжения 33—132 кВ изготавлиются трехжильные плоские маслonaполненные кабели, у которых изолированные и экранированные жилы также помещаются внутри свинцовой оболочки (рис. 1-9). По плоским сторонам последней помещаются рифленные бронзовые полосы, стягиваемые в канавках твердыми медными проволоками. Благодаря давлению этих полос в кабеле всегда поддерживается давление масла не менее 0,2 МПа. Такие кабели не требуют дополнительных подпитывающих устройств и могут прокладываться большими строительными длинами.

Описанные выше отечественные кабели среднего давления в строительных длинах должны выдерживать в течение 15 мин испытательное напряжение переменного тока, равное $2U_0$ для кабелей 110 кВ и $1,73U_0 + 10$ кВ для кабелей 220 кВ, или напряжение постоянного тока в 2,4 раза большее, чем испытательное напряжение переменного тока (U_0 — номинальное фазовое напряжение кабеля). Значение $\lg \delta$ при 20 °C должно быть не более 0,005.

Б. Маслонаполненные кабели высокого давления

Кабели марки МВДТ (ГОСТ 16441-70) получили широкое применение в СССР и в ряде стран за рубежом. У нас эти кабели изготавливаются на напряжения 110, 220, 380 и 500 кВ. Ведутся работы по созданию таких кабелей на более высокие напряжения. В США и некоторых других странах такие кабели изготавливаются на напряжения 230, 275, 345 и 500 кВ.

Конструкция маслonaполненного кабеля высокого давления приведена на рис. 1-10. Изолированные и экранированные жилы, снабженные паложенными на них полукруглыми проволоками скольжения, затягиваются в стальные трубы диаметром 200—270 мм в зависимости от диаметра фазы кабеля.

Токопроводящие жилы (сечением 120—700 мм²) изготавливаются из мягкой медной проволоки. При сечениях жил более 600—700 мм² нужно считаться с потерями от поверхностного эффекта и эффекта близости. Поэтому такие жилы скручиваются из нескольких (чаще четырех) секторов, половина которых изолируется попеременно несколькими лентами из кабельной бумаги.

Толщины изоляции кабелей марки МВДТ на различные напряжения равны:

Напряжение, кВ	110	220	380	500
Толщина изоляции, мм	9,6—12,4	17,5—20,7	26—28	30—31

Кабели МВДТ обладают некоторыми преимуществами по сравнению с кабелями среднего давления, так как для пропитки бумажной изоляции и для заполнения трубопровода в них применяется более вязкое масло (С-220), чем для заполнения кабелей среднего давления, что естественно повышает стабильность и импульсную прочность пропитанной изоляции. Вообще электрическая прочность изоляции этих кабелей выше, чем кабелей среднего давления, так как изоляция у них находится под более высоким да-

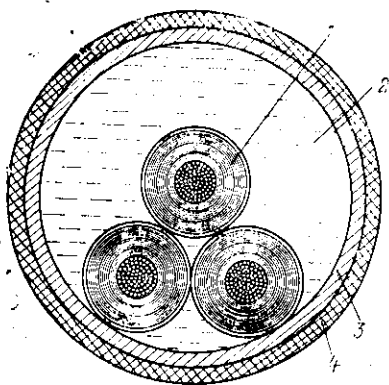


Рис. 1-10. Маслонаполненный кабель высокого давления в стальном трубопроводе.

1 — кабель; 2 — масло марки С-220; 3 — стальной трубопровод; 4 — антикоррозионный покров.

лением. Стальная труба является надежной защитой от механических повреждений, что в свою очередь значительно повышает эксплуатационную надежность кабелей.

Кабельные линии в стальных трубопроводах обычно не имеют стопорных муфт и распределенной по трассе подпитывающей аппаратуры, так как поддержание давления масла в трубе в определенных пределах осуществляется с помощью автоматических подпитывающих устройств, устанавливаемых обычно на одном конце линии. На линиях большой длины эти устройства устанавливаются на обоих концах.

После изготовления и наложения временных свинцовых оболочек при ат-

мосферном давлении кабели на 110 кВ испытываются напряжением переменного тока $0,9U_0$, а кабели на 220 кВ — напряжением переменного тока $0,7U_0$. После прокладки перед вводом линии в эксплуатацию каждая фаза должна выдержать в течение 15 мин испытание напряжением постоянного тока равным $4U_0$ или переменного тока $1,73U_0$.

В. Газонаполненные кабели

В газонаполненных кабелях чистый и сухой газ (обычно азот) под давлением вводится в изоляцию или действует на изоляцию через оболочку (мембрану).

По давлению газа газонаполненные кабели можно разделить на кабели высокого (1,2—1,5 МПа), среднего (0,3—0,6 МПа) и низкого (0,15—0,20 МПа) давления.

В Советском Союзе ограниченное применение нашли трехжильные газонаполненные кабели на напряжение 10 кВ, небольшая линия эксплуатируется также при напряжении 35 кВ. В США, Японии, ФРГ и других странах нашли применение газонаполненные кабели в стальных трубах (рис. 1-11). Давление газа (1,4—1,5 МПа) на изоляцию передается через пластмассовую оболочку, выполняющую здесь роль мембраны.

Перспективным является применение вместо бумажной изоляции синтетических пленок с повышенными электроизоляционными свойствами. Это тем более важно, что электрическая прочность газонаполненных кабелей значительно ниже, чем маслонаполненных, и, кроме того, их изоляция менее стабильна, так как зависит от давления газа и температуры.

В последнее время большое внимание уделяется высоковольтным кабелям с изоляцией из сжатого газа — азота или элегаза (SF_6). В частности, значительные работы в этой области проводятся в США и Японии, а также в нашей стране.

В качестве примера приведем следующие конструкции таких кабелей. Токосоводящая жила диаметром 120—150 мм устанавливается в центре трубы из нержавеющей стали или алюминия с внутренним диаметром 332—445 мм и укрепляется с помощью фарфоровых или эпоксидных изоляторов. Давление элегаза составляет 0,3—0,5 МПа. Передаваемая мощность у этих кабелей при рабочем напряжении 345 кВ и при максимальной напряженности электрического поля у токосоводящей жилы около 3—3,5 кВ/мм может достигать 2000 МВ·А.

Нагрузки этих кабелей существенно зависят от удельного теплового сопротивления земли, в которой прокладываются кабели. В этом отношении желательно, чтобы грунт имел удельное тепловое сопротивление не более 0,8—1,0 °С·м/Вт.

При прокладке алюминиевых труб необходима надежная защита их от электролитической коррозии. В частности, для этой цели предусматривается катодная защита (отрицательный потенциал на алюминиевой трубе равен 0,4 В). В последнее время имеются предложения пропитывать элегазом наложенную на токосоводящую жилу полиэтиленовую изоляцию. Для этого элегаз под давлением 0,3—0,5 МПа вводится в токосоводящую жилу и отсюда постепенно проникает в полиэтилен, значительно повышая его электроизоляционные свойства.

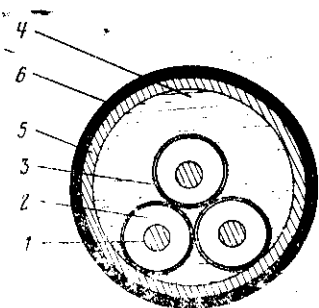


Рис. 1-11. Газонаполненный кабель в стальной трубопроводе.

1 — токосоводящая жила; 2 — изоляция; 3 — пластмассовая оболочка; 4 — газ; 5 — стальная труба; 6 — защитный покров.

Г. Кабели высокого напряжения постоянного тока

Эти кабели представляют большой интерес при передаче электроэнергии на значительное расстояние. В кабелях переменного тока в этом случае допустимая нагрузка значительно снижается из-за дополнительных потерь от емкостного тока и потерь в металлических частях конструкции кабеля.

В самом деле, емкостной ток в кабелях переменного тока

$$I_C = U\omega C l,$$

где C — емкость кабеля, Ф/км;

U — фазное напряжение, В;

ω — угловая частота, 1/с;

l — длина кабельной линии, км;

I_C — ток, А.

У кабелей переменного тока напряжением 220 и 500 кВ емкостной ток

$$I_{C,220} \approx 10l \text{ и } I_{C,500} \approx 22,7l.$$

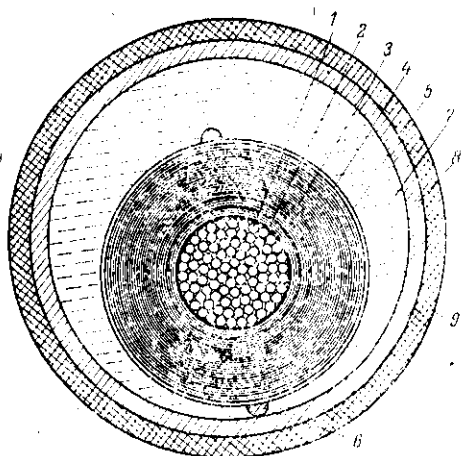


Рис. 1-12. Кабель постоянного тока на напряжение ± 400 кВ. 1 — токопроводящая жила; 2 и 4 — экраны из лент металлизированной бумаги; 3 — изоляция из бумаг разной толщины; 5 — медная перфорированная лента; 6 — проволока скольжения; 7 — масло; 8 — стальной трубопровод; 9 — антикоррозионный покров.

Таким образом, при длине линии 30—40 км емкостный ток близок к максимально допустимому току кабеля.

При использовании постоянного тока допустимая длина кабельной линии будет определяться в основном потерями в токопроводящей жиле. Пропитанная бумажная изоляция при постоянном напряжении работает в более легких условиях из-за благоприятного распределения напряженностей электрического поля между бумагой и масляными пленками и меньшей интенсивности процесса ионизации. Поэтому электрическая прочность изоляции кабеля при постоянном напряжении значительно выше, чем при переменном напряжении. В связи с этим кабели постоянного тока на напряжение ± 200 кВ обычно изготавливают с вязкой пропиткой при толщине изоляции 12—14 мм. 250—300 кВ считаются предельными напряжениями для таких кабелей. Применение вязкой пропитки для кабелей более высокого напряжения практически невозможно из-за значительного возрастания требуемой толщины изоляции; при таких напряжениях целесообразно применение кабелей маслonaполненного типа. На рис. 1-12 приведена конструкция кабеля постоянного тока на напряжение ± 400 кВ в стальном трубопроводе. Толщина изоляции этого кабеля, которая находится под повышенным давлением масла, около 20 мм.

1-6. КРИОГЕННЫЕ (КРИОРЕЗИСТИВНЫЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ) КАБЕЛИ

Криорезистивные кабели работают при температуре токопроводящей жилы в пределах 20 (температура жидкого водорода) — 77 К (температура жидкого азота). При таких температурах (в особенности при 20 К) электрическое сопротивление меди и алюминия резко снижается. Особенно сильное снижение электрического сопротивления наблюдается у металлов повышенной чистоты. В качестве

примера укажем, что при 20 К у алюминия высокой чистоты ($Al \geq 99,99\%$) электрическое сопротивление снижается почти в 500 раз по сравнению с сопротивлением при 20 °С.

Примерная конструкция гибкого криорезистивного кабеля приведена на рис. 1-13, а на рис. 1-14 — конструкция кабеля трубчатого типа. Гибкие кабели можно изготовлять значительной длины, так как отдельные фазы можно затягивать в трубу большими отрезками. Трубчатые жилы во второй конструкции должны стыковаться секциями длиной по 12—18 м и здесь неизбежна установка большого количества сильфонов. Суперизоляция, которая состоит из тонких металлизированных пластмассовых лент, должна работать устойчиво в условиях очень высокого вакуума (остаточное давление 1—10 мПа).

Чтобы успешно отводить тепло из кабеля, криогенная жидкость должна циркулировать вдоль кабеля, при этом нужно избегать кипения жидкости (например, для жидкого азота при 400 К), так как в этом случае возможно снижение качества изоляции, а сам поток жидкости может стать неравномерным. Для непрерывного охлаждения криогенная жидкость должна проходить через рефрижераторные установки и охлажденная вновь поступать в кабель.

В криорезистивных кабелях постоянного тока тепло будет возникать вследствие нагрева токопроводящих жил, трения криогенной жидкости во время движения о стенки кабеля и проникновения тепла в кабель извне. В кабелях переменного тока добавляются потери, возникающие в изоляции от вихревых токов и эффекта близости, что значительно затрудняет применение этих кабелей для передачи электроэнергии на более или менее значительные расстояния

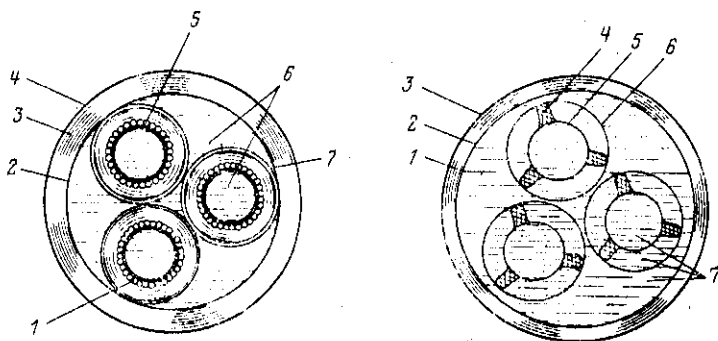


Рис. 1-13. Гибкий криорезистивный кабель.

1 — жила; 2 — внутренняя оболочка и экран; 3 — суперизоляция; 4 — внешняя оболочка; 5 — перфорированная неметаллическая труба; 6 — криогенная жидкость; 7 — защитная оболочка.

Рис. 1-14. Криорезистивный кабель трубчатого типа.

1 — суперизоляция; 2 — внутренняя оболочка; 3 — внешняя оболочка; 4 — распорки; 5 — трубчатый проводник; 6 — электрический экран; 7 — криогенная жидкость.

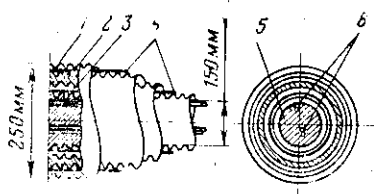


Рис. 1-15. Сверхпроводящий кабель.

1 — вакуум; 2 — жидкий азот; 3 — вакуум; 4 — суперизоляция; 5 — гелий; 6 — жила из сверхпроводящего материала.

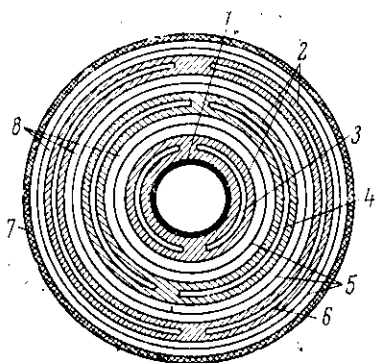


Рис. 1-16. Кабель со сверхпроводящей жилой из ниобиевой фольги.

1 — жила из ниобиевой фольги; 2 — кольцевые охлаждающие рубашки; 3 — жидкий гелий (4 К); 4 — жидкий водород (20 К); 5 — радиационные экраны из алюминия с высокой отражательной способностью; 6 — жидкий азот (77 К); 7 — изоляция; 8 — вакуум.

очень малое сечение, благодаря чему вихревые токи в жиле будут весьма незначительными. Охлаждение кабеля производится с помощью жидкого азота, водорода и гелия, причем каждый охладитель протекает по кольцевому каналу. Возврат охладителя может осуществляться либо по второму каналу, либо по другому кабелю. Каналы расположены на различных расстояниях от оси кабеля в зависимости от температуры охлаждающей жидкости.

Помимо ниобиевой фольги в сверхпроводящих кабелях могут быть использованы и такие материалы, как сплавы Nb-Zr , Nb-Ti , Nb_3Sn . Для практического внедрения сверхпроводящих кабелей необходимо решение ряда сложных вопросов. В частности, нужно создать устройства на концах сверхпроводящих линий (концевые муфты, выводы) для перехода из сверхпроводящего в нормальное резистивное состояние.

Дело в том, что в этом случае очень сильно возрастают расходы на установку и эксплуатацию рефрижераторных устройств. На постоянном токе эти кабели могут экономично передавать мощность примерно 1000 МВт и более на значительное расстояние.

Основную часть одной из конструкций сверхпроводящего кабеля (рис. 1-15) составляют четыре concentrically расположенные трубы. В центральной трубе помещаются токопроводящие жилы, которые охлаждаются жидким гелием. На определенном расстоянии от центральной трубы с помощью изоляционных прокладок устанавливаются еще три трубы, причем между центральной и второй трубой создается высокий вакуум, а между второй и третьей трубами прокачивается жидкий азот. Между третьей и четвертой трубой опять создается высокий вакуум (остаточное давление около 1 мПа). Здесь же размещается суперизоляция. Примерные диаметры внутренней трубы 150 и наружной 250 мм.

На рис. 1-16 приведена конструкция сверхпроводящего кабеля с жилой из ниобиевой фольги с трехступенчатым охлаждением. Ниобиевая фольга располагается параллельно магнитному полю и имеет

1.7. КАБЕЛИ С НАТРИЕВЫМИ ЖИЛАМИ

Использование натрия в качестве проводникового материала определяется экономическими соображениями. Удельное электрическое сопротивление натрия при 20°C составляет $48,8 \text{ нОм}\cdot\text{м}$, а его плотность 972 кг/м^3 .

Стоимость натрия значительно меньше стоимости меди и алюминия. Так, в США натрий стоит в 2,3 раза меньше, чем алюминий, и в 6,8 раза меньше, чем медь. Поэтому применение натрия в качестве материала для токопроводящих жил дает значительный экономический эффект.

В связи с высокой химической активностью натрия на воздухе и при взаимодействии с водой требуется надежная защита натриевых жил от воздействий влаги. Поэтому кабели с жилами из натрия в оплетке производятся путем экструзии полиэтиленовой трубки, которая одновременно заполняется расплавленным натрием. Температурный коэффициент линейного расширения натрия близок к коэффициенту расширения полиэтилена, и поэтому можно избежать воздушных включений у жилы при изготовлении кабеля. Пробой полиэтиленовой изоляции у кабелей с натриевой жилой обычно происходит при напряжении на 20—25% выше, чем у таких же кабелей с медными и алюминиевыми жилами.

Кабели с натриевыми жилами имеют значительно меньшую массу по сравнению с другими кабелями и большую гибкость, что облегчает их монтаж. Они обладают повышенной стойкостью к токам короткого замыкания, так как натрий плавится при $97,8^{\circ}\text{C}$ и обладает большими теплоемкостью и скрытой теплотой плавления. Поэтому при достижении температуры плавления он сохраняет ее сравнительно длительное время, пока не расплавится вся жила.

Отдельными испытаниями показано, что при образовании в полиэтиленовой оболочке небольших отверстий или при загорании кабеля с конца наблюдается эффект самозатухания вследствие образования пленок из окислов или карбонатов натрия. Однако широкое использование этих кабелей затруднено, что связано с выполнением надежных соединений и оконцеваний натриевых жил и обеспечением безопасной эксплуатации (химическая активность натрия очень высока).

1.8. КАБЕЛИ И ПРОВОДА С ПЛАСТМАССОВОЙ И РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

А. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией

Применение пластмассовой изоляции упрощает технологию изготовления силовых кабелей и дает возможность экономить значительное количество свинца, так как обычно эти кабели изготавливаются без металлических оболочек.

Повышение нагревостойкости полиэтиленовой изоляции достигается применением «сшитого» (вулканизируемого) полиэтилена, который допускает длительный нагрев до 90°C и кратковременный до $130\text{—}135^{\circ}\text{C}$.

В США и Франции находятся в эксплуатации кабели с полиэтиленовой изоляцией на напряжения 20—70 кВ. Кроме того, в США, ФРГ и некоторых других странах испытываются кабели с полиэти-

леновой изоляцией на напряжения 110—138 кВ, а во Франции и Японии даже на 225 кВ.

На одном из участков ЛЭП 115 кВ фирма Пенсильвания Электрик (США) взамен воздушной линии проложила в земле кабель с алюминиевой жилой сечением 460 мм², с изоляцией из «сшитого» полиэтилена толщиной 25,4 мм. Кабель имеет экраны из полупроводящего полиэтилена поверх токопроводящей жилы и изоляции и обмотку снаружи двумя медными лентами толщиной 0,127 мм. Наружный диаметр этого кабеля равен 95 мм.

Изоляция высоковольтных кабелей обычно изготавливается из полиэтилена малой плотности, так как полиэтилен высокой плотности помимо худших электроизоляционных свойств обладает повышенной жесткостью и худшей технологичностью, поэтому при выпрессовании его значительной толщиной трудно получить изоляцию без воздушных включений.

Отечественной промышленностью силовые кабели с медными и алюминиевыми жилами и с полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляцией серийно выпускаются на напряжение до 10 кВ и в опытно-порядке (только с полиэтиленовой изоляцией) на напряжение 20—35 кВ.

В основу маркировки указанных кабелей положен следующий принцип: первая буква А указывает, что применена алюминиевая жила, медные жилы обычно не маркируются. Следующая буква В свидетельствует о наличии поливинилхлоридной оболочки, далее буквы П и В характеризуют изоляцию соответственно из полиэтилена или поливинилхлорида. Буква О указывает, что кабель имеет отдельно экранированные и ошлангованные жилы. Тип защитных покровов и брони, как и в силовых кабелях с пропитанной бумажной изоляцией, обозначается буквами Б, БГ, Г и т. д.

Кабели на напряжение 6 кВ имеют экраны поверх изоляции и на большее напряжение — экраны и по жиле, и по изоляции. Эти экраны выполняются из полупроводящего полиэтилена или поливинилхлорида в зависимости от материала изоляции.

Поливинилхлоридные шланги толщиной 2,0—2,6 мм предназначаются для защиты кабеля от механических повреждений и воздействия влаги. Кабели напряжением 1 и 6 кВ имеют общую поливинилхлоридную оболочку, кабели больших рабочих напряжений — такую оболочку поверх каждой экранированной жилы (ПОВБ, АПОВБ).

Примерная толщина изоляции для кабелей разных напряжений:

Напряжение, кВ	1	6	10	20	35
Толщина изоляции, мм	1,6—2,0	3,5	5,5	7,0	12

Поливинилхлоридный пластикат, как это будет подробно показано ниже, уступает по электроизоляционным свойствам полиэтилену. Поэтому у нас кабели на напряжение выше 6 кВ с этой изоляцией не изготавливаются. Наиболее широкое распространение получили кабели на напряжение до 1 кВ. В частности, ГОСТ 11160-65 предусматривает выпуск силовых кабелей с алюминиевыми жилами и пластмассовой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке напряжением 660 В двух марок: АВВ (с поливинилхлоридной изоляцией) и АВП (с полиэтиленовой изоляцией), с сечением токопроводящих жил 2,5—50,0 мм² и с толщиной жилой изоляции 1,0—1,4 мм. В готовом виде эти кабели, которые в основном предназначаются

для сельского хозяйства, должны выдерживать в течение 5 мин напряжение переменного тока 2000 В, а после прокладки — в течение 10 мин напряжение 3500 В постоянного тока. Сопротивление изоляции кабелей марки АВВ при 65 °С должно быть не менее 0,05 ГОм·м, и у кабелей АВП не менее 50 ГОм·м.

У кабелей с полиэтиленовой изоляцией на более высокие напряжения сопротивление изоляции при 20 °С должно быть не менее 100 ГОм·м и при 65 °С не менее 30 ГОм·м, а у кабелей с поливинилхлоридной изоляцией соответственно не менее 30 и 0,05 ГОм·м.

Электрическая прочность кабелей с полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляцией примерно одна и та же при одинаковой толщине изоляции. Эти кабели должны иметь следующую толщину изоляции:

Напряжение, кВ	1	6	10
Толщина изоляции, мм	1,0—2,0	3,5	5,5

Длительный нагрев полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляции не должен превышать 65—70 °С.

Б. Силовые кабели с резиновой изоляцией

Кабели с резиновой изоляцией обладают повышенной гибкостью, однако по электроизоляционным свойствам они существенно уступают кабелям с пропитанной бумажной и с пластмассовой изоляцией. Одной из основных причин пробоя кабелей с резиновой изоляцией является разрушение этой изоляции озоном, возникающим при ионизации воздушных включений.

Кроме того, у изоляционных резин наблюдается с течением времени значительное снижение эластичности и других физико-механических и электроизоляционных свойств. Старение резиновой изоляции происходит под воздействием различных факторов (повышенная температура, наличие озона, воздействие света и т. п.) и является в основном следствием окислительной деструкции содержащегося в резине каучука.

Перспективным является применение для изоляционных резин бутилкаучука, обладающего повышенной влагостойкостью, озоностойкостью и стойкостью к перегревам при токах короткого замыкания. В этом отношении представляет интерес опыт Японии, где уже изготавливаются силовые кабели с резиновой изоляцией на основе бутилкаучука на напряжение до 30 кВ.

Французская фирма Трефиметекс изготавливает одножильные кабели с резиновой изоляцией на бутилкаучуке на напряжения до 17 кВ. Кроме того, в последнее время в кабельной промышленности США, Италии, Японии и некоторых других стран изготавливаются силовые кабели на напряжение 0,6—30 кВ с этиленпропиленовой резиновой изоляцией.

В СССР кабели с резиновой изоляцией изготавливаются для неподвижной прокладки в сетях переменного тока напряжением 660 В (или 1000 В постоянного тока), а также на напряжение 3 и 6 кВ постоянного тока. Кабели на напряжение 10 кВ постоянного тока стандартами не предусматриваются, так как они изготавливаются у нас в очень ограниченном количестве. Кабели напряжением 660 В переменного тока могут изготавливаться с медными или алюминиевыми жилами сечением 1—300 мм², с количеством последних 1, 2 и 3.

Кабели на более высокое напряжение изготавливаются только одножильными, с жилами сечением 1,5—500 мм².

Для изоляции всех этих кабелей применяется резина типа РТИ-1 (см. гл. 8). Толщина изоляции кабелей в зависимости от сечения токопроводящих жил должна быть в пределах:

Напряжение, кВ	0,66	3,	6
Толщина изоляции, мм	1,0—2,8	1,8—3,8	3,0—4,0

Кабели с резиновой изоляцией могут изготавливаться с поливинилхлоридной оболочкой, бронированные двумя стальными лентами, с наружным покровом (марки АВРБ и ВРБ) и без него (АВРБГ и ВРБГ). Аналогичные конструкции выпускаются с оболочкой из негорючей (наиритовой) резины (марки АНРБ, НРБ, АНРБГ и НРБГ). Кроме того, часть кабелей с резиновой изоляцией изготавливается и в свинцовой оболочке (марки АСРБ и СРБ и др.). В готовом виде кабели в течение 5 мин испытываются в зависимости от номинального напряжения переменным напряжением 6000—10 000 В.

В. Шланговые кабели [кабели в резиновой оболочке]

Эта группа кабелей, применяемых в различных областях горно-рудной промышленности, а также для мелиоративных и строительных работ, весьма многочисленна. Ниже приводятся основные сведения только о наиболее важных кабельных изделиях этой группы.

Кабели для землеройных машин. Основную категорию здесь составляют гибкие кабели с медными жилами для работы в сетях с заземленной нейтралью напряжением 6000 В. Маркировка, наименование, тип изоляции и основные области и условия применения приведены в табл. 1-4. Кабели марок КШВГ и КШВГМ могут изготавливаться с сечением основных жил 3×10 — 3×150 мм² и заземляющих жил 1×6 — 1×50 мм². Кабели марок КШВГД и КШВГДМ изготавливаются без заземляющих жил сечением 3×25 — 3×95 мм². Толщина изоляции у токопроводящих жил всех этих кабелей составляет 4,0 мм, толщина внутреннего и наружного полупроводящих экранов 0,6—1,0 мм. Толщина изоляции заземляющих жил не менее 1,2 мм. Экран из полупроводящей резины накладывается поверх токопроводящих жил и поверх изоляции, причем наружный полупроводящий экран дополнительно покрывается оплеткой из медной луженой проволоки диаметром 0,3 мм. Все жилы скручиваются вокруг круглого сердечника из вулканизированной резины, направление скрутки — правое.

Поверх скрученных жил накладывается двухслойная резиновая оболочка, внутренний слой толщиной 3 мм и наружный 5—6 мм. Между слоями оболочки предусматривается обмотка из прорезиненной ткани. В основном все эти кабели предназначаются для работы при номинальном напряжении 6000 В. Изолированные жилы после 6 ч пребывания в воде, а готовые кабели — в воздухе должны выдерживать в течение 5 мин испытание напряжением переменного тока 15 кВ. Сопротивление изоляции при 20 °С должно быть не менее 100 ГОм·м.

Отдельные партии таких кабелей выпускаются также для работы при напряжении 3000 В.

Шахтные кабели. Для подачи электроэнергии к врубовым машинам, транспортерам и другим механизмам применяются экраны-

Таблица 1-4

Маркировка, наименование и области применения кабелей для землеройных машин

Маркировка	Наименование кабеля и характеристика	Область применения
КШВГ	Высоковольтный гибкий, с резиновой изоляцией, в резиновой оболочке	Для экскаваторов и других передвижных механизмов, работающих при температуре окружающей среды от -40 до $+50^{\circ}\text{C}$
КШВГМ	Высоковольтный гибкий, с резиновой изоляцией, в резиновой оболочке, морозостойкий	Для экскаваторов и других передвижных механизмов, работающих при температуре окружающей среды от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$ и в состоянии стационарной прокладки до -60°C
КШВГД	Высоковольтный гибкий, с резиновой изоляцией, в резиновой оболочке, дражный	Для драг и других наводных сооружений, работающих при температуре окружающей среды от -40 до $+50^{\circ}\text{C}$
КШВГДМ	Высоковольтный гибкий, с резиновой изоляцией, в резиновой оболочке, дражный, морозостойкий	Для драг и других наводных сооружений, работающих при температуре окружающей среды от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$

рсовые гибкие шахтные кабели с резиновой изоляцией и в резиновой негорючей оболочке марки ГРШЭ. Сечение основных жил у этих кабелей может быть в пределах $3 \times 4 - 3 \times 70 \text{ мм}^2$, заземляющих жил $1 \times 2,5 - 1 \times 10 \text{ мм}^2$ и жил управления $3 \times 1,5 - 3 \times 4 \text{ мм}^2$. Кабели предназначены для работы при номинальном напряжении на основных жилах 660 В и на жилах управления не более 127 В при температуре окружающей среды от -30 до $+50^{\circ}\text{C}$. Длительно допустимая температура на токопроводящих жилах должна быть не более 75°C . Толщина изоляции основных жил в зависимости от их сечений должна быть в пределах 1,6—2,2 мм, а жил управления 1 мм, толщина резиновой оболочки — в пределах 4,0—4,5 мм. Экранированные основные жилы должны быть испытаны напряжением постоянного тока 4000 В в течение 5 мин. После изготовления кабели также в течение 5 мин должны выдерживать испытание напряжением переменного тока: для основных жил 2500 В и для жил управления 1500 В. Кроме того, кабели должны выдерживать 2000—3000 циклов испытаний на механическую прочность с деформациями изгиба и кручения.

Для ручного электроинструмента применяются гибкие шахтные кабели марок ШРБ и ШРБЭ (бурильные, экранированные). Они изготавливаются 5-жильными с сечением каждой жилы 1,5—6,0 мм² и предназначены для присоединения бурильного электроинструмента

к сети переменного тока напряжением до 127 В. Кабели могут также работать при напряжении 220 В в сетях с изолированной нейтралью. Допустимая температура окружающей среды от -30 до $+50^{\circ}\text{C}$. Изолированные жилы испытываются на аппарате сухого испытания переменным напряжением 6000 В, а готовые кабели должны выдерживать испытания между жилами напряжением переменного тока 1500 В в течение 5 мин. Кроме того, кабели должны выдерживать 15 000—22 000 циклов испытаний на механическую прочность с деформациями изгиба и кручения.

Кабели для нефтяной промышленности и геофизических работ. Из этой группы кабелей большое значение имеют круглые трехжильные кабели с резиновой изоляцией в нефтестойкой резиновой оболочке и броне (КРБК). Эти кабели применяются для питания бестанговых погружных насосов напряжением 1000 В. Плоские кабели (КРБП) предназначаются для соединения питающего кабеля КРБК с электродвигателем насоса.

Для питания электробуров напряжением 1500—2000 В применяются круглые трехжильные кабели с резиновой изоляцией в резиновой оболочке (КРЭК и КТШЭ).

Кабели КРБК и КРБП могут работать на глубине до 1200 м в смеси нефти и воды при 90°C и давлении до 10 МПа. Токопроводящие жилы кабеля КРБК изготавливаются сечением 10—30 мм². Они скручиваются из семи мягких медных проволок с герметизацией промежутков между проволоками резиной. Жилы кабеля марки КРБП состоят из одной или семи проволок (с герметизацией жилы резиной). Жильная изоляция этих кабелей (толщиной 1,8—2,0 мм для кабелей КРБК и 1,4 мм для кабелей КРБП) изготавливается из резины марки РТИ-1, оболочка — из нефтестойкой резины марки РШН-2, причем толщина ее составляет 2,0—2,5 мм для кабелей КРБК и 0,9 мм для кабелей КРБП.

Поверх резиновой оболочки накладываются двухслойная обмотка из лакоткани и хлопчатобумажная оплетка, которая пропитывается противогнилостным составом.

Кабели КРБК имеют гибкую броню, которая изготавливается из профилированной стальной оцинкованной ленты толщиной 0,5 мм и накладывается обмоткой с перекрытием на 30%. Кабель КРБП обматывается стальной оцинкованной или медной лентой толщиной 0,5 и шириной 20 мм.

Готовые кабели испытываются напряжением переменного тока 3000 В в течение 5 мин (между жилами и между жилами и броней). Сопротивление изоляции между жилами и броней при 20°C должно быть не менее 100 ГОм·м.

Кабели КРБК подвергаются также испытаниям на раздавливание между плитами гидравлического пресса и на герметичность давлением 4 МПа в течение 30 мин.

Основную группу кабельных изделий для геофизических работ составляют коротажные кабели. Они предназначаются для многократного спуска и подъема различных приборов, подвешенных на конце кабеля, в скважинах большой глубины. В связи с этим к этим кабелям предъявляются три основных требования: а) высокая прочность на разрыв; б) большие строительные длины и в) повышенная нагревостойкость изоляции (70 — 200°C), так как по мере углубления в скважину температура среды в ней повышается (примерно на 1°C на длине 33 м). В связи с этим коротажные кабели изготавливаются на разрывное усилие 10—60 кН (для исследования нефтяных, газо-

вых и других скважин на глубине 700—6500 м). Для работы при 70—90 °С эти кабели изготавливаются с резиновой, поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляцией. Для рабочих температур до 200 °С применяется фторопластовая изоляция. Конструктивно каротажные кабели изготавливаются трех видов: в хлопчатобумажной оплетке, резиновой оболочке (шланговые) и проволочной броне. В первых двух конструкциях несущей частью являются токопроводящие жилы, которые скручиваются из стальных проволок диаметром 0,4—0,5 мм с добавлением для повышения электрической проводимости медной проволоки диаметром 0,41—0,52 мм. В бронированных кабелях несущей частью, помимо токопроводящих (сталемедных) жил, является броня из стальных проволок диаметром 0,1—1,3 мм. Обычно в этих кабелях применяется двухслойная броня, причем внутренний пояс делается из проволок несколько меньшего диаметра, чем наружный. В зависимости от типа геологической разведки кабели изготавливаются с числом жил 1, 3 и 7. В готовом виде каротажные кабели испытываются напряжением 1000—3000 В.

Кабели гибкие общего назначения. Они предназначены для соединения различных передвижных механизмов, а также для стационарных установок при работе на напряжении до 660 В переменного тока. Кабели изготавливаются с медными и алюминиевыми жилами, с резиновой изоляцией, в обычной резиновой оболочке (КРПГ — повышенной гибкости, КРПТ и АКРПТ), а также в резиновой маслобензостойкой оболочке, не распространяющей горение (КРПТН и АКРПТН). Кроме того, изготавливаются кабели с медными жилами повышенной гибкости (КРПС и КРПСН), у которых жилы скручиваются вокруг профилированного резинового сердечника. Эти кабели предназначаются для работы в условиях, когда возможны воздействия на кабель значительных ударных и раздавливающих нагрузок и попадание на оболочку кабеля масла, бензина и других нефтепродуктов (КРПСН). Кабели с алюминиевыми жилами изготавливаются сечением 1—95 мм², кабели с медными жилами могут изготавливаться и меньших сечений.

Кабели в резиновой маслобензостойкой оболочке предназначаются для эксплуатации при температурах окружающей среды от —30 до +50 °С, в обычной резиновой оболочке от —40 до +50 °С. Кабели повышенной гибкости КРПГ, КРПС и КРПСН могут работать при температурах окружающей среды от —50 до +50 °С.

Толщина резиновой изоляции в зависимости от сечения токопроводящих жил должна быть в пределах 1,0—1,8 мм, а толщина оболочек 2,0—5,0 мм.

Изолированные жилы после 6 ч пребывания в воде и готовые кабели на воздухе должны выдерживать в течение 5 мин испытание напряжением переменного тока 2,5 кВ.

Г. Кабели судовые

При конструировании этих кабелей учитывается, что окружающая температура при эксплуатации может быть в пределах от +40 до —30 °С для подвижной и до —40 °С для неподвижной прокладки при относительной влажности $98 \pm 2\%$.

Все судовые кабели, которые изготавливаются преимущественно с резиновой изоляцией, можно разделить на три основные группы.

1. Кабели для силовых и осветительных установок для неподвижной прокладки, а также для присоединения к подвижным и пере-

носным токоприемникам. Эти кабели могут эксплуатироваться при напряжении до 690 В переменного тока частотой до 400 Гц или при напряжении постоянного тока до 1000 В.

2. Кабели для контрольных цепей и телефонной связи. Эти кабели предназначены для стационарных прокладок и могут эксплуатироваться при напряжении до 380 В переменного тока или 500 В постоянного тока.

3. Герметизированные кабели для внутрикорабельной и забортной прокладки. Эти кабели предназначены для стационарных прокладок внутри кораблей и плавучих сооружений, а также для прокладок за бортом в установках на напряжения до 690 В переменного тока или 1000 В постоянного тока. Кабели могут работать в морской воде при температуре от -2 до $+40^{\circ}\text{C}$ под гидростатическим давлением до 6 МПа и на воздухе при температуре от -40 до $+40^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности до 100%.

Кабели первой группы изготавливаются одно- и трехжильными, с медными и алюминиевыми жилами различных сечений. Все кабели второй группы имеют сечение медных токопроводящих жил 1 мм^2 , а число изолированных жил в кабеле может находиться в пределах 2—48. Кабели третьей группы изготавливаются также только с медными жилами различных сечений, причем в процессе скрутки междупроволочные пространства для герметизации токопроводящих жил заполняются составом на основе резиновой смеси или другого равноценного материала.

Толщина резиновой изоляции в зависимости от типа кабеля и сечения токопроводящих жил установлена в пределах 1,0—3,2 мм, а толщина резиновых оболочек в пределах 2,0—5,5 мм. Обычно оболочки изготавливаются из маслобензостойкой резины, не распространяющей горение. Отдельные конструкции кабелей изготавливаются в защитной оплетке из стальных оцинкованных проволок или в экранирующей оплетке из медных луженых проволок. Эти оплетки накладываются поверх резиновой оболочки.

В некоторых случаях для неподвижной прокладки на судах применяются кабели с резиновой изоляцией, в свинцовой оболочке (марка СРМ), а также кабели с полиэтиленовой изоляцией, в поливинилхлоридной оболочке.

Изолированные жилы кабелей для силовых и осветительных установок после 6 ч пребывания в воде в течение 10 мин и готовые кабели в течение 15 мин должны выдерживать испытания напряжением переменного тока 2500 В, а изолированные жилы и кабели для контрольных цепей и телефонной связи — аналогичные испытания напряжением 1500 В. Сопротивление изоляции жил готовых кабелей при 20°C должно быть не менее $100\text{ ГОм}\cdot\text{м}$.

Д. Кабели высокого напряжения для рентгеновских установок

Одной из основных конструкций здесь является кабель КВР-150, который предназначен для подвода к рентгеновской установке тока накала и выпрямленного (пульсирующего) напряжения до 150 кВ (рис. 1-17).

Кабель состоит из токопроводящей жилы сечением $1,5\text{ мм}^2$, скрученной из 19 медных проволок, резиновой изоляции, экранирующего слоя из полупроводящей резины, второй токопроводящей жи-

лы, выполненной в виде оплетки из медных луженых проволок диаметром 0,3 мм, слоя полупроводящей резины и резиновой изоляции толщиной около 10,0 мм. Поверх резиновой изоляции накладывается слой полупроводящей резины, обмотка полупроводящей тканевой лентой, оплетка медными лужеными проволоками и поливинилхлоридная оболочка толщиной около 1,0 мм. Наружный диаметр кабеля примерно 34—36 мм. Изолированная жила для тока накала испытывается в течение 1 мин переменным напряжением 500 В. Готовые кабели испытываются в течение 15 мин напряжением переменного тока 60 кВ.

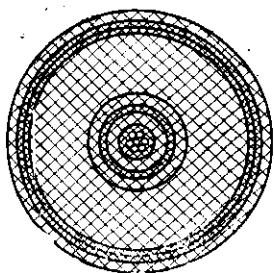


Рис. 1-17. Рентгеновский кабель марки КВР-150.

Кроме того, изготавливаются рентгеновские кабели ЗКВР-75/55, которые предназначаются для рентгеновских аппаратов с двухфокусными трубками, работающими при выпрямленном (пульсирующем) напряжении 75 кВ или при переменном напряжении 55 кВ.

Такой кабель имеет три токопроводящих жилы: две из них сечением 1,5 мм² изолированы резиной типа РТИ-1 толщиной около 0,6 мм, скручены между собой с заполнением резиной до круглой формы и оплетены медной луженой проволокой диаметром 0,15 мм. Оплетка поверх двух скрученных жил является третьей токопроводящей жилой для подвода к аппарату высокого напряжения. В остальном в конструкции кабеля предусмотрены те же элементы, что и в кабеле КВР-150.

Жилы для подачи тока накала испытываются так же, как и у кабеля КВР-150, готовые кабели испытываются выпрямленным (пульсирующим) напряжением 90 кВ или переменным напряжением 45 кВ.

Высоковольтный кабель для электронных микроскопов (КВЭМ-110) предназначается для работы при напряжении постоянного тока до 110 кВ. Этот кабель также имеет три токопроводящие жилы — две для накала и одну для подачи высокого напряжения.

Внутренние жилы для накала сечением 1,5 мм² изолируются лентами из фторопласта-4 (толщина изоляции примерно 0,6 мм), далее накладывается оплетка медными лужеными проволоками диаметром 0,15 мм (вторая жила), обмотка лентами из фторопласта-4 (толщина изоляции 1,2 мм) и вновь оплетка из медных луженых проволок (третья жила). Далее следует слой полупроводящей резины, резиновая изоляция толщиной 10 мм и т. д., как у кабеля КВР-150. Наружный диаметр кабеля КВЭМ-110 примерно такой же, как и кабеля КВР-150. Готовый кабель испытывается в течение 10 мин напряжением переменного тока 65 кВ.

Е. Установочные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией

Ассортимент этих проводов весьма обширен. Основные типы проводов с резиновой изоляцией и преимущественные области их применения приведены в табл. 1-5. Провода ПР и ПРГ изготов-

Таблица 1-5

Установочные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией

Марка кабеля	Наименование провода, характеристика изоляции и покрытия	Область применения
ПР, АПР	Провод с медной или алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, в оплетке, пропитанной противогнилостным составом, одножильный	Для неподвижной прокладки на роликах и изоляторах в сухих и сырых помещениях
ПРЛ	Провод с резиновой изоляцией, в оплетке, покрытой лаком, одножильный	Для монтажа панелей
ПРГ	Провод гибкий, с резиновой изоляцией, в оплетке, пропитанной противогнилостным составом, одножильный	Для неподвижной прокладки, где требуется повышенная гибкость провода при монтаже, и присоединения подвижных частей электрических машин в сухих и сырых помещениях
ПРГЛ	Провод гибкий, с резиновой изоляцией, в оплетке, покрытой лаком, одножильный	Для монтажа панелей, где требуется повышенная гибкость провода при монтаже, и присоединения подвижных частей электрических машин
ПРД	Провод гибкий, с резиновой изоляцией, в непропитанной оплетке, двухжильный	Для прокладки на роликах в сухих помещениях
ПРДШ	Провод гибкий, с резиновой изоляцией, в оплетке из шелка лавсан, двухжильный	Для прокладки на роликах в сухих помещениях

ляются сечением 0,75—240 мм² на номинальное напряжение переменного тока 660 В (или на 1000 В постоянного тока) и на 3000 В. Провода ПРЛ (сечением 0,75—6,0 мм²) и ПРГЛ (сечением 0,75—240 мм²) изготавливаются на напряжение переменного тока 660 В (или на 1000 В постоянного тока) и провода ПРГ и ПРДШ (сечением 0,75—6,0 мм²) с толщиной резиновой изоляции 0,6 мм изготавливаются только на напряжение 380 В. У остальных проводов в зависимости от номинального напряжения и сечения токопроводящих жил толщина резиновой изоляции (тип РТИ-2) установлена до 1,3 мм.

Провода ПРД и ПРДШ в готовом виде должны выдерживать в течение 1 мин испытание напряжением переменного тока 1000 В, приложенным между жилами. Изолированные жилы проводов на напряжение 660 В испытываются на аппаратах сухого испытания переменным током напряжением 6000—9000 В (в зависимости от толщины изоляции), а на напряжение 3000 В после 6 ч пребывания в воде в течение 5 мин переменным напряжением 6000 В.

Для осветительных и силовых цепей переменного тока на напряжение до 500 В широкое применение находят также установоч-

ные провода с одной поливинилхлоридной изоляцией толщиной 1—2 мм с медными (сечением 0,75—95 мм²) и алюминиевыми (сечением 2,5—120 мм²) жилами соответственно марок ПВ, ПВГ и АПВ.

Для открытой и скрытой прокладок осветительных сетей также на напряжение до 500 В применяются плоские провода с поливинилхлоридной изоляцией (ППВ и АППВ). Токпроводящие жилы изолируются пластиком в зависимости от сечения токопроводящих жил (0,75—6,0 мм²) толщиной 1—2 мм и разделяются ленточным основанием шириной 5 и толщиной 0,6 мм. Кроме того, выпускаются плоские установочные провода ППВС и АППВС без разделительного основания.

1-9. МОНТАЖНЫЕ ПРОВОДА

Потребность в этих проводах резко возрастает в связи с бурным развитием радиоэлектроники, вычислительной техники, автоматики, телемеханики. Во всех указанных устройствах монтажные провода применяются в весьма значительных количествах и от них зависит надежная работа многих ответственных агрегатов.

Основным материалом для изготовления токопроводящих жил монтажных проводов является мягкая медная проволока. Для жил монтажных проводов, предназначенных для работы при повышенных температурах, целесообразно применение бескислородной меди, обладающей в этих условиях большей устойчивостью. Если от токопроводящих жил требуется повышенная прочность при действии растягивающих усилий, то применяются сплавы на основе меди или в жилу добавляются проволоки из особо прочных металлов. Весьма существенное значение имеет гибкость токопроводящих жил и конструкций монтажных проводов в целом. Если гибкость проволоки F характеризовать усилием, которое необходимо для изгиба ее по скружности определенного радиуса, то она может быть выражена следующим образом:

$$F = \frac{1}{B} = \frac{1}{EI},$$

где B — жесткость проволоки;

E — модуль упругости, который для мягкой проволоки в интервале 20—300 °С может быть принят соответственно равным (0,115—0,1) 10^8 МПа;

I — момент инерции сечения проволоки;

F — усилие, 1/(МПа · мм⁴).

Для круглой проволоки диаметром d , мм,

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 \approx 0,05 d^4.$$

Таким образом, гибкость токопроводящих однопроволочных жил резко уменьшается с увеличением их диаметра. В тех случаях, когда от монтажных проводов требуется повышенная гибкость, применяются жилы, скрученные из тонких проволок. Чем меньше диаметр отдельных проволок, т. е. чем больше их число при одном и том же сечении жилы, тем больше гибкость провода. Это нетрудно показать и расчетным путем. Возьмем жилу, составленную из n проволок,

расположенных параллельно, и сравним ее с однопроволочной жилой диаметром равновеликого сечения. В этом случае

$$\frac{\pi D^2}{4} = n \frac{\pi d^2}{4}, \text{ или } d = \frac{D}{\sqrt{n}}.$$

Гибкость n параллельно расположенных проволок

$$F = \frac{1}{0,05 n d^4 E} = \frac{n}{0,05 D^4 E}, \quad (1-1)$$

т. е. многопроволочная жила будет иметь гибкость в n раз большую по сравнению с однопроволочной жилой.

Гибкость скрученных многопроволочных жил может быть несколько больше, если отдельные проволоки при изгибе будут иметь возможность перемещаться одна относительно другой. Кроме того, у расположенной по винтовой линии проволоки при изгибе один участок будет растягиваться, а следующий за ним — сжиматься, что также будет способствовать повышению гибкости скрученных жил.

Гибкость изолированных монтажных проводов в известной степени зависит также от гибкости наложенной изоляции. Жесткость конструкции изолированного провода в целом можно считать равной сумме жесткостей жилы и изоляции, т. е.

$$B_{\text{пр}} = B_{\text{ж}} + B_{\text{из}}.$$

Следовательно, гибкость изолированного провода

$$F_{\text{пр}} = F_{\text{ж}} F_{\text{из}} / (F_{\text{ж}} + F_{\text{из}}). \quad (1-2)$$

Момент инерции сечения слоя изоляции для круглых проводов можно определить с помощью уравнения

$$J_{\text{из}} = 0,05 (D_{\text{н}}^4 - d_{\text{ж}}^4), \quad (1-3)$$

где $D_{\text{н}}$ — наружный диаметр провода;

$d_{\text{ж}}$ — диаметр токопроводящей жилы.

Зная модуль упругости изоляционного материала, можно рассчитать и гибкость изоляции $F_{\text{из}}$. Резиновая изоляция имеет модуль упругости около 5—6 МПа, поливинилхлоридный пластикат около 20 МПа, полиэтилен высокого давления 150 МПа, а у полиэтилена низкого давления и у политетрафторэтилена модуль упругости может доходить до 700 МПа.

Ориентировочно можно считать, что гибкость изолированного однопроволочного провода прежде всего определяется гибкостью токопроводящей жилы. У монтажных проводов с многопроволочной жилой на гибкость провода может оказывать существенное влияние и изоляционное покрытие.

Для монтажных проводов существенное значение имеет длительная прочность токопроводящих жил в местах их пайки, так как очень часто отказы в работе многих устройств происходят именно вследствие обрыва монтажных проводов в этих местах. Особенно часто такие явления могут иметь место в аппаратуре, подвергающейся действию вибрации.

Таблица 1-6

Маркировка, наименование и номинальное рабочее напряжение монтажных проводов с волокнистой и пленочной изоляцией

Марка провода	Наружный диаметр, мм	Сечение, мм ²	Наименование провода и характеристика изоляции и покрытия	Номинальное напряжение, В
МШДЛ	0,9—1,6	0,1—0,75	Однопроволочный, с двойной обмоткой из полиамидного шелка, лакированный	220
МЭШДЛ	0,9—1,6	0,1—0,75	Однопроволочный, эмалированный, с двойной обмоткой из полиамидного шелка, лакированный	220
МГШ	0,6—0,8	0,05—0,1	Многопроволочный, в оплетке из полиамидного шелка	24
МГШЛ	0,7—1,3	0,05—0,5	Многопроволочный, с двойной обмоткой из полиамидного шелка	60
МГШДО	1,0—2,2	0,05—2,5	Многопроволочный, с двойной обмоткой и оплеткой из полиамидного шелка	127
МГШДОП	1,0—2,7	0,05—2,5	Многопроволочный, с двойной обмоткой и подклеенной оплеткой из полиамидного шелка	127
МГШДЛ	0,8—1,5	0,05—0,5	Многопроволочный, с двойной обмоткой из полиамидного шелка, лакированный	220
МГЦШП	1,7—4,7	0,2—6,0	Многопроволочный, с пленочной изоляцией, с двойной обмоткой и подклеенной оплеткой из полиамидного шелка	220
МГСЛ	1,6—2,6	0,2—1,5	Многопроволочный, в обмотке и оплетке из стекловолокна, лакированный	127
МГСЛЭ	2,2—3,2	0,2—1,5	То же экранированный	127
МГЦСЛ	2,1—4,4	0,35—4,0	Многопроволочный, с пленочной изоляцией, в обмотке и оплетке из стекловолокна, лакированный	220
МГЦСЛЭ	2,7—5,0	0,35—4,0	То же экранированный	220

Исследования показали, что длительная прочность в местах пайки зависит и от количества проволок в жиле, и от степени проникновения припоя вдоль жилы провода, так как затвердевший участок жилы способствует ускоренному ее разрушению при вибрациях. Шнуровая скрутка в этом отношении существенно уступает правильной скрутке, так как при ней припой распространяется на значительно большую длину, чем при пайке жил, скрученных правильной скруткой. Таким образом, шнуровая скрутка токопроводящих жил целесообразна для монтажных проводов, которые в эксплуатации не подвергаются вибрационным воздействиям; в противном случае целесообразна правильная скрутка.

Монтажные провода нормальной нагревостойкости можно разделить на две основные группы: 1) провода с волокнистой и пленочной изоляцией и 2) провода с пластмассовой изоляцией.

Монтажные провода с волокнистой и пленочной изоляцией. Наименование, маркировка, вид изоляции, наружные диаметры и номинальные напряжения переменного тока приведены в табл. 1-6. В качестве изоляционного материала предусматривается применение полиамидного волокна капрон. В лакированных монтажных проводах МШДЛ, МЭШДЛ и МГШДЛ вместо полиамидного волокна применяют полиэфирное волокно лавсан, отчего качество этих проводов повышается. Тот же эффект будет иметь место при использовании волокна лавсан для монтажных проводов с волокнистой изоляцией и других конструкций. Лакировка поверхности проводов повышает их электроизоляционные свойства и, кроме того, предохраняет обмотку от распускания и сползания с концов провода. Для лакировки проводов обычно применяется этилцеллюлозный лак, который дает эластичную, малогорючую и нагревостойкую (до 100—105°C) пленку. Минимально допустимое сопротивление изоляции рассматриваемых монтажных проводов приведено в табл. 1-7. Кроме того, монтажные провода на 220 В рабочего напряжения должны выдерживать в течение 1 мин 1000 В напряжения переменного тока, на 127 В — 500 В. Для остальных проводов испытательное напряжение установлено 100—300 В.

Монтажные провода с пластмассовой и резиновой изоляцией. Эти провода можно применять для эксплуатации при повышенной влажности окружающей среды, но при низких допустимых температурах, обычно от —50 до +(70—85)°C.

Таблица 1-7

Минимальное сопротивление изоляции монтажных проводов на длине 1 м

Марка	Относительная влажность воздуха, %	Сопротивление изоляции, МОм
МЭШДЛ МШДЛ, МГШДЛ, МГЦШП	95±3	1000 300
МГЦСЛ, МГЦСЛЭ МГСЛ, МГСЛЭ	80±3	200 10
МГШД, МГШДО, МГШДОП	65±3	100

Пока преимущественное применение находят монтажные провода с поливинилхлоридной изоляцией, обладающей хорошими механическими характеристиками, негорючестью и достаточной масло- и влагостойкостью. Кроме того, поливинилхлоридный пластикат имеет значительно меньший модуль упругости в сравнении с полиэтиленом. Последний, правда, обладает более высокими электроизоляционными свойствами, однако он несколько оплавляється при пайке и дает при этом значительную усадку изоляции. Эти явления можно в значительной мере устранить, если токопроводящую жилу предварительно обмотать волокнистым материалом.

Для фиксированного внутри- и межприборного монтажа электротехнических устройств широкое применение находят провода с волокнисто-пластмассовой изоляцией. Эти провода могут применяться для работы при напряжении переменного тока 380—1000 В частотой до 2000 Гц или 1500—2000 В постоянного тока. Диапазон сечений токопроводящей жилы составляет 0,08—1,5 мм².

Основными среди монтажных проводов с одноприволочной или многоприволочной жилой являются провода с обмоткой триацетатным волокном и поливинилхлоридной изоляцией (МШВ и МГШВ); экранированные (МГШВЭ) и экранированные в защитной поливинилхлоридной оболочке (МГШВЭВ). Другую группу составляют провода с изоляцией из полиэтилена высокого давления с предварительной обмоткой одно- или многоприволочной жилы триацетатным шелком или волокном лавсан, или стекловолокном (МШП, МГШП, МГШПЭ, МГСП и МГСПЭ). Все эти провода могут применяться при воздействии вибрационных нагрузок в диапазоне частот 10—2000 Гц с ускорением до 15g, а также при наличии многократных ударов с ускорением до 50g и одиночных ударов с ускорением до 2000g.

Сопротивление изоляции, пересчитанное на 1 м при 20°C, у проводов с поливинилхлоридной изоляцией должно быть не менее 20 ГОм и с волокнисто-полиэтиленовой изоляцией не менее 200 ГОм, а при 50±5°C соответственно не менее 1 и 10 ГОм.

Монтажные провода изготавливаются также с полиэтиленовой изоляцией, подвергнутой специальному облучению (МПО и МПОЭ). Эти провода изготавливаются с сечением токопроводящих жил 0,15—6,0 мм² и с толщиной изоляции 0,3—0,45 мм. Они имеют сопротивление изоляции при 20°C не менее 50 ГОм·м и при 100°C не менее 1 ГОм·м. Испытательное напряжение изоляции составляет 2000—3000 В.

Для работы в интервале от -60 до +150°C облученная полиэтиленовая изоляция комбинируется с дополнительной обмоткой волокном лавсан (МЛТП), а также с дополнительной обмоткой и оплеткой из стекловолокна (МСТПС). Провода с комбинированной облученной полиэтиленовой и волокнистой изоляцией могут работать при 150°C в течение 10 000 ч и допускают нагрев в течение 3 ч до 200°C.

В небольшом количестве изготавливаются монтажные провода с резиновой изоляцией, в хлопчатобумажной оплетке, пропитанной парафином (МР, МРП и МРГПЭ), а также в оплетке, покрытой нитроцеллюлозным или этилцеллюлозным лаком.

Большую группу составляют малогабаритные монтажные провода, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре, а также для других межприборных соединений. Эти провода изготавливаются преимущественно с полиэтиленовой изоляцией толщиной 0,20—0,25 мм и

в несколько меньшем количестве — с поливинилхлоридной изоляцией такой же толщины. Эти провода предназначены для фиксированного и гибкого монтажа и работы при напряжении до 250 В переменного тока частотой до 2000 Гц. Для изоляции обычно применяется полиэтилен низкого давления, поэтому рабочая температура для проводов устанавливается в пределах от -50 до $+85^{\circ}\text{C}$. Провода с поливинилхлоридной изоляцией обычно предназначаются для работы при напряжении до 250 В частотой до 500 Гц и 100 В при частотах до 2000 Гц и температурах от -50 до $+70^{\circ}\text{C}$. Сопротивление изоляции у проводов с полиэтиленовой изоляцией, естественно, значительно выше, чем у проводов с поливинилхлоридной изоляцией.

Монтажные провода повышенной нагревостойкостью. Эти провода изготавливаются преимущественно с изоляцией из фторопласта различных типов (фторопласт-4, 4Д, 4ОIII и т. п.), которые допускают эксплуатацию проводов в интервале от -90 до $+(200-250)^{\circ}\text{C}$. Часть таких проводов изготавливается обмоткой медных никелированных или посеребренных жил лентами из фторопласта-4 с последующей термообработкой, а затем оплеткой стекловолокном с пропиткой кремнийорганическим лаком или лавсановым волокном (ПТЛУ-200 и пр. сечением $0,35-1,5\text{ мм}^2$).

В некотором количестве изготавливаются малогабаритные нагревостойкие монтажные провода (неэкранированные ФД) и экранированные (ФДЭ). Эти провода имеют толщину изоляции из фторопластовых лент в пределах $0,10-0,14\text{ мм}$ и предназначены для эксплуатации при напряжении до 100 В переменного тока частотой до 5000 Гц или 150 В постоянного тока в интервале от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$. Эти провода стойки против многократных изгибов и обладают высокой прочностью против вибрационных и ударных нагрузок, выдерживая испытания с ускорениями соответственно до 20 г и 150 г . Эти провода негорючи и имеют высокую стойкость против воздействия масла, бензина, морского тумана и т. п. Кроме того, они могут работать определенное время при резко пониженном атмосферном давлении (до 1 мПа).

1-10. КАБЕЛИ СВЯЗИ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

Кабели связи в зависимости от области применения могут быть подразделены на магистральные, междугородные, внутриобластные (зональные), сельские, городские, подводные, а также кабели для соединительных линий и вставок. Отдельную группу составляют радиочастотные кабели для питания антенн радиостанций и монтажа радиотехнических установок.

По спектру передаваемых частот кабели связи подразделяются на низкочастотные (работающие в диапазоне тональных частот) и высокочастотные (12 кГц и выше).

По конструкции кабели связи можно подразделить на симметричные и коаксиальные (в зависимости от взаимного расположения проводов, цепей связи); однородные и комбинированные (в зависимости от состава элементов, образующих кабель); на кабели парной, четверочной (звездной), повивной и пучковой скрутки (в зависимости от вида скрутки изолированных проводников в группы).

Наконец, кабели подразделяют по виду изоляции и оболочек.

Магистральные и междугородные кабели маркируются буквой М. Буквы КМ означают коаксиальные магистральные. Телефонным городским кабелям присваивается буква Т. Если кабель имеет стиролфлексную (полистирольную) изоляцию, то в марку кабеля дополнительно вводится буква С, если полиэтиленовую изоляцию, то букву П; в марках кабелей с алюминиевой оболочкой еще добавляется буква А, а со стальной — буква С.

В зависимости от вида защитных покровов кабели маркируют буквами: Г — голые (по свинцовой оболочке), Б — с ленточной броней и К — с круглой проволоочной броней. Наличие наружной пластмассовой оболочки характеризуется буквой П (полиэтиленовая) или В (поливинилхлоридная).

Междугородные симметричные кабели в свинцовой оболочке с кордельно-бумажной изоляцией имеют марки МКГ, МКБ, МКК, с кордельно-стирофлексной изоляцией — МКСГ, МКСБ, МКСК, с полиэтиленовой изоляцией — МКПГ, МКПБ, МКПК. Симметричные кабели со стиролфлексной изоляцией в алюминиевой оболочке имеют марки МКСАП, МКСАПБ, МКСАПКП. Симметричные кабели в стальной оболочке имеют марку МКССП.

Коаксиальные магистральные кабели имеют марки КМГ, КМБ, КМК. Комбинированные коаксиальные магистральные кабели имеют в марках, кроме того, дробный индекс, характеризующий соответственно число больших и малых пар (например: КМБ-8/6, КМБ-6/4). Малогабаритные коаксиальные кабели в пластмассовой оболочке имеют марки МКТП, МКТПБ, в свинцовой оболочке МКТС, МКТСБ и в алюминиевой оболочке и полиэтиленовом шланге МКТСАП.

Однокоаксиальные кабели с пористо-полиэтиленовой изоляцией с алюминиевым внешним проводом для внутриобластной связи имеют марки ВКПАП и ВКПАПт. (Индекс «т» означает наличие встроенного троса).

Городские телефонные кабели парной скрутки в свинцовой оболочке маркируются буквами ТГ, ТБ, ТК. Городским телефонным кабелям с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке присвоены марки ТПП и ТППБ (полиэтилен) и ТПВ и ТПВБ (поливинилхлорид).

Кабели звездной скрутки для соединительных линий и узлов связи обозначаются марками ТЗГ, ТЗБ (с кордельно-бумажной изоляцией) и ТЗПП, ТЗППБ (с пористо-полиэтиленовой изоляцией). Кабели в алюминиевой оболочке с защитой из поливинилхлоридных лент имеют марки ТЗАВГ и ТЗАВБ.

В конце марки указывается число проводников и их диаметр. Так, например, марка МКСБ-7×4×1,2 означает: междугородный кабель с кордельно-стирофлексной изоляцией, бронированный стальными лентами. Кабель содержит семь четверок звездной скрутки с однопроволочными жилами диаметром 1,2 мм.

Кабели сельской связи с полиэтиленовой изоляцией и в пластмассовой оболочке имеют марки КСПП, КСПБ, КСПВБ: одночетверочные и четырехчетверочные с диаметром жил 0,9 мм и одночетверочные с диаметром жил 1,2 мм. Однопарные кабели маркируются ПРВПМ и ПРВПА. Буква А означает наличие алюминиевых жил вместо медных.

Подводные коаксиальные кабели, предназначенные для прокладки в морях и крупных водных бассейнах, имеют марки КПК, КПЭБ, КПЭК.

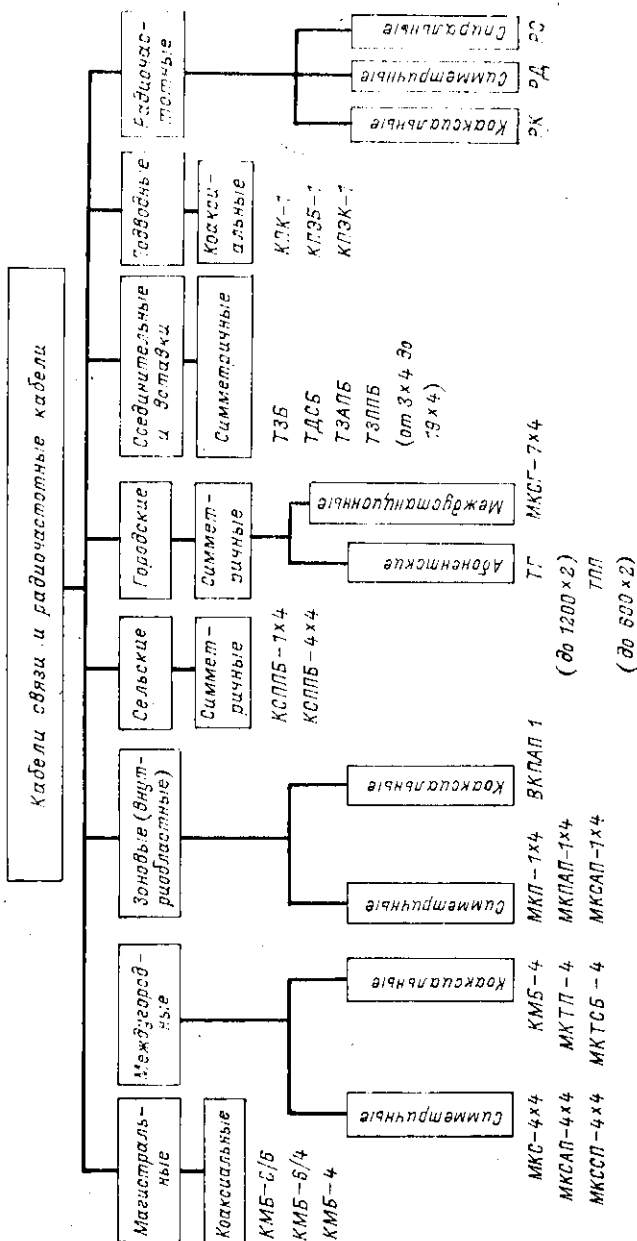


Рис. 1-18. Классификация кабелей связи.

Радиочастотные кабели подразделяют на три основные группы: РК — радиооаксальные, РД — радиодвойные (симметричные), РС — радиоспиральные.

На рис. 1-18 приведена классификация и номенклатура кабелей связи, изготавливаемых отечественной промышленностью.

2. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

А. Симметричные кабели

Жилы. Наиболее распространенными материалами для изготовления кабельных жил в кабелях связи являются медь и алюминий.

Медная проволока диаметром 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 мм применяется для городских телефонных и 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 мм для междугородных кабелей. Наиболее широко применяются в городских сетях кабели с жилами диаметром 0,4; 0,5; 0,7 мм, а для междугородной связи кабели с жилами диаметром 1,2 мм.

Для кабелей связи используют алюминиевые жилы диаметром 1,15; 1,55 и 1,8 мм. Эти жилы по электрической проводимости равноценны медным жилам диаметром 0,9; 1,2 и 1,4 мм соответственно.

Изоляция. Материал, применяемый для изоляции жил в кабелях связи, должен обладать высокими и стабильными по времени электрическими характеристиками.

Наилучшим диэлектриком является воздух. Поэтому изоляция кабеля, как правило, является комбинированной и содержит как воздух, так и твердый диэлектрик, причем количество твердого диэлектрика должно быть минимальным и определяться требованием устойчивости изоляции и жесткости ее конструкции.

Если до последних лет основным изоляционным материалом в кабелях связи была бумага, то теперь все более широкое применение находят пластмассы — стиролфлекс, полиэтилен, фторопласт, поливинилхлорид и пр.

Наиболее широкое применение в симметричных кабелях связи получили следующие типы изоляции (рис. 1-19): трубчатая, выполняется из бумажной или пластмассовой ленты, наложенной в виде трубки (рис. 1-19, а); кордельная, состоящая из корделя, расположенного открытой спиралью на жиле, и ленты, которая наклады-

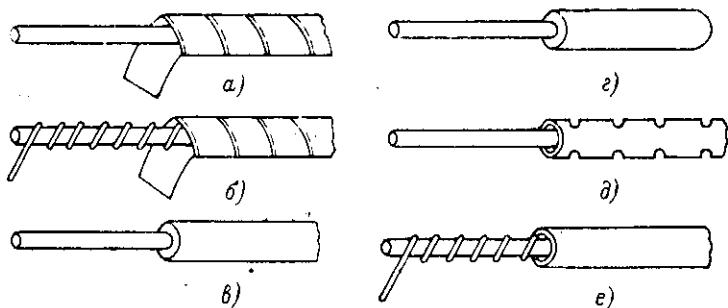


Рис. 1-19. Типы изоляции симметричных кабелей связи.

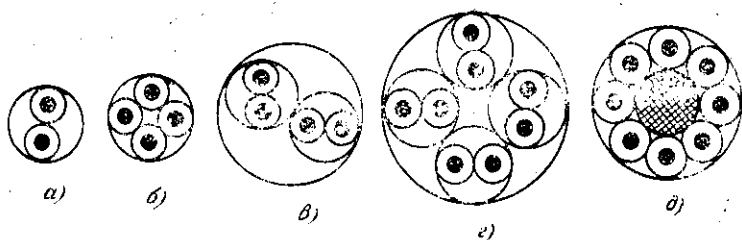


Рис. 1-20. Виды скрутки изолированных жил кабелей связи в группы.

вается поверх корделя (рис. 1-19,б); сплошная, выполняется из сплошного слоя пластмассы (рис. 1-19,в); пористая, образуется из слоя пенопласта (рис. 1-19,г); баллонная, представляющая собой тонкостенную пластмассовую трубку, внутри которой располагается жила, трубка периодически обжимается и надежно удерживает жилу в центре изоляции (рис. 1-19,д); кордельно-трубчатая, состоящая из пластмассового корделя и трубки (рис. 1-19,е).

Из различных диэлектриков и конструктивных форм изоляции наибольшее распространение получили: 1) для кабелей городской и местной связи — трубчатая, выполненная в виде обмотки бумажными лентами, сплошная полиэтиленовая, пористая бумажная или полиэтиленовая; 2) для симметричных кабелей дальней связи — кордельно-бумажная, кордельно-стирофлексная, баллонная, кордельно-трубчатая или пористая из полиэтилена. Существует несколько способов скрутки изолированных жил кабелей связи в группы (рис. 1-20):

Скрутка парная (П). Две изолированные жилы скручиваются в пару с шагом скрутки не более 300 мм (рис. 1-20,а).

Скрутка четверки — звездная (З). Четыре изолированные жилы, расположенные по углам квадрата, скручиваются с шагом примерно 150—300 мм. Разговорные пары в этой скрутке образуются из противоположащих жил (рис. 1-20,б).

Скрутка двойная парная (ДП). Две предварительно скрученные разговорные пары $a-b$ и $c-d$ скручиваются вместе в четверку (рис. 1-20,в). Шаги скрутки пар должны быть отличными как друг от друга, так и от шага скрутки самой четверки. Шаг скрутки пар принимается в пределах 400—800 мм, а шаг скрутки четверки составляет 150—300 мм.

Скрутка двойная звездная (ДЗ). Четыре предварительно скрученные пары скручиваются вместе по способу звезды, образуя восьмерку (рис. 1-20,г). Шаги скрутки пар, составляющих восьмерку, выполняют различными и выбирают обычно в пределах 150—250 мм, а шаг скрутки четверки — в пределах 150—300 мм.

Восьмерочная скрутка (В) — восемь изолированных жил располагаются концентрически вокруг сердечника из изоляционного материала, например стирофлексного или полиэтиленового корделя (рис. 1-20,д). Из восьми проводов могут быть образованы две четверки: первая — с нечетными номерами проводов, вторая — с четными. Всего может быть получено четыре основные цепи и две так называемые фантомные с одинаковыми параметрами передачи.

Диаметр группы в многожильных кабелях в зависимости от диаметра изолированного провода d_1 при различных видах скрутки составляет:

	По расчету	Фактически
Для пары	1,71 d_1	1,65 d_1
Для четверки звездной	2,41 d_1	2,2 d_1
Для двойной пары	2,72 d_1	2,6 d_1
Для двойной звезды	3,98 d_1	3,9 d_1
Для восьмерки	3,60 d_1	3,54 d_1

Наиболее экономичной, обеспечивающей лучшую стабильность кабеля по электрическим параметрам, является звездная скрутка.

Она получила преимущественное применение в междугородных кабелях дальней связи. Парная скрутка является наиболее простой в производстве и применяется в основном при изготовлении городских телефонных кабелей.

Б. Коаксиальные кабели

Внутренний проводник коаксиального кабеля должен иметь цилиндрическую форму и обладать необходимой механической прочностью в сочетании с достаточной гибкостью и высокой электрической проводимостью. Наиболее часто внутренний проводник изготавливается из меди, реже — из алюминия.

В тех случаях, когда требуется повышенная гибкость кабеля, внутренний проводник изготавливается многопроволочным, состоящим из 7, 19 или 37 отдельных проволок.

Иногда для изготовления внутреннего проводника используется биметалл, применение которого одновременно с повышением механической прочности проводника дает экономию цветных металлов.

Изоляция коаксиального кабеля должна обладать диэлектрической проницаемостью, приближающейся к единице, большим удельным сопротивлением, малыми диэлектрическими потерями, высоким пробивным напряжением, малой гигроскопичностью и неизменностью свойств в процессе длительной эксплуатации.

В качестве материала изоляции применяются высокомолекулярные пластмассы — полистирол, полиэтилен, фторопласт и пр.

Изоляция подразделяется на сплошную и комбинированную (воздушно-пластмассовую). Соотношение объемов твердого изоляционного материала V_T и воздуха V_B в кабелях с комбинированной изоляцией составляет:

$$V_T/V_B = 1/10 + 1/20.$$

Комбинированная изоляция бывает прерывистой и непрерывной. Характерным типом прерывистой изоляции является шайбовая. Кордели, баллоны, опорные спирали, колпачки, а также каркасы относятся к изоляции непрерывного типа.

В магистральных кабелях стандартного типа наибольшее применение получила шайбовая изоляция.

В малогабаритных кабелях применяется баллонная, кордельно-трубчатая и пористая изоляция.

Шайбовая изоляция изготавливается из полиэтиленовых шайб, размещаемых через определенные промежутки (20—60 мм) вдоль кабеля (рис. 1-21, а).

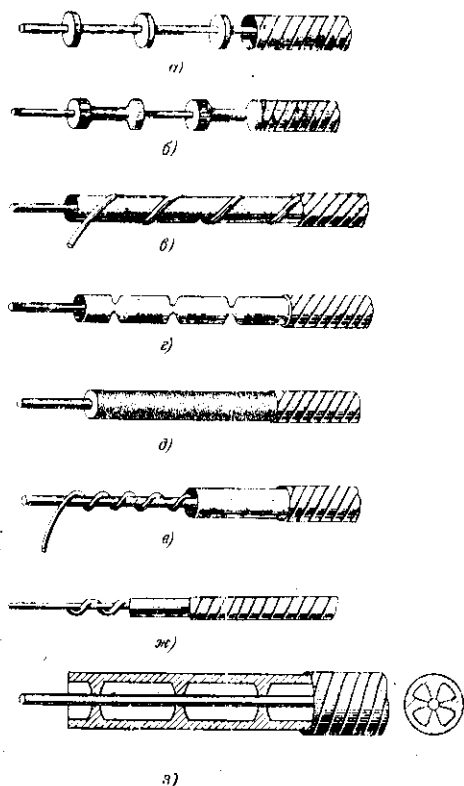


Рис. 1-21. Типы изоляции в коаксиальных кабелях.

Втулочная изоляция выполняется из полиэтиленовых втулок длиной 12 мм, размещенных на внутреннем проводе с интервалом 6 мм (рис. 1-21,б).

Баллонная изоляция представляет собой тонкостенную полиэтиленовую трубку толщиной 0,2—0,3 мм, периодически обжатую на проводнике по всей длине. Известны варианты обжатия трубки корделем (баллонно-кордельная изоляция, рис. 1-21,в) или механического обжатия полиэтиленовой трубки через определенные интервалы 7—12 мм (рис. 1-21,г).

Пористая изоляция образуется из полиэтиленового пенопласта (рис. 1-21,д).

Кордельно-трубчатая изоляция состоит из полиэтиленового корделя и полиэтиленовой трубки. Диаметр корделя равен 0,6—0,8 мм, толщина трубки составляет 0,2—0,3 мм (рис. 1-21,е).

Изоляция из винтовой спирали прямоугольного сечения есть равномерно распределенная спираль из полиэтилена (рис. 1-21,ж).

Изоляцию из полиэтиленовой ленты с выступами выполняют из продольной ленты, которая имеет четыре выступа (рис. 1-21,з).

Известны различные модификации конструкции внешнего проводника коаксиального кабеля. Наиболее распространенными являются следующие:

Внешний проводник типа «молния» представляет собой непрерывную цилиндрическую трубку с одним продольным швом (рис. 1-22,а). Для его изготовления используется медная лента толщиной 0,25—0,3 мм. Зубья на краях ленты смещены, а при изгибе ленты образуется жесткий и устойчивый цилиндр.

Гофрированный внешний проводник изготавливается из гофрированной по спирали медной ленты и имеет один продольный хорошо завальцованный шов. Известны также бесшовные гофрированные конструкции из алюминия (рис. 1-22,б).

Винтообразный внешний проводник выполняется в виде одного-двух повивов медных или алюминиевых лент (рис. 1-22,в).

Внешний проводник в виде оплетки изготавливается из тонких медных круглых или плоских проволок (рис. 1-22,г).

В электрическом отношении преимущества имеют проводники гофрированный и типа «молния».

Экраны в коаксиальных кабелях выполняются в виде спиральной обмотки стальными или биметаллическими (медь—сталь) лентами. Лучшие результаты дают ленты, наложенные в разные стороны под углом 45° к оси кабеля.

В. Построение сердечника кабеля

Скрученные в группы изолированные жилы систематизируют по определенному закону и объединяют при рассмотрении в общий кабельный сердечник. В зависимости от характера сердечника различают две системы его скрутки: повивную и пучковую. При пучковой скрутке группы сначала скручиваются в пучки, содержащие по несколько десятков групп (наиболее распространены пучки из 50 или 100 групп), после чего, скручивая вместе пучки, образуют сердечник кабеля (рис. 1-23,а).

Пучковая скрутка применяется главным образом при изготовлении низкочастотных кабелей для городских телефонных сетей.

Основным видом общей скрутки в современных кабелях дальней и местной связи является повивная скрутка (рис. 1-23,б).

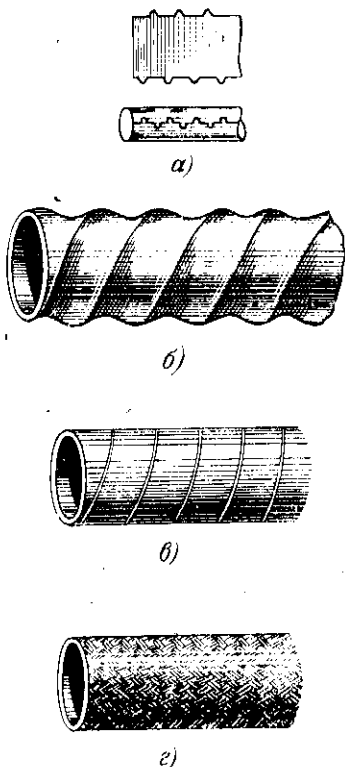


Рис. 1-22. Конструкции внешних проводников коаксиальных кабелей.

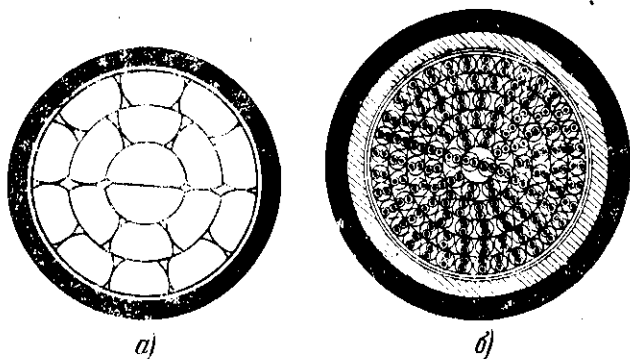


Рис. 1-23. Скрутка групп в сердечник.
а — пучковая скрутка; б — повивная скрутка.

Для защиты кабельных цепей от взаимных и внешних помех, а также для стабилизации электрических параметров кабеля при различных условиях прокладки применяются экраны.

В кабелях связи, как правило, экраны изготавливаются из медных, алюминиевых или стальных лент, наложенных по спирали.

В очень гибких кабелях применяются экраны из оплетки медной проволокой.

Наибольший экранирующий эффект достигается путем применения многослойных экранов, например, в комбинации медь — сталь — медь.

Г. Оболочки и защитные покровы

В кабелях связи применяются следующие кабельные оболочки: металлические, пластмассовые и металлопластмассовые.

К металлическим оболочкам относятся главным образом свинцовые, алюминиевые и стальные.

Свинцовые оболочки накладываются на кабель способом выпрессования в горячем виде. Чтобы свинцовая оболочка имела большую твердость и вибростойкость, ее изготавливают из легированного свинца, например, с присадкой 0,4—0,8% сурьмы.

Алюминиевые оболочки выпрессовываются в горячем виде или изготавливаются холодным способом из ленты со сварным продольным швом. Известны способы сварки оболочки из алюминиевых лент токами высокой частоты или способом холодной сварки, давлением. Для больших диаметров кабеля (свыше 20 мм) с целью придания им необходимой гибкости применяются алюминиевые оболочки гофрированной конструкции.

Применение алюминиевых оболочек весьма прогрессивно. Алюминиевая оболочка легкая, дешевая и обладает высокими экранирующими свойствами. Однако алюминий весьма подвержен электрохимической коррозии, поэтому его надежно защищают поливинил-

хлоридным или полиэтиленовым шлангом с предварительно наложенным слоем битума.

Стальные оболочки изготавливаются путем сварки лент толщиной 0,3—0,5 мм, свернутых в трубку. Для повышения гибкости стальные оболочки подвергают гофрированию. С целью защиты от коррозии стальные оболочки покрывают поливинилхлоридным или полиэтиленовым шлангом с предварительно наложенным слоем битума.

Стоимость стальных оболочек составляет 50% стоимости свинцовых и 64% алюминиевых оболочек.

Такие оболочки не требуют дополнительной механической защиты.

Из пластмассовых оболочек наибольшее распространение получили оболочки из полиэтилена, поливинилхлорида и полиизобутиленовых композиций. Пластмассовые оболочки выгодно сочетают влагостойкость, стойкость против электрической и химической коррозии и придают кабелю легкость, гибкость и вибростойкость. Однако через пластмассу постепенно диффундируют водяные пары, что приводит к падению сопротивления изоляции кабеля. Поэтому пластмассовые оболочки применяют главным образом в кабелях с негигроскопичной изоляцией из полиэтилена, фторопласта, поливинилхлорида и др.

Известна целая серия *комбинированных металлопластмассовых оболочек*. Оболочка «алпэт» состоит из продольно наложенной (с перекрытием) на сердечник кабеля гофрированной алюминиевой ленты толщиной 0,2 мм и полиэтиленового шланга. Оболочка «сталпэт» состоит из двух гофрированных лент: алюминиевой толщиной 0,13—0,2 мм и стальной оцинкованной толщиной 0,2 мм, наложенных на сердечник продольно, и наружного полиэтиленового шланга. При этом нижнюю алюминиевую ленту накладывают с небольшим зазором, а верхнюю — стальную — с перекрытием. Продольный шов стальной ленты сваривают. Известны также комбинированные оболочки, в которых сочетаются тонкая оболочка из свинца и полиэтиленовый шланг (оболочка «свилпэт»). Такие оболочки используются для защиты свинца от коррозии.

Сопоставляя различные конструкции защитных оболочек, отметим как наиболее перспективные алюминиевые и стальные оболочки, надежно защищенные полиэтиленовым шлангом.

3. МАГИСТРАЛЬНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ

Коаксиальные кабели дальней связи можно подразделить на следующие группы: средние с размерами внутреннего и внешнего проводников (2,6/9,4 мм); малогабаритные (1,2/4,6 мм); комбинированные, сочетающие пары среднего (2,6/9,4 мм) и малогабаритного (1,2/4,6 мм) типов.

Известны также конструкции микрокоаксиальных кабелей с размерами проводников 0,7/3,0 мм и больших коаксиальных кабелей с проводниками 7/27 мм.

В отдельную группу должны быть выделены подводные коаксиальные кабели. Они имеют размеры проводников 5/18; 8,4/25 мм.

Коаксиальные кабели марки КМБ-4 с проводниками 2,6/9,4 мм предназначены для дальней связи и телевидения на главных магистралях страны. Они работают в сочетании с аппаратурой уплотнения типа К-1920 в диапазоне 8,5 МГц и типа К-3600 в диапазоне 17 МГц.

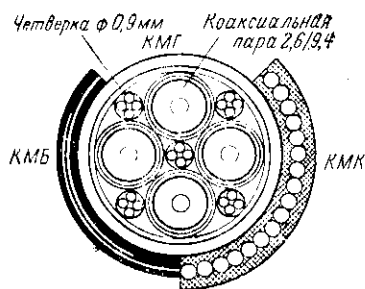


Рис. 1-24. Коаксиальные кабели марок КМБ-4, КМК-4 и КМГ-4.

Малогабаритные коаксиальные кабели МКТП-4 (МКТСБ-4) с проводниками 1,2/4,6 мм предназначены для работы в сочетании с аппаратурой уплотнения типа К-300 в диапазоне 1,3 МГц и К-1320 в диапазоне 5,7 МГц.

Комбинированные коаксиальные кабели КМБ-8/6 и КМБ-6/4 содержат обе эти конструкции коаксиальных пар с проводниками 2,6/9,4 и 1,2/4,6 мм. Коаксиальные пары с проводниками 2,6/9,4 мм предназначены для осуществления многоканальной связи и телевидения на большие расстояния между оконечными пунктами и крупными узлами связи, а коаксиальным парам с проводниками

1,2/4,6 мм организуются распределительные каналы связи между промежуточными пунктами и городами, расположенными по трассе магистрали.

Микрокоаксиальные кабели содержат 7, 19 и больше очень тонких коаксиальных пар (0,7/3,0 мм), предназначенных для устройства зонной связи и соединительных линий городской телефонной сети. Они предназначены для работы в сочетании с аппаратурой уплотнения типа К-300 в диапазоне до 1,3 МГц, типа ИКМ-30 в диапазоне 2 МГц и типа ИКМ-120 в диапазоне 8 МГц.

Большие коаксиальные пары представляют собой, как правило, одну пару большого размера (7/27, 11/40 мм). Они используются по двухкабельной системе и предназначены для создания большого числа каналов на главных направлениях связи. Кабели предполагается уплотнять системами на 50 000 и 100 000 телефонных каналов в диапазоне 300 и 600 МГц соответственно.

Подводные коаксиальные кабели предназначены для устройства связи через моря и океаны. Кабели, как правило, имеют однокосильную конструкцию большого размера (4,1/15,7; 5/18; 8,4/25,4 мм и др.) и позволяют работу с аппаратурой уплотнения на 48, 80, 120, 360 и 720 каналов связи.

Наибольшее применение для организации магистральной связи получили коаксиальные средние кабели (2,6/9,4 мм), малогабаритные кабели (1,2/4,6 мм), а также комбинированные коаксиальные кабели (2,6/9,4 и 1,2/4,6 мм).

Магистральный коаксиальный кабель марки КМБ-4 с проводниками 2,6/9,4 мм для дальней магистральной связи и телевидения состоит из четырех коаксиальных пар и пяти звездных четверок (рис. 1-24). Каждая коаксиальная пара состоит из внутреннего медного проводника диаметром 2,6 мм с одним продольным швом. Коаксиальная пара имеет изоляцию из полиэтиленовых шайб толщиной 2,2 мм с расстоянием между ними 25 мм. Поверх внешнего проводника расположены дополнительный экран в виде двух мягких стальных лент толщиной $0,15 \pm 0,2$ мм и затем один-два слоя кабельной бумаги. Кабель имеет свинцовую оболочку обычные бронепроводы и маркируется буквами КМБ, КМГ и КМК. Кабель с прово-

дниками 2,6/9,4 мм используется в основном по однокабельной системе.

Кабель КМБ-4 имеет наружный диаметр 41,5 мм и массу 4350 кг/км.

В четырехкоаксиальном кабеле две диаметрально расположенные коаксиальные пары служат для многоканальной телефонной связи, а вторые две пары — для телевидения. По телефонным парам можно создавать 1920 каналов связи в диапазоне 312—8500 кГц. Для телевидения как черно-белого, так и цветного занимается диапазон 50 Гц — 6 МГц.

Возможно также использование коаксиальной пары для 300 телефонных разговоров в диапазоне 312—1500 кГц и телевизионной программы в диапазоне 1,9—8,5 МГц.

Имеются также системы уплотнения кабеля в диапазоне до 12 МГц, по которым можно получить 2700 телефонных каналов, и до 17 МГц для 3600 каналов.

Расстояние между усилительными пунктами равно 6 км при уплотнении до 8,5 МГц и 3 км при уплотнении до 17 МГц.

Усилительные пункты получают питание электроэнергией дистанционно от обслуживаемых пунктов, расположенных через 120—240 км на кабельной магистрали. Аппаратура дает усиление до 5 Вт. Максимальная дальность связи 12 500 км.

Основные электрические характеристики коаксиальной цепи с проводниками 2,6/9,4 мм:

Номинальное волновое сопротивление, Ом . . .	75
Внутренняя неоднородность (коэффициент отражения):	
для 85% выпускаемых кабелей	$2 \cdot 10^{-3}$
для 15% выпускаемых кабелей	$3 \cdot 10^{-3}$
Переходное затухание при 300 кГц, дБ	122
Затухание (коэффициент затухания) при 1 МГц, дБ/км	2,48
Испытательное напряжение постоянного тока, кВ	3,7

Частотная характеристика параметров кабеля приведена в табл. 1-8.

Малогобаритные коаксиальные кабели изготавливаются с проводниками диаметром 1,2/4,6; 1,2/5,3; 1,5/5,4 мм. Наибольшее применение получил кабель с проводниками диаметром 1,2/4,6 мм. Эти кабели предназначены для магистралей ограниченной протяженности, рокадных линий между магистралями, глубоких вводов радиорелейных линий и для обеспечения областных связей.

Достоинством малогобаритных кабелей являются простота конструкции, дешевизна и технологичность их изготовления. Если средние коаксиальные кабели целесообразно применять при большом количестве каналов связи (500 и больше), то малогобаритные кабели эффективны и при малом числе каналов, начиная с 60. Эти кабели, в отличие от симметричных, не требуют выполнения сложных работ по симметрированию.

У нас наибольшее применение получил четырехкоаксиальный малогобаритный кабель. Он может изготавливаться как в пластмассовой (МКТП-4), так и в свинцовой оболочке с ленточной броней (МКТСВ-4). Сердечники кабеля в обоих случаях идентичны.

Таблица 1-8

Параметры коаксиальной пары кабеля КМБ-4 с проводниками 2,6/9,4 мм, с шайбово-полиэтиленовой изоляцией ($C = 48 \cdot 10^{-9}$ Ф/км)

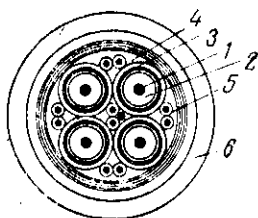
f , кГц	z_0 , Ом	α , дБ/км	β , рад/км	f , кГц	z_0 , Ом	α , дБ/км	β , рад/км
10	80,5	0,354	0,25	700	75,2	2,06	15,86
20	79,1	0,423	0,51	780	75,1	2,18	17,66
40	78,1	0,550	0,93	860	75,0	2,29	19,46
60	77,5	0,648	1,38	940	75,0	2,40	21,2
80	77,1	0,726	1,83	1000	75,0	2,48	22,0
100	76,8	0,800	2,31	1200	74,9	2,7	27,09
120	76,6	0,864	2,73	1400	74,8	2,93	31,58
160	76,3	0,904	3,68	1600	74,8	3,14	36,07
180	86,2	1,04	4,13	1800	74,7	3,33	40,56
220	76,0	1,16	5,04	3000	74,6	4,30	67,46
280	75,8	1,31	6,40	3400	74,5	4,59	76,42
300	75,7	1,36	6,85	4000	74,5	4,98	89,85
400	75,6	1,56	9,10	5000	74,5	5,56	112,24
440	75,5	1,64	10,0	6000	74,4	6,08	134,63
480	75,4	1,74	10,91	7000	74,4	6,58	157,01
500	75,4	1,75	11,36	8000	74,4	7,04	179,38
540	75,3	1,82	12,26	9000	74,4	7,47	201,75
620	75,2	1,86	14,06	10 000	74,3	7,89	224,13

Кабели МКТП-4 и МКТСБ-4 имеют соответственно диаметры 24 и 25 мм, массы 677 и 2109 кг/км.

На рис. 1-25 показан малогабаритный кабель МКТП-4.

Внутренний проводник этого кабеля медный, диаметром 1,2 мм. Изоляция воздушно-полиэтиленовая, баллонного типа. Внешний проводник медный, с продольным швом, толщиной 0,1 мм. Экран из двух стальных лент толщиной по 0,1 мм. Четыре коаксиальные пары скручивают вместе с пятью сигнальными парами диаметром 0,5 мм и покрывают наружной оболочкой из поливинилхлорида.

Сечение 4-коаксиального кабеля



Коаксиальная пара 1,2/4,4

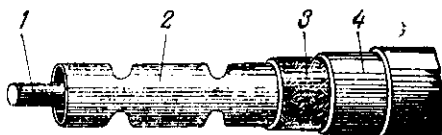


Рис. 1-25. Малогабаритный коаксиальный кабель с баллонной изоляцией марки МКТП-4, 1,2/4,4.

1 — внутренний проводник; 2 — изоляция; 3 — внешний проводник; 4 — экран; 5 — сигнальная пара; 6 — оболочка.

Кабель обладает следующими характеристиками:

Строительная длина	500 м
Разрывная прочность, не менее	1300 Н
Волновое сопротивление	$75 \pm 1 \text{ Ом}$
Коэффициент отражения	$(3-5) \cdot 10^{-1}$
Переходное затухание на ближнем и дальнем концах при 60 кГц. не менее	104 дБ с. д.*
Электрическая прочность	2800 В
Сопротивление постоянному току при 20 °С, не более	23,2 Ом/км
Емкость	$51 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$

* Здесь и далее с. д. — строительная длина кабеля.

Коэффициент затухания кабеля при разных частотах равен:

f , МГц	0,06	1,0	1,3	5,0	10,0	100,0
α , дБ/км	1,59	5,33	6,13	12,10	16,90	53,20

Кабель уплотняется 300-канальной аппаратурой высокочастотной связи (К-300) в диапазоне 60—1300 кГц. Система питания дистанционная. Необслуживаемые пункты устанавливаются через 6 км, обслуживаемые — через 120 км. Система связи — четырехпроводная, однополосная. Аппаратура дает усиление до 44 дБ.

Дальнейшее развитие систем уплотнения по малогабаритным коаксиальным кабелям предусматривает расширение полосы частот до 5,7 МГц на 1320 каналов с длиной усилительного участка 3 км.

Известны также конструкции малогабаритных коаксиальных кабелей, имеющих одну, две, четыре и восемь пар.

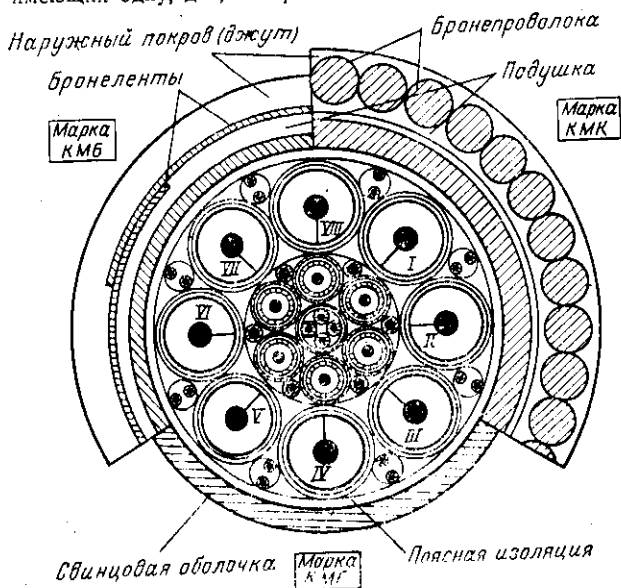


Рис. 1-26. Комбинированный коаксиальный кабель марки КМБ-8/6.

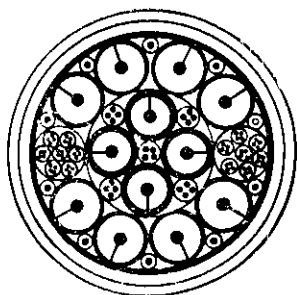


Рис. 1-27. Комбинированный коаксиальный кабель марки КМБ-12.

Комбинированные коаксиальные кабели содержат коаксиальные пары с диаметрами проводников 2,6/9,4 мм и малогабаритные коаксиальные пары 1,2/4,6 мм.

Комбинированные кабели позволяют: а) организовать мощные пучки телефонных каналов и телевизионную передачу на большие расстояния по коаксиальным парам 2,6/9,4 мм с помощью систем уплотнения К-1920 и К-3600; б) обеспечить распределительные каналы связи между городами и промежуточными пунктами, расположенными на магистрали по коаксиальным парам 1,2/4,6 мм с помощью системы К-300 и в последующем системы К-1320; в) обеспечить вы-

деление необходимого количества каналов в любом пункте трассы из системы уплотнения аппаратуры К-300 и системы К-24К уплотнения симметричных пар; г) организовать служебную связь и телесигнализацию по симметричным парам и четверкам.

В СССР имеются комбинированные коаксиальные кабели двух марок КМБ-8/6 и КМБ-6/4. Кабель КМБ-8/6 содержит восемь коаксиальных пар 2,6/9,4 мм, шесть коаксиальных пар 1,2/4,6 мм, одну четверку, восемь симметричных пар и шесть отдельных жил. Кабель КМБ-6/4 содержит шесть коаксиальных пар 2,6/9,4 мм, четыре коаксиальные пары 1,2/4,6 мм, три четверки и семь симметричных пар.

Сечение кабеля КМБ-8/6 показано на рис. 1-26.

Все симметричные пары, четверки и отдельные провода имеют медные жилы диаметром 0,9 мм с трубчато-полиэтиленовой изоляцией.

В табл. 1-9 приведены данные о числе каналов, которые можно организовать по комбинированным коаксиальным кабелям.

Кабель КМБ-8/4 имеет диаметр 58 мм, массу 8366 кг/км. Строительные длины комбинированных коаксиальных кабелей 490 м.

Электрические характеристики коаксиальных пар комбинированных кабелей аналогичны характеристикам пар 2,6/9,4 мм в кабеле КМБ-4 и 1,2/4,6 мм в кабеле МКТП-4 (то же МКТСБ-4).

Таблица 1-9

Число каналов связи, создаваемых с помощью комбинированных кабелей

Марка кабеля	Система уплотнения				Общее число каналов
	2,6/9,4 мм			1,2/4,6 мм	
	К-1920	К-3600	К-300	К-1320	
КМБ-8/6	7680	—	900	—	8580
	—	14 400	—	3960	18 360
КМБ-6/4	5760	—	600	—	6360
	—	10 800	—	2640	13 440

Известны также конструкции, в которых сочетаются коаксиальные пары с большим количеством симметричных пар. На рис. 1-27 показан кабель, имеющий 12 коаксиальных и много симметричных пар.

4. МЕЖДУГОРОДНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ КАБЕЛИ

Междугородные симметричные кабели по роду изоляции подразделяются на три вида: кордельно-бумажная (МК), кордельно-полистирольная, она же стирофлексная (МКС) и полиэтиленовая (МКП). Наружные оболочки изготавливаются из свинца, алюминия или стали.

Для междугородной связи применяются в основном четырех- и семичетверочные конструкции кабелей, а для зоновой (внутриобластной связи) — одночетверочные конструкции.

Кабели предназначены для высокочастотного уплотнения шестидесятиканальной аппаратурой К-60 в диапазоне до 252 кГц, работающей при напряжении дистанционного питания 1000 В постоянного тока (690 В переменного тока). Расстояние между необслуживаемыми усилительными пунктами 20 км, между обслуживаемыми пунктами 160—250 км. Максимальная дальность связи 12 500 км.

Наибольшее применение имеют кабели с кордельно-полистирольной (стирофлексной) изоляцией (МКС). В зависимости от типа оболочки они подразделяются на три марки: МКС — в свинцовой оболочке, МКСА — в алюминиевой оболочке, МКСС — в стальной оболочке.

Во всех случаях сердечники кабелей идентичны. Кабели МКС изготавливаются с числом четверок 7, 4 и 1, строительными длинами 825 м.

Конструкция наиболее распространенного четырехчетверочного симметричного кабеля с кордельно-полистирольной изоляцией (МКС-4×4) приведена на рис. 1-28. Диаметр медных жил равен 1,2 мм. Токпроводящие жилы высокочастотных четверок изолируются разноцветным полистирольным корделем диаметром 0,8 мм и полистирольной лентой толщиной 0,05 мм с перекрытием 25—30%. Первая пара каждой четверки состоит из изолированных жил красного и желтого цветов, вторая пара — из жил синего и зеленого цветов. Центр четверки заполняется стирофлексным корделем диаметром 1,1 мм. Шаги скрутки всех четверок различны, взаимно согласованы и равны 125—275 мм.

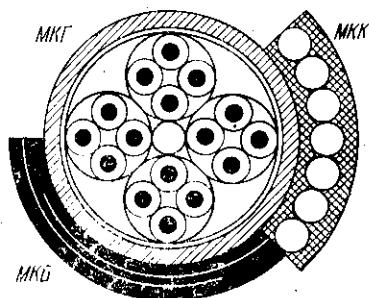


Рис. 1-28. Симметричный кабель марки МКС-4×4.

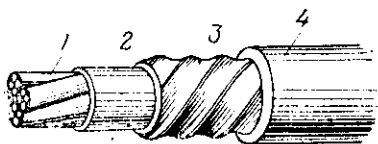


Рис. 1-29. Симметричный кабель марки МКССП в стальной гофрированной оболочке.

1 — четверки; 2 — алюминиевый экран; 3 — стальная гофрированная оболочка; 4 — полиэтиленовый шланг.

Кабели со свинцовой оболочкой и соответствующей броней имеют марки МКСГ, МКСБ, МКСП и МКСК. Толщина свинцовой оболочки у кабеля МКСБ равна 1,25 мм, а у остальных 1,4 мм.

Кабели с алюминиевой оболочкой имеют поверх алюминия антикоррозионный защитный покров в виде битума и полиэтиленового шланга. В марках таких кабелей имеются дополнительные буквы «АП» (МКСАП, МКСАПБ, МКСАПК и т. п.). Толщина алюминиевой оболочки при высокочастотной сварке равна 1,0 мм, при пресовании 1,3 мм.

Кабелям в стальной оболочке присвоена марка МКССП. Стальная оболочка имеет толщину 0,4 мм и для большей гибкости она гофрирована по всей длине. Поверх стали наносят антикоррозионный покров в виде битума и полиэтиленового шланга (рис. 1-29).

Для кабелей МКС нормированы следующие электрические характеристики:

Сопротивление цепи постоянному току	31,7 Ом/км;
Сопротивление изоляции, не менее	10 000 ГОм·м;
Емкость	24,5±1,0 пФ/м;
Переходное затухание на ближнем конце, не менее	61,7 дБ/с. д.
Электрическая прочность изоляции между жилами	1500 В

Частотная зависимость параметров кабелей МКСА в алюминиевой оболочке приведена в табл. 1-10 (α_a — температурный коэффициент затухания).

Таблица 1-10

Частотные характеристики кабелей МКСА-4×4

f , кГц	α , дБ/км	β , рад/км	z_B , Ом	$-\varphi_B$	$\alpha_a \cdot 10^{-3}$, 1/°C
10	0,738	0,29	194	15°25'	3,65
20	0,851	0,53	183	9°24'	3,35
30	0,956	0,81	177	7°08'	3,09
40	1,051	1,08	175	5°50'	2,84
50	1,147	1,35	173,9	5°04'	2,63
60	1,242	1,60	173	4°25'	2,48
70	1,329	1,87	172,4	3°54'	2,37
80	1,424	2,12	171,5	3°26'	2,29
90	1,500	2,39	171	3°08'	2,23
100	1,580	2,64	170,6	2°50'	2,19
110	1,663	2,91	170,2	2°36'	2,16
200	2,22	5,20	167,5	2°02'	2,04
250	2,48	6,48	166,2	1°52'	1,98
260	2,53	6,74	166	1°50'	1,97
300	2,70	7,74	165,2	1°45'	1,93
400	3,11	—	—	—	—
500	3,47	—	—	—	—
550	3,64	—	—	—	—

Таблица 1-11

Сравнительные данные кабелей МКС-4×4 в различных оболочках

Характеристика	Оболочка		
	Свинцовая МКСБ	Алюминиевая МКСАПБ	Стальная МКССП
Наружный диаметр, мм	27,4	30,6	27,5
Масса, кг/км:			
свинец	804	—	—
сталь	407	465	298
алюминий	—	193	36

Таблица 1-12

Затухание симметричных кабелей

Вид изоляции	Диэлектриче- ская прои- цаемость	Затухание, дБ/км, при частоте, кГц			
		60	108	252	552
Кордельно-бумажная	1,4	1,42	1,74	3,19	5,50
Кордельно-полистирольная	1,25	1,34	1,74	2,61	3,91
Баллонно-полиэтиленовая	1,25	1,34	1,82	2,70	4,00
Сплошная полиэтиленовая	2,1	1,59	2,10	3,20	4,69
Пористая полиэтиленовая	1,5	1,37	1,82	2,73	4,02

Симметричные кабели в свинцовой (МКС) и стальной (МКСС) оболочках имеют примерно те же характеристики, что и кабели МКСА. Однако затухание в кабелях МКС и МКСС за счет повышенных потерь в свинце и стали больше на 2—3%.

В табл. 1-11 приведены сравнительные данные четырехчетверочных симметричных кабелей с кордельно-полистирольной изоляцией в свинцовой (МКС-4×4), алюминиевой (МКСА-4×4) и стальной (МКСС-4×4) оболочках.

Наряду с симметричными кабелями с кордельно-полистирольной изоляцией (МКС) применяются также кабели с кордельно-бумажной (МК) и полиэтиленовой (МКП) изоляцией. Однако для высокочастотной связи кабели МК менее эффективны из-за больших диэлектрических потерь в бумажной изоляции.

Высокочастотные симметричные кабели с полиэтиленовой изоляцией (МКП) имеют определенное применение в различных конструктивных модификациях (баллоны, кордель, сплошная, пористая).

В табл. 1-12 приведены для сравнения расчетные данные затухания симметричных кабелей с различными видами изоляции при одинаковом диаметре четверки ($D_3=7,1$ мм). Из табл. 1-12 следует, что наилучшими электрическими характеристиками обладают кабели с кордельно-полистирольной и баллонно-полиэтиленовой изоляциями. Однако по комплексу свойств лучше кабель с кордельно-полиэтиленовой изоляцией.

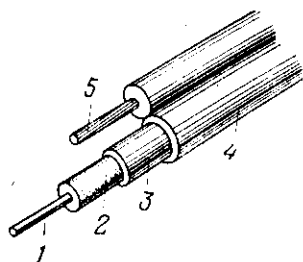


Рис. 1-30. Одпокоаксиальный кабель зонной связи марки ВКПАП-1 (подвесной вариант).

1 — внутренний медный проводник; 2 — полиэтиленовая изоляция; 3 — алюминиевый внешний проводник; 4 — полиэтиленовая оболочка; 5 — стальной трос.

Для зонавой связи, т. е. связи областного центра с районами, нашли применение одноксоаксиальные кабели ВКПАП-1 (с парой 2,1/9,7 мм), уплотняемые аппаратурой К-120 по однокабельной системе, а также одноплетерочные кабели различных модификаций с полиэтиленовой (МКП-1×4) и кордельно-полистирольной (стирофлексной) (МКС-1×4) изоляцией, уплотняемые аппаратурой К-60 по двухкабельной системе.

Однокасиальный кабель ВКПАП-1-2, 1/9,7 предназначен для организации зоновой связи на 120 телефонных каналах с расстоянием до 600 км. Кабель уплотняется в диапазоне до 1,3 МГц аппаратурой К-120 по двухполосной системе: 60—552 кГц (в прямом направлении) и 728—1320 кГц (в обратном направлении).

Расстояние между усилителями составляет 10 км. Возможно выделение 12-канальных групп в любом несобслуживаемом усилительном пункте с общим количеством каналов, равным 60.

Конструктивно кабель выполняется в двух вариантах (рис. 1-30): подземный ВКПАП-1 и подвесной самонесущий с встроенным тросом ВКПАП-1. Длина пролета подвесного кабеля 50—65 м.

Внутренний проводник кабеля выполнен из медной проволоки диаметром 2,1 мм, изоляция из пористого полистилена с внешним диаметром 9,7 мм, внешний проводник — алюминиевая прессованная трубка толщиной 0,8 мм. Эта же трубка выполняет роль экрана. Защитная оболочка толщиной 2,2 мм выполнена из светостойкого полиэтилена.

В конструкции подвешенного кабеля ВКПАП-1 в общую полиэтиленовую оболочку вмонтирован стальной трос из 49 оцинкованных стальных проволок диаметром 0,34 мм. В поперечном сечении подвешенной кабель имеет форму восьмерки; разрывное усилие троса 7000 Н; механическая прочность на разрыв подземного кабеля 3000 Н.

Диаметр подземного кабеля 16,8 мм, масса 250 кг/км; сечение подвешенного кабеля 16,8×26 мм, масса 310 кг/км.

Кабель ВКПАП-1 имеет следующие характеристики:

Сопротивление внутреннего проводника	5,2 Ом/км
внешнего	2,6 Ом/км
Емкость "	$56 \cdot 10^{-9}$ Ф/км
Электрическая прочность	3000 В
Волновое сопротивление	76 Ом
Коэффициент неоднородности	$8 \cdot 10^{-3}$

Коэффициент затухания при разных частотах равен:

f , кГц	60	300	1000	1300
α , дБ/км	0,75	1,58	2,9	3,3

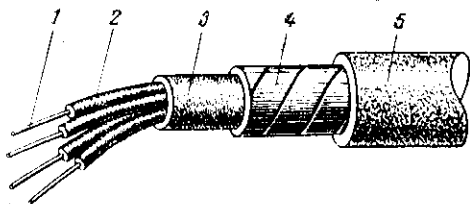


Рис. 1-31. Одночетверочный кабель с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой марки МКП-1×4.

1 — жилы; 2 — полиэтиленовая изоляция; 3 — полиэтиленовая трубка; 4 — алюминиевый экран; 5 — полиэтиленовая оболочка.

Одночетверочный кабель предназначен для зоновой связи, а также для междугородной связи с предельной дальностью 1000 км. Кабель позволяет уплотнение цепей системой К-60 в диапазоне 252 кГц. Применяется также система уплотнения К-24 в диапазоне 108 кГц.

Обычно прокладывают два кабеля, позволяющие получить 120 (при К-60) или 48 (при К-24) телефонных каналов. Длина усиленных участков составляет 11 км при системе К-60 и 20 км при К-24.

Известно несколько модификаций одночетверочных кабелей в том числе: а) с полиэтиленовой изоляцией и полиэтиленовой оболочкой МКП-1×4; б) с полиэтиленовой изоляцией и алюминиевой оболочкой МКПАП-1×4; в) с кордельно-полистирольной изоляцией и алюминиевой оболочкой МКСАП-1×4; г) с кордельно-полистирольной изоляцией и стальной оболочкой МКССП-1×4.

Наиболее распространенными являются кабели МКП-1×4 и МКСАП-1×4.

На рис. 1-31 показана конструкция одночетверочного кабеля с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой МКП-1×4.

Кабель МКП-1×4 имеет медные жилы диаметром 1,2 мм, изолированные сплошным полиэтиленом толщиной $1,1 \pm 0,1$ мм. Четыре изолированные жилы скручиваются с шагом 130—150 мм вокруг центрирующего корделя. На скрученную четверку накладывают полиэтиленовое заполнение, а поверх — экран из алюминиевых или медных лент. Внешняя оболочка выполняется из полиэтилена толщиной 2,0 мм. Наружный диаметр кабеля 17,0 мм, масса 260 кг/км, строительная длина 1000 м. Выпускается также бронированный кабель МКПБ-1×4. Он имеет поверх пластмассовой оболочки броню из двух стальных лент толщиной 0,2—0,3 мм.

Для кабелей МКП-1×4 нормируются следующие параметры:

Сопротивление постоянному току при 20 °С, не более	31,7 Ом/км
Сопротивление изоляции, не менее . . .	10^{10} Ом·км
Волновое сопротивление	140 Ом
Емкость	$35 \cdot 10^{-9}$ Ф/км
Переходное затухание на ближнем конце, не менее	65,1 дБ/с. д.
Защищенность на дальнем конце, не менее	73,8 дБ/с. д.
Испытательное напряжение	2000 В

Коэффициент затухания при разных частотах равен:

f , кГц	10	60	100	200	250
α , дБ/км	0,96	1,45	1,78	2,46	2,72

Кабель МКСАП-1×4 имеет медные жилы диаметром 1,2 мм. Изоляция кордельно-полистирольная. Первая пара четверки красного и желтого цвета, вторая пара — синего и зеленого цветов. В центре четверки имеется полистирольный кордель диаметром 1,1 мм. Кабель имеет алюминиевую оболочку толщиной 1,0 мм. Снаружи наложена полиэтиленовая антикоррозионная оболочка толщиной 1,5 мм.

Электрические характеристики кабеля МКСАП-1×4:

Сопrotивление постоянному току при 20 °С, не более	31,7 Ом/км
Сопrotивление изоляции, не менее	10 ¹⁰ Ом·км
Емкость	25·10 ⁻⁹ Ф/км
Переходное затухание на ближнем конце, не менее	61,7 дБ/с. д.
Защищенность на дальнем конце, не менее	73,8 дБ/с. д.
Электрическая прочность изоляции	1500 В
Коэффициент затухания при частоте:	
10 кГц	0,782 дБ/км
100 кГц	1,82 дБ/км
250 кГц	2,91 дБ/км

6. ГОРОДСКИЕ ТЕЛЕФОННЫЕ КАБЕЛИ

Для устройства городских телефонных сетей используются кабели двух назначений: а) абонентские кабели, дающие связь со станции (АТС) к абонентам; б) соединительные кабели, связывающие АТС между собой и с междугородной станцией (МТС).

Для абонентских линий применяются многопарные телефонные кабели до 1200×2.

Для соединительных линий применяются кабели междугородного типа: симметричные МКСБ-7×4 или коаксиальные МКТП-4 с многоканальными системами уплотнения.

Абонентские телефонные кабели, изготавливаемые отечественной промышленностью, подразделяются на два типа: а) с бумажной (трубчатой или пористой) изоляцией, в металлической защитной оболочке (свинцовой, алюминиевой или стальной); б) с пластмассовой изоляцией из сплошного полиэтилена, в пластмассовой или стальной защитной оболочке.

Кабели с бумажной изоляцией имеют токопроводящие жилы диаметром 0,4; 0,5; 0,6 и 0,7 мм. Изоляция — из пористой бумажной массы или из бумажной ленты, наложенной по спирали с перекрытием 20—30%.

Кабель имеет парную скрутку групп с шагом 70—100 мм и парную скрутку сердечника. Защитная оболочка выполняется из



Рис. 1-32. Городской телефонный кабель марки ТГ-200×2.

свинца или алюминия. Номинальная радиальная толщина свинцовой оболочки лежит в пределах 1,15—3,0 мм.

Кабели выпускаются как без брони (ТГ), так и с различными бронепокровками: стальными лентами (ТБ), плоскими проволоками (ТП), круглыми проволоками (ТК) и другими вариантами брони.

Кабели ТГ выпускают с числом пар от 5 до 1200, а бронированные кабели — до 600 пар. Конструкция кабеля ТГ-200×2 показана на рис. 1-32.

Электрические характеристики городских телефонных кабелей с бумажной изоляцией:

Сопротивление постоянному току при

20 °С жил разных диаметров, не

более:

$d = 0,4$ мм 148 Ом/км

$d = 0,5$ мм 95 Ом/км

$d = 0,6$ мм 65 Ом/км

$d = 0,7$ мм 48 Ом/км

Сопротивление изоляции, не менее $2 \cdot 10^8$ Ом·км

Емкость в пределах $40—50 \cdot 10^{-9}$ Ф/км

Испытательное напряжение переменного тока 500 В

Коэффициент затухания кабелей ГТС с жилами различных диаметров составляет:

Диаметр жилы, мм 0,4 0,5 0,7

Коэффициент затухания, дБ/км . . . 1,52 1,217 0,834

Кабели с изоляцией из полиэтилена изготавливаются в полиэтиленовой (ТПП) и поливинилхлоридной оболочке (ТПВ); варианты кабелей с ленточной броней имеют марки ТППБ и ТПВБ соответственно.

Жилы кабелей — медные, диаметром 0,4, 0,5 и 0,7 мм. Изоляция из полиэтилена толщиной 0,2—0,4 мм. Скрутка парная и четверочная (звездная). Кабели парной скрутки выпускаются с числом пар до 600, а звездной скрутки — с числом четверок до 300. Строительная длина кабелей малой емкости (до 100×2) составляет 300—350 м, а большой емкости (до 600×2) — 150—250 м. Допускаются повивная и пучковая общая скрутки пар или четверок в сердечник. При пучковой скрутке используются элементарные пучки емкостью 10×2 (или 5×4). Система скрутки стопарного кабеля — $(3+7) \times 10 \times 2$ или $(3+7) \times 5 \times 4$.

Сердечники кабелей с числом пар свыше 100 скручиваются из 50- или 100-парных (соответственно 25 или 50 четверочных) пучков.

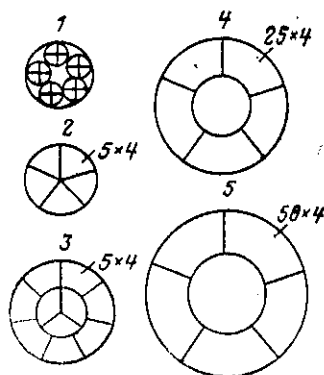


Рис. 1-33. Схемы пучковой скрутки городских телефонных кабелей.

1 — 10-парный (пятичетверочный); 2 — 50-парный; 3 — 100-парный; 4 — 300-парный; 5 — 600-парный.

Например (рис. 1-33), сердечник кабеля 300×2 скручивается из трех 100-парных пучков $3 \times (100 \times 2)$ или шести 50-парных пучков $(1+5) \times (50 \times 2)$. Поверх скрученного сердечника накладывается поясная изоляция из пластмассовых лент. Затем идет алюминиевый экран из лент толщиной 0,1—0,2 мм, наложенных с перекрытием продольно или спирально. На кабелях диаметром свыше 15 мм продольная лента имеет гофрированную конструкцию. По экрану располагают оболочку из поливинилхлорида в кабелях ТПВ, ТПВБ или из шлангового полиэтилена в кабелях ТПП, ТППБ. Толщина оболочки составляет 2—4 мм.

Электрические характеристики кабелей:

Сопротивление постоянному току при 20 °С жил разных диаметров, не более:	
$d = 0,4$ мм	141 Ом/км
$d = 0,5$ мм	90 Ом/км
$d = 0,7$ мм	46 Ом/км
Сопротивление изоляции	$2-5 \cdot 10^9$ Ом·км
Емкость	$50 \cdot 10^{-9}$ Ф/км
Коэффициент емкостной связи k_1 (для 10% выпускаемых строительных длин допускается $k_1 = 700$ пФ/с. д.)	
Испытательное напряжение:	
между жилами рабочих пар	500 В
между жилами и экраном	1000 В

Для устройства соединительных линий АТС — АТС и АТС — МТС получили применение симметричные и коаксиальные кабели междугородного типа с частотными и импульсно-кодowymi системами уплотнения.

Обычные городские телефонные кабели типа Т и ТП для этой цели неприемлемы, так как они имеют большое затухание и не экономичны при потребности в большом количестве каналов.

Для соединительных линий ГТС применяются следующие кабели.

1. Симметричные кабели МКСГ-7×4 и МКСАП-7×4 с системой уплотнения КРР. Такая система позволяет получить $14 \times 30 = 420$ соединительных линий.

2. Симметричный кабель любого типа с уплотнением импульсно-кодовой аппаратурой ИКМ-24 по каждой цепи кабеля.

3. Малогабаритный коаксиальный кабель МКТП-4 с аппаратурой уплотнения К-300.

В перспективе возможно применение для соединительных линий ГТС микрокоаксиальных кабелей (0,7/3,0) с частотной и импульсно-кодowymi системами уплотнения.

7. КАБЕЛИ СЕЛЬСКОЙ СВЯЗИ

Для сельской (внутрирайонной) телефонной связи и радиовещания разработано много разных кабелей связи. Как правило, кабели имеют упрощенную конструкцию в виде одной четверки или одной пары с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой (рис. 1-34).

Последнее время появились четырехчетверочные кабели сельской связи. Кабели пригодны для монтажа при -10°C и эксплуатации при температурах от -40 до $+50^\circ\text{C}$.

Кабели четверочных конструкций уплотняются высокочастотной аппаратурой КНК-6т на 6 каналов с дальностью до 80 км или им-

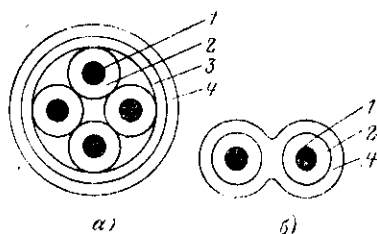


Рис. 1-34. Кабели сельской связи.
а — четверка; б — пара; 1 — жилы; 2 — изоляция; 3 — экран; 4 — оболочка.

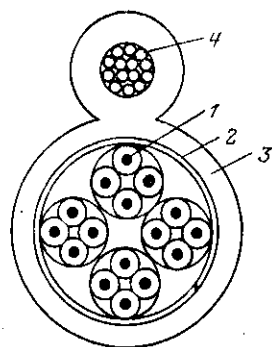


Рис. 1-35. Самонесущий кабель сельской связи марки КСППС-4×4×0,9.
1 — четверки; 2 — алюминиевый экран; 3 — полиэтиленовая оболочка; 4 — стальной трос.

пульсно-кодовой аппаратурой ИКМ-12 на 12 каналов с дальностью до 100 км. Таким образом, по каждой четверке можно получить 12—24 каналов связи.

Одночетверочные кабели КСПП-1×4 имеют медные жилы диаметром 0,9 или 1,2 мм, изолированные полиэтиленом толщиной 0,7—0,8 мм. Поверх скрутки накладываются полиэтиленовая оболочка толщиной 0,9—1,0 мм и алюминиевый экран толщиной 0,1 мм.

Снаружи располагают защитную полиэтиленовую оболочку толщиной 1,2—1,5 мм. Кабель КСПП-1×4×0,9 имеет диаметр 10,4 мм, массу 127 кг. Кабель КСПП-1×4×1,2 имеет диаметр 11 мм, массу 135 кг. Изготавливаются также кабели КСПП-1×4 (в бронелентах КСППБ-1×4 и с круглой проволоочной броней КСППК-1×4).

Четырехчетверочные кабели КСПП-4×4×0,9 имеют медные жилы диаметром 0,9 мм, полиэтиленовую изоляцию толщиной 0,8 мм. Сердечник из четырех крученных четверток изолируют полиэтиленом оболочкой, затем накладывают алюминиевый экран и наружный полиэтиленовый шланг толщиной 1,5—2 мм.

Наружный диаметр кабеля КСПП-4×4×0,9 составляет 25 мм, масса 500 кг/км.

Бронированный вариант кабеля имеет марку КСППБ-4×4×0,9. Изготавливается также самонесущая конструкция кабеля со стальным тросом (КСППС-4×4×0,9) (рис. 1-35).

Электрические характеристики кабелей КСПП с жилами диаметром 0,9 мм:

Сопротивление постоянному току при 20 °С, не более	28,4 Ом/км
Емкость	38·10 ⁻⁹ Ф/км
Электрическая прочность изоляции . . .	2000 В
Волновое сопротивление	130 Ом
Переходное затухание на ближнем конце	62 дБ/с. д.
Защищенность	69 дБ/с. д.

Коэффициенты затухания при разных частотах составляют:

f , кГц	120	550
α , дБ/км	3,2	6,3

Однопарные кабели имеют медные жилы диаметром 0,8; 1,0 и 1,2 мм (ПРППМ) или алюминиевые жилы диаметром 1,6 мм (ПРППА), покрытые двухслойной изоляцией из полиэтилена (рис. 1-34,б). Известны конструкции, в которых внешняя оболочка выполнена из поливинилхлорида (ПРПВМ и ПРПВА).

Кабели пригодны для эксплуатации в диапазоне $-40 \div +60^\circ\text{C}$ и при рабочем напряжении до 360 В. Сечение кабелей составляет $5 \times 10 \text{ мм}^2$. Масса одного километра кабелей ПРППМ- $2 \times 0,8$ 31 кг; ПРППМ- $2 \times 1,0$ 38 кг; ПРППМ- $2 \times 1,2$ 46 кг и кабеля ПРППА- $2 \times 1,6$ 50 кг. Строительная длина 500 м.

Сопротивление жилы постоянному току

при 20°C , не более 47 Ом/км

Емкость $60 \cdot 10^{-9}$ Ф/км

Волновое сопротивление 290 Ом

Коэффициент затухания 1,0 дБ/км

8. КАБЕЛИ ДЛЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ И ВСТАВОК

К названным кабелям относятся низкочастотные кабели дальней связи ТЗ и ТДС. Они изготавливаются в основном с кордельно-бумажной изоляцией токопроводящих жил, состоящих из медной проволоки диаметром 0,8; 0,9; 1,0; 1,2 и 1,4 мм.

Известны конструкции высокочастотных кабелей дальней связи емкостью 7×4 и 4×4 с полиэтиленовой изоляцией.

В зависимости от состава элементов сердечника кабели подразделяются на две основные группы: 1) однородные кабели, сердечник которых скручен из одних звездных четверок; 2) комбинированные кабели, сердечник которых скручен из разнородных групп.

Однородные кабели выпускаются 12 различных марок, определяемых, во-первых, родом защитных покровов и, во-вторых, наличием или отсутствием в кабеле экранированных групп. Марки этих кабелей и номенклатура их изготовления приведены в табл. 1-13.

Таблица 1-13

*Количество четверок в низкочастотных
кабелях дальней связи*

Марки кабелей	Диаметр жилы, мм		
	0,8 и 0,9	1,0 и 1,2	1,4
ТЗГ, ТЗБ	3, 4, 7, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37, 44, 48, 52, 61, 75, 80, 91, 102, 108, 114	3, 4, 9, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37, 44, 48, 52, 61	3, 4, 7, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37
ТЗЭГ, ТЗЭБ, ТЗБГ, ТЗЭБГ, ТЗП, ТЗЭП, ТЗПГ, ТЗЭПГ	3, 4, 7, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	3, 4, 7, 12, 14, 19, 21, 27, 30, 37	3, 4, 7, 12, 14
ТЗК, ТЗЭК	7, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	3, 4, 7, 12, 14, 19, 24, 27, 30, 37	3, 4, 7, 12, 14

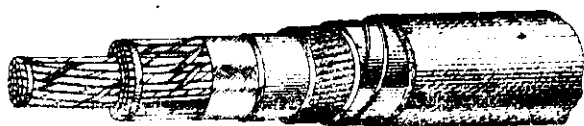


Рис. 1-36. Кабель марки ТЗБ для соединительных линий.

Наличие буквы З в марке кабеля указывает на звездную скрутку жил, а буквы Э — на экранирование четверок.

Для изолирования токопроводящих жил применяются бумажный кордель и кабельная бумага К-12. Кордель накладывается на жилу с шагом 7—10 мм.

Номинальные значения радиальной толщины свинцовой оболочки в зависимости от диаметра и марки кабелей лежат в пределах 1,25—3,0 мм. Строительная длина кабеля до 425 м.

Кабель марки ТЗБ изображен на рис. 1-36.

Изготавливаются также кабели ТЗАВГ и ТЗАВБ с алюминиевыми оболочками.

Значения рабочей емкости кабеля должны лежать в пределах 30—36 пФ/м для неэкранированных и 33—38 пФ/м для экранированных кабелей.

Сопротивление изоляции каждой жилы по отношению к остальным жилам, соединенным со свинцовой оболочкой, должно быть не менее 10 000 ГОм·м.

Нормированные значения коэффициентов емкостной связи k и асимметрии e составляют:

$k_1=75$ пФ/с.д.; $k_{9-12}=110$ пФ/с.д.; $e_{1-2}=280$ пФ/с.д.

Комбинированные низкочастотные кабели состоят из следующих разнородных элементарных групп: экранированных пар, предназначенных для передачи радиовещательных программ, простых и усиленных звездных четверок и усиленных шестерок для телефонной связи.

Таблица 1-14

Электрические параметры симметричных кабелей при частоте 800 Гц

d , мм	R , Ом/км	I , 10^{-3} Г/км	C , 10^{-3} Ф/км	G , 10^{-3} См/км	α , дБ/км	z_0 , Ом	φ_d
0,5	184,0	0,7	31	0,5	1,03	1040	—44°
0,6	123,0	0,7	32	0,5	0,85	880	—44
0,7	92,5	0,7	32,5	0,5	0,76	730	—44
0,8	69,8	0,7	33	0,6	0,64	650	—43
0,9	54,6	0,7	33,5	0,6	0,57	570	—43
1,0	44,3	0,7	34	0,6	0,51	510	—42
1,2	30,8	0,7	34,5	0,7	0,42	425	—42
1,4	22,6	0,6	35,5	0,7	0,37	360	—41
1,5	19,7	0,6	36	0,7	0,34	330	—41
1,8	13,7	0,6	37	0,7	0,28	275	—39
2,0	11,0	0,6	38	0,8	0,25	245	—37

Изоляция токопроводящих жил — кордельно-бумажная.

Низкочастотные телефонные кабели дальней связи выпускаются шести марок: ТДСГ, ТДСБ, ТДСП, ТДСК, ТДСБК, ТДСПК.

Комбинированные низкочастотные кабели в зависимости от скрутки сердечника подразделяются на две группы: 1) одноповивные и 2) двухповивные.

Электрические параметры симметричных кабелей с различными диаметрами жил при частоте 800 Гц приведены в табл. 1-14.

9. ПОДВОДНЫЕ КАБЕЛИ

Специфические особенности прокладки и эксплуатации подводных кабельных магистралей предъявляют особые требования к конструкции и характеристикам подводных кабелей связи.

Важнейшим требованием, предъявляемым к кабелям, которые прокладывают на больших глубинах, является их легкость и в то же время большая прочность на разрыв, позволяющая выдерживать напряжение при прокладке кабеля на большой глубине или при подъеме его во время ремонта. Подводные кабели, проложенные на большой глубине, испытывают большое давление воды, и поэтому необходимо применять сплошную изоляцию без воздушных включений из высокопрочного диэлектрика, позволяющего обходиться без металлической оболочки.

Подводные кабели подразделяются на речные и морские (океанские). Морские кабели в свою очередь подразделяются на глубоководные и береговые, которые отличаются в основном конструкцией брони. Особо усиленную броню, состоящую из двух слоев круглой проволоки, имеют береговые кабели. Этот броневого покров должен противостоять воздействию береговых приливов и отливов и выдерживать возможные удары береговых камней, якорей, багров и т. п. Кабели со свинцовой оболочкой и воздушно-бумажной или воздушно-полиэтиленовой изоляцией пригодны лишь для прокладки на глубину до 50 м. Это обусловлено тем, что свинцовая оболочка может выдержать без деформации давление около 0,5 МПа.

Кабели без свинцовой оболочки со сплошной изоляцией из гуттаперчи, полиэтилена и других аналогичных материалов могут быть проложены на всех доступных глубинах.

Для прокладки в морях и океанах получил признание коаксиальный кабель с полиэтиленовой изоляцией.

Для речных переходов используются кабели с бумажной (ТЗК, МКК) и кордельно-полиэтиленовой (МКСК) изоляцией и круглой проволоочной броней.

Рассмотрим конструкции и характеристики некоторых подводных коаксиальных кабелей.

Отечественный подводный коаксиальный кабель с полиэтиленовой изоляцией с круглопроволочной броней (КПК-5/18) предназначен для подводной прокладки. Кабель КПК-5/18, конструкция которого показана на рис. 1-37, состоит из внутреннего проводника диаметром 3 мм и повива 12 медных проволок диаметром 1 мм, полиэтиленовой сплошной изоляции толщиной 6,5 мм, внешнего проводника, выполненного из шести медных плоских проволок толщиной 0,7 мм и наложенной спиралью с перекрытием медной ленты толщиной 0,08 мм.

Поверх внешнего проводника накладывают пластмассовую ленту и джутовый покров, образующий подушку для брони, состоящей

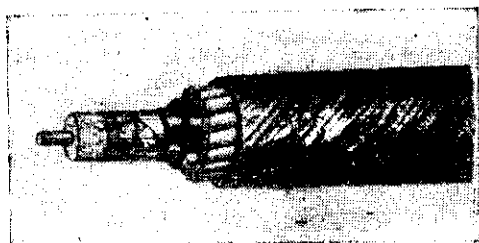


Рис. 1-37. Подводный бронированный кабель.

из стальных оцинкованных проволок диаметром 4 мм. Броню покрывает кабельная пряжа толщиной 2,0 мм, предварительно пропитанная противогнилостным составом. Наружный диаметр кабеля 37,2 мм, масса 3700 кг/км. Строительная длина до 34 км.

Кабель используется по однокабельной системе. Уплотняется в диапазоне 552 кГц для получения 60 телефонных связей по двухполосной схеме. Расстояние между усилительными пунктами составляет 40 км.

Сопротивление жилы кабеля постоянному току равно $1,1 + 0,5 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Ом/м, емкость 100 пФ/м, сопротивление изоляции 50 000 ГОм·м, электрическая прочность при длительном воздействии дистанционного питания 3500 В, волновое сопротивление 55 Ом. Коэффициент затухания кабеля КПК-5/18 для разных частот составляет:

f , кГц	36	60	100	200	250	300	400	500	552
α , дБ/км	0,400	0,521	0,669	0,947	1,06	1,16	1,35	1,51	1,58

Межконтинентальный подводный кабель впервые был проложен через Атлантический океан между Англией и Канадой в 1956 г. Протяженность магистрали равна 5000 км, глубина достигает 5 км.

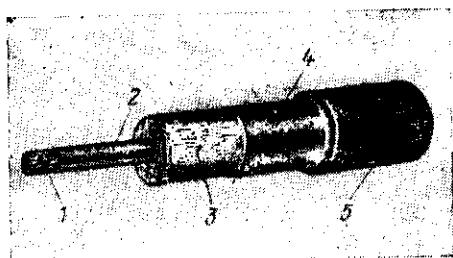


Рис. 1-38. Подводный кабель без брони.

1 — трос из стальных проволок; 2 — внутренний проводник; 3 — полиэтиленовая изоляция; 4 — внешний проводник; 5 — полиэтиленовая оболочка.

Подводные кабели и системы их высокочастотного уплотнения

Тип кабеля	Соотношение диаметров проводов, мм	Наружный диаметр, мм	Система связи	Число каналов	Спектр частот, кГц		Усиленный
					А—Б	Б—А	
Бронированный	4,1/15,7	32	Двухкабельная	48	20—164	20—164	68
Без брони	8,4/25,4	32	Однокабельная	80	60—300	360—608	49
Без брони	8,4/25,4	32	Однокабельная	128	116—552	652—1052	37
Без брони	8,4/25,4	32	Однокабельная	360	300—1380	1884—2964	22
Без брони	8,5/38,1	44	Однокабельная	720	564—2788	3660—5884	18,5

В 1959, 1963 и 1965 гг. были построены новые подводные магистрали, связывающие США со странами Европы. В 1964 г. вступила в строй тихоокеанская магистраль между Австралией и Америкой протяженностью 15 000 км. Недавно завершено строительство трансатлантических линий, связывающих Америку с Италией и Испанией. Заканчивается строительство всемирной кабельной магистрали через Атлантический и Тихий океаны протяженностью 50 000 км.

В качестве основного используется коаксиальный кабель со сплошной полиэтиленовой изоляцией. Получили применение две конструкции кабелей: 1) с броней для прокладки в берегах и местах, где кабели могут быть подвержены механическому воздействию; 2) без брони для глубоководных участков трассы.

Подводный бронированный кабель типа 4,1/15,7 мм состоит из внутреннего проводника, выполненного из медной проволоки диаметром 3,36 мм и обвитого медными лентами толщиной 0,37 мм. Диаметр внутреннего проводника равен 4,1 мм. Изоляция кабеля изготовлена из сплошного полиэтилена с наружным диаметром 15,7 мм. Внешний проводник выполнен из шести медных лент толщиной 0,406 мм и скрепляющей медной ленты толщиной 0,08 мм. На внешний проводник наложены последовательно полиэтиленовая лента, джутовая подушка, стальная броня и джутовое покрытие. Броня в зависимости от назначения кабеля и глубины прокладки состоит из 12—24 стальных проволок диаметром 2—7,6 мм. Наружный диаметр кабеля в зависимости от конструкции брони составляет 25,6—48 мм; масса соответственно 1700—3075 кг/км. Наиболее усиленный двухслойный бронепровод имеет береговой кабель.

На рис. 1-38 показан коаксиальный кабель без брони для глубоководной прокладки. Несущий трос, работающий на растяжение, расположен внутри центрального медного проводника кабеля. Трос состоит из

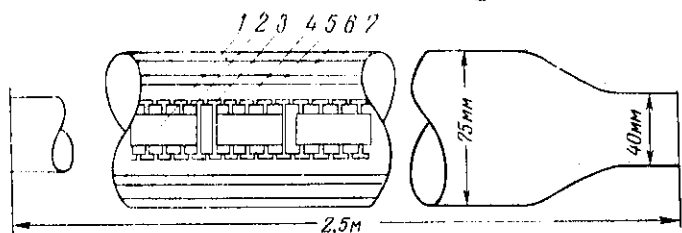


Рис. 1-39. Гибкие усилители подводных кабелей.

1 — пластмассовые секции усилителей; 2 и 3 — стальные кольца; 4 — медный цилиндр; 5 и 7 — джгут; 6 — круглая проволочная броня.

нескольких повивов стальных высокопрочных проволок. Диаметр внутреннего биметаллического проводника равен 8,4 мм. Внешний проводник выполнен из алюминиевых лент. Диаметр кабеля по полиэтиленовой изоляции (без внешнего проводника) составляет 25,4 мм, общий диаметр 32 мм. Кабель без брони в 1,5 раза легче бронированного.

На подводных магистралях усилительная аппаратура (усилительные элементы, лампы, контуры и пр.) размещается в жестких или гибких цилиндрических усилителях, встроенных в кабель примерно через каждые 20—70 км (рис. 1-39). Конструктивно гибкий усилитель представляет собой 17 последовательно расположенных пластмассовых секций цилиндрической формы длиной 127 мм. Конструкция гибкого шарнирного усилителя приведена на рис. 1-39. Длина усилителя 2,5 м, диаметр 75 мм. Такие гибкие усилители, встроенные в кабель, вызывают лишь незначительное его утолщение и не препятствуют непрерывной прокладке кабеля с судна.

Подводный усилитель жесткого типа выполняется в виде цилиндра из бериллиевой меди длиной 1—2 и диаметром 0,3 м.

Гарантирован срок службы усилителей на 20 лет. В усилителях содержится резервный комплект ламп. Наряду с ламповыми усилителями применяются усилители на полупроводниковых элементах.

Электропитание подводных усилителей осуществляется с обоих концов магистрали по внутреннему проводнику кабеля при напряжении источников тока на концах кабеля 3—5 кВ. Прокладка подводных кабелей осуществляется со специальных кабельных судов, вмещающих до 3000 км кабеля.

Основные данные систем высокочастотного уплотнения подводных кабелей приведены в табл. 1-15. Наибольшее применение имеют системы на 48 и 80 каналов. Усилительная способность аппаратуры равна 52—61 дБ.

Известны также системы уплотнения на 128, 360 и 720 каналов в спектрах 1,3 и 6 МГц.

В связи с расширением спектра передаваемых частот наряду с кабелем типа 4,1/15,7 мм применяются более мощные конструкции подводных кабелей с соотношением диаметров проводников 8,4/25,4 мм.

А. Область применения и виды радиочастотных кабелей

Радиочастотные кабели широко применяются во всех областях радиоэлектроники (телевидение, локация, радиосвязь и т. п.) для передачи и распределения высокочастотной энергии, для линий питания антенн передающих и приемных радиостанций, для монтажа и соединения различных блоков и узлов радиоэлектронной аппаратуры.

Радиочастотные кабели в отличие от магистральных кабелей дальней связи предназначены для передачи высокочастотной энергии со сравнительно небольшими потерями на расстояние всего нескольких десятков — сотен метров.

Радиочастотные кабели подразделяются на три вида (рис. 1-40): 1) коаксиальные, маркируемые РК (радиочастотный коаксиальный); 2) симметричные, маркируемые РД (радиочастотный двухпроводный); 3) спиральные, маркируемые РС (радиочастотный спиральный).

Основным видом радиочастотного кабеля является коаксиальный. Он обладает высокой частотно-пропускной способностью, хорошо защищен от помех и имеет в 1,5 раза меньшее затухание, чем симметричный кабель при тех же габаритах.

Симметричным кабелям отдается предпочтение лишь в качестве линий питания симметричных антенн и при монтаже двухпроводных цепей различной высокочастотной аппаратуры.

Спиральные кабели применяются для устройства линий задержки, трансформации, согласования и других специфических целей.

Каждая конструкция кабеля связи в соответствии с действующим ГОСТ 11326-71 имеет марку, состоящую из двух букв, которые означают вид кабеля (РК, РД, РС), и трех чисел, соединенных знаком дефис, из которых первое означает волновое сопротивление, второе — диаметр по изоляции и третье — двузначное, первая цифра которого указывает род изоляции, а вторая представляет собой порядковый номер конструкции.

Применяемым видам изоляции присвоены следующие номера: 1 — полиэтилен и его смеси; 2 — фторопласт; 3 — полистирол (стиро-

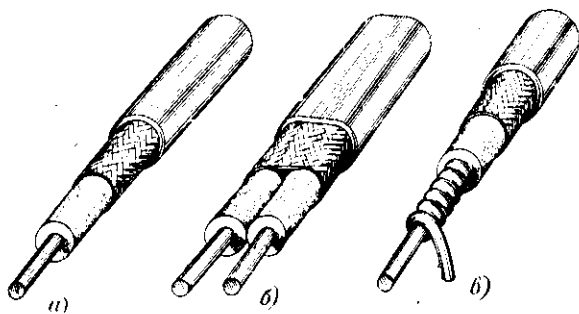


Рис. 1-40. Конструкции радиочастотных кабелей.

а — коаксиальный марки РК; б — симметричный марки РД; в — спиральный марки РС.

флекс); 4 — полипропилен и его смеси; 5 — резины и 6 — неорганическая изоляция.

Например, марка РК-50-4-13 означает: РК — радиочастотный коаксиальный; 50 — волновое сопротивление, Ом; 4 — диаметр по изоляции, мм; 1 — изоляция из полиэтилена; 3 — номер конструкции кабеля.

При маркировке симметричных кабелей вместо диаметра по изоляции указывают максимальный диаметр кабеля по заполнению.

В отдельных группах кабелей цифры характеризуют волновое сопротивление (РКВ, РКЗ, ТКМ), передаваемую мощность (РКГ, РКПГ, РКС, РКСБ) или диаметры внутреннего и внешнего проводников (РКК, РККВ, РКМ, РКМО).

Б. Радиочастотные коаксиальные кабели

Изготавливаемые коаксиальные радиочастотные кабели можно подразделить на следующие группы: 1) со сплошной полиэтиленовой изоляцией — основная серия (конструкция); 2) с изоляцией из фторопласта — теплостойкие; 3) с резиновой изоляцией; 4) с воздушно-пластмассовой изоляцией.

Кабели РК со сплошной полиэтиленовой изоляцией имеют одно- или семипроволочный внутренний проводник, сплошную изоляцию из стабилизированного полиэтилена, внешний проводник в виде оплетки из медных проволок и оболочку из полиэтилена, поливинилхлорида или свинца.

Внешний вид кабеля РК со сплошной полиэтиленовой изоляцией приведен на рис. 1-41. Кабель допускает работу в интервале от -60 до $+85^{\circ}\text{C}$.

По волновому сопротивлению кабели изготавливаются трех видов: на 50, 75 и 100 Ом.

Мощные радиочастотные кабели обозначаются марками РКГ, РКПГ, РКС, РКСБ. К марке добавляется цифра, характеризующая допустимую мощность передачи в киловаттах. Например, кабель РКС-16 рассчитан на мощность передачи 10 кВт.



Рис. 1-41. Кабель РК со сплошной полиэтиленовой изоляцией.

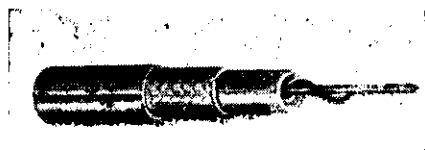


Рис. 1-42. Кабель РК с кордельно-трубчатой изоляцией.



Рис. 1-43. Кабель РК с колпачковой изоляцией.

Кабели РК могут иметь также сплошную изоляцию из фторопласта-4 и тогда они относятся к серии теплостойких кабелей, предназначенных для работы в интервале от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$. Изоляция накла-

дывается сплошным слоем из фторопластовых лент или наносится методом выпрессовывания.

Кабели изготавливаются на волновые сопротивления 50, 75 и 100 Ом.

Известен ряд конструкций радиочастотных коаксиальных кабелей с комбинированной воздушно-пластмассовой изоляцией. На рис. 1-42 показан кабель с кордельно-трубчатой изоляцией, а на рис. 1-43 — кабель с колпачковой изоляцией. Особо гибкие кабели имеют изоляцию в виде непрерывной спирали.

В. Радиочастотные симметричные кабели

Радиочастотным симметричным кабелям присвоено обозначение РД — радиочастотный двухпроводный — с добавлением порядкового номера конструкции.

Внутренние проводники изготавливаются из одной или семи скрученных медных проволок. Изоляция выполняется из кабельного или стабилизированного полиэтилена. Изолированные проводники размещают параллельно или скручивают. В кабелях РД-15, РД-16, РД-26 и пр. имеется индивидуальный экран на каждом проводнике и общий экран поверх параллельно уложенных проводников (рис. 1-44). Кабели РК-17 и РКБ-82 имеют общий экран, кабели РД-14, РД-18 и пр. изготавливаются без экранов. Снаружи кабели серии РД имеют, как правило, пластмассовую оболочку из поливинилхлорида или пигментированного полиэтилена.

Радиочастотным симметричным кабелям с изоляцией из политетрафторэтилена (фторопласта) присвоена марка РДТФ с добавлением порядкового номера конструкции (РДТФ-13, РДТФ-15, РДТФ-16, РДТФ-17). Оболочка этих кабелей выполнена из лент фторопласта и оплетки из стеклонитей, покрытых кремнийорганическими соединениями.

Кабели РДТФ предназначены для работы в диапазоне от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$.

Для симметричных вводов телевизионных приемников выпускается плоский кабель ленточного типа, маркируемый КАТВ (с поливинилхлоридной изоляцией) и КАПТ (с полиэтиленовой изоляцией), с волновым сопротивлением 75, 150 и 300 Ом.

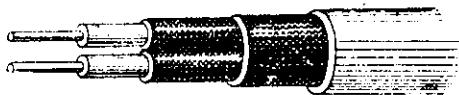


Рис. 1-44. Кабель РД с индивидуальными экранами.

Г. Радиочастотные спиральные кабели

Спиральными кабелями называются кабели, токонесущий проводник которых имеет спиралеобразную форму (рис. 1-45). Спиральные кабели могут быть коаксиальными и симметричными. Практическое применение получили преимущественно спиральные кабели коаксиальной конструкции, внутренний проводник которых выполнен в виде винтовой спирали.

Отличительной особенностью спиральных кабелей является значительная индуктивность, достигающая нескольких миллигенри на 1 м, что превышает индуктивность обычных кабелей в тысячи раз.

Наличие спиральности обуславливает появление продольного магнитного поля, направленного вдоль оси кабеля, в связи с чем резко возрастает общее магнитное поле и соответственно увеличивается индуктивность цепи. Чем с меньшим шагом навита спираль, тем сильнее магнитное поле и тем больше индуктивность. В силу этого спиральный кабель обладает высоким волновым сопротивлением ($z_w = \sqrt{L/C}$), а также малой скоростью распространения энергии вдоль кабеля ($v = 1/\sqrt{LC}$) и соответственно большим временем пробега электромагнитной волны ($T = \sqrt{LC}$).

Регулируя и изменяя число витков спирали, можно изменять по длине кабеля индуктивность и соответственно параметры z_w и T .

Указанные особенности определили соответствующие области применения спиральных радиочастотных кабелей. Спиральные кабели можно подразделить на три группы: 1) кабели согласования или высокоомные кабели, имеющие большое значение волнового сопротивления; 2) кабели задержки, обладающие способностью замедлять процесс передачи энергии по линии; 3) кабели трансформации с изменяющимся по длине волновым сопротивлением.

Из всей группы спиральных кабелей наибольшее практическое применение получили радиочастотные коаксиальные кабели задержки, маркируемые РС. Изготавливаемые в СССР радиочастотные спиральные кабели (кабели задержки) состоят из полиэтиленового сердечника диаметром 7 мм, внутреннего проводника из медной или медной эмалированной проволоки, наложенной в виде открытой спирали с определенным шагом, изоляции из полиэтилена, внешнего проводника из повива медных или медных эмалированных проволок и наружной оболочки из поливинилхлоридного пластика.

Диаметр кабелей РС составляет 13—26 мм; кабели изготавливаются на волновое сопротивление $z_w = 400$ Ом (для РС-400), 1200 Ом (для РС-1200) и 1600 Ом (для РС-1600).

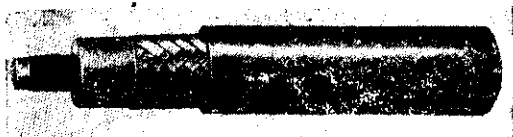


Рис. 1-45. Спиральный кабель задержки РС.

1-11. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

А. Провода с эмалевой изоляцией

Обмоточные провода можно подразделить на две основные группы: эмалированные провода и провода с волокнистой, пленочной и тому подобной изоляцией. Эмалевая изоляция имеет очень небольшую толщину и обладает лучшими электроизоляционными свойствами в сравнении с различной волокнистой изоляцией. Поэтому производство эмалированных проводов быстро растет, так как имеется стремление постепенно заменять ими провода с волокнистой изоляцией, несмотря на повышенную эксплуатационную надежность последних.

Для эмалированных проводов имеет весьма существенное значение механическая прочность изоляции. С этой точки зрения эмалированные провода можно разделить на нормальнопрочные (на масляно-смоляных лаках) и высокопрочные (на ряде синтетических лаков).

Существенное значение имеет также нагревостойкость эмалевой изоляции. Она определяется изменением электроизоляционных и физико-механических свойств эмалевой изоляции в зависимости от длительности пребывания при повышенных температурах и в первую очередь изменением в этих условиях электрической прочности и эластичности эмалевых пленок.

В табл. 1-16 приведена классификация по нагревостойкости эмалированных проводов основных типов. Нагревостойкость эмалевых пленок на алюминиевой проволоке значительно выше, чем на медной. По результатам исследований алюминиевые эмалированные

Таблица 1-16

Классификация эмалированных проводов по нагревостойкости

Класс нагревостойкости	Длительно допускаемая рабочая температура, °C	Тип изоляции эмалированных проводов
А	105	1. С изоляцией винифлекс (ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭВА и т. п.) 2. С изоляцией металвин (ПЭМ-1, ПЭМ-2) 3. С полиамидно-резольной изоляцией (ПЭЛР-1, ПЭЛР-2, ПЭЛРА) 4. С изоляцией на масляно-смоляной основе (ПЭЛ)
Е	120	С полиуретановой изоляцией (ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2)
В	130	С полиэтилентерефталатной изоляцией (марки ПЭТВ, ПЭТВ-939, ПЭТВ-ТС, ПЭТВА)
Г	155	С полиимидоэфирной изоляцией
Н	180	С изоляцией на гидантоиновой и полипирролидоновой основах
С	Выше 180	С изоляцией на полиимидной основе (ПЭТ-имид и ПНЭТ-имид)

провода на поливинилацеталевых лаках по нагревостойкости можно отнести к классу Е, а на полиэфирных лаках — к классу F. Вероятно, при повышенных температурах на старение эмалевой изоляции оказывает влияние каталитическое действие Cu_2O и CuO на поверхности меди. Это отчасти подтверждается повышенной нагревостойкостью эмалевой изоляции при применении медной никелированной проволоки. Имеет также значение и разница температурных коэффициентов линейного расширения эмалевых пленок и медной или алюминиевой проволоки. Для меди эта разница несколько больше, чем для алюминия, и поэтому в процессе теплового старения, когда эмалевые пленки постепенно теряют свою эластичность, внутренние напряжения в эмали медных проводов будут значительно больше, чем алюминиевых, что и приводит к появлению в эмали мелких трещин.

Провода с эмалевой изоляцией на масляно-смоляных лаках (ПЭЛ) обладают достаточно высокими электроизоляционными свойствами и имеют в то же время ограниченную нагревостойкость и механическую прочность эмалевой изоляции, а также нестойкость ее против таких растворителей лаков, как бензол, крезол, толуол и т. п. По водостойкости провода с этой эмалевой изоляцией уступают проводам на поливинилацеталевых и полиэфирных лаках.

Медные провода с эмалевой изоляцией на поливинилацеталевых лаках (лак винифлекс, провода ПЭВ-1 и ПЭВ-2, и лак металвин, провода ПЭМ-1 и ПЭМ-2) по нагревостойкости относятся к классу А, хотя и существенно превосходят в этом отношении провода на масляно-смоляных лаках. Поливинилацеталевые эмалированные провода обладают весьма высокими механической прочностью и эластичностью эмалевой изоляции, повышенной лакостойкостью и стойкостью против различных растворителей. Поэтому эти провода применяются для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов без дополнительной защитной обмотки волокнистыми материалами.

По электроизоляционным свойствам, механической прочности, эластичности и нагревостойкости провода винифлекс и металвин примерно равноценны, по лакостойкости (точнее по бензолостойкости), а также по водо- и маслостойкости провода на лаке металвин несколько превосходят провода винифлекса. По стойкости к спирто-толуольной смеси эта разница менее ощутима. Поэтому провода металвин в последнее время рекомендуются для применения при изготовлении транспонированных обмоточных проводов для мощных трансформаторов, обмотки которых должны обладать достаточно высокой маслостойкостью.

До последнего времени на отдельных заводах изготавливаются высокопрочные эмалированные провода на полиамидно-резольном лаке ПЛ-2 (ПЭЛР-1 и ПЭЛР-2). По эластичности, механической прочности, лакостойкости и нагревостойкости эмалевой изоляции эти провода близки к проводам на поливинилацеталевых лаках, однако они значительно уступают последним по электроизоляционным свойствам ($\text{tg } \delta$, ρ_v), в особенности при повышенных температурах и влажности. Эти провода применяют и в общем электромашиностроении.

Провода с эмалевой изоляцией на полиуретановых лаках (ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2) представляют значительный интерес для электроприборостроения и радиотехнической промышленности благодаря хорошим электроизоляционным свойствам и высокой нагре-

востойкости (класс Е). Основное преимущество этих проводов заключается в возможности их лужения без зачистки эмали путем погружения на короткое время облуживаемых концов в расплавленное олово или его сплавы. Однако при повышенных температурах (выше 170—180 °С) полиуретановая эмаль становится термопластичной, что при повышенном давлении в пазах электрических машин может приводить к межвитковым замыканиям.

Кроме того, при повышенных температурах наблюдается значительное уменьшение массы и толщины эмалевой изоляции. Поэтому применение этих проводов для обмоток электрических машин средних и больших мощностей нецелесообразно.

Среди проводов массового производства наиболее нагревостойкими являются провода ПЭТВ на полиэфирном лаке ПЭ-943, разработанном в ВЭИ. По длительной нагревостойкости эти провода относятся к классу В. Исследования показали также возможность их эксплуатации в течение 500 ч при 200 °С.

Для полиэфирных проводов чувствительным является тепловой удар, т. е. кратковременное (около 1 ч) воздействие повышенной температуры на деформированные (предварительно навитые на стержень) образцы. Если провод навит на стержень диаметром в n раз большим, чем диаметр голой проволоки d , то максимальное удлинение эмалевой пленки Δl , % будет равно:

$$\Delta l\% = \frac{[\pi(n+2)d + 2\Delta] - [\pi(n+1)d + \Delta]}{\pi(n+1)d + \Delta} 100 = \frac{(d + \Delta) 100}{(n+1)d + \Delta}, \quad (1-4)$$

где Δ — двойная толщина эмалевой изоляции.

Для эмалированных проводов диаметром более 0,38 мм значение Δ значительно меньше d и, следовательно,

$$\Delta l\% \approx \frac{1}{n+1} 100. \quad (1-5)$$

В соответствии с ОСТ 16.505.001-70 для медных проводов с эмалевой изоляцией на основе полиэфиров всех марок значение n установлено при испытательной температуре 200 ± 5 °С в пределах 8—12, т. е. значительно большее, чем для других эмалированных проводов.

Эмалированные провода ПЭТВ-939 (на полиэфирном лаке ПЭ-939) по своим характеристикам весьма близки к проводам на лаке ПЭ-943, а в отношении теплового удара даже несколько превосходят последние. Меньшая чувствительность этих проводов к тепловому удару достигается дополнительной перекрестификацией глициерином смолы лавсан.

Изготавливаются также эмалированные провода ПЭТВ-ТС диаметром 0,41—1,95 мм из расплава полиэфирной смолы марки ТС без применения растворителей. На эти провода распространяется также ОСТ 16.505.001-70.

Для бескаркасных обмоток в СССР и за рубежом изготавливают эмалированные провода с дополнительным термопластичным слоем. Для склеивания и запекания рамок из таких проводов достаточна выдержка их в течение 10—15 мин при 120—150 °С. Наружный диаметр этих проводов (ПЭВД) примерно на 0,005—0,007 мм больше, чем у проводов ПЭВ-2.

Кроме того, в СССР начато производство проводов с дополнительным термореактивным покрытием (ПЭТВТР). Это покрытие при нагревании сначала несколько размягчается и склеивает витки обмотки. При дальнейшем нагревании дополнительное покрытие отверждается. Провода ПЭТВТР по нагревостойкости относятся к классу В.

Самыми нагревостойкими являются эмалированные провода на полиимидной основе. Эти провода могут изготавливаться диаметром 0,10—2,44 мм двух марок: ПЭТ-имид с медной жилой и ПНЭТ-имид с медной никелированной жилой. Они предназначены для эксплуатации при нагреве до 220 °С; провода ПНЭТ-имид некоторое время могут работать и при более высокой температуре (до 300 °С), причем сроки эксплуатации при 220 °С и выше обычно устанавливаются самими потребителями на основе результатов предварительных испытаний этих проводов в соответствующих изделиях.

Технология изготовления полиимидных лаков весьма сложна и связана с применением дорогостоящих материалов. Поэтому производство их пока ограничено. Широкое применение как у нас, так и за рубежом находит полиэфироимидный эмаль-лак, в рецептуре которого полиимиды составляют сравнительно небольшую часть. Провода на этих лаках (ПЭТ-155 А) по нагревостойкости относятся к классу F и могут изготавливаться диаметром 0,06—2,44 мм с толщиной изоляции, как и у проводов ПЭВ-2.

Для изготовления эмалированных проводов, которые по нагревостойкости можно отнести к классу H, некоторыми зарубежными фирмами рекомендуются лаки на гидантоиновой и полипирролидовой основах.

Б. Обмоточные провода с волокнистой и пленочной изоляцией

Ассортимент этих проводов весьма обширен. В табл. 1-17 приведены классификация, маркировка, диапазоны размеров токопроводящих жил и класс нагревостойкости основных конструкций этих проводов. Производство круглых алюминиевых проводов нормировано только начиная с диаметров 1,35—1,62 мм из-за трудностей обмотки более тонкой алюминиевой проволоки.

До последнего времени при изготовлении обмоточных проводов малых сечений расходуются значительное количество натурального шелка, одно из основных преимуществ которого — малая толщина обмотки (для однослойной обмотки $D-d \approx 0,06$ мм). Долгое время единственным заменителем его являлось капроновое волокно (провода ПЭЛШКО). Теперь заменителем является и лавсановое волокно (провода ПЭВЛО), при применении которого качество проводов, в частности их нагревостойкость, значительно повышается.

Для изготовления обмоток электрических машин повышенных рабочих напряжений применяются провода с пленочной изоляцией. Долгое время основными для этого являлись провода марки ППТБО (изоляция из двух слоев триацетатной пленки, слоя телефонной бумаги и слоя хлопчатобумажной пряжи). В настоящее время триацетатная пленка, которая имеет невысокую механическую прочность, заменяется лавсановой пленкой (провода ППЛБО). Возможно также изготовление проводов с изоляцией из одной лавсановой пленки. В этом случае отпадает необходимость применения хлоп-

Таблица 1-17

Обмоточные провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией

Тип изоляции провода	Марка провода	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Толщина изоляции, мм ($D-b$) для круглых и ($B-b$) для прямоугольных проводов	Класс нагревостойкости
Провод, изолированный двумя обмотками хлопчатобумажной пряжей	ПБД	Круглые диаметром 0,38—5,2 Прямоугольные $a = 0,9 \div 5,5$ $b = 2,1 \div 15,0$	0,22—0,33 0,27—0,44	A
Провод, изолированный эмалью на масляно-смоляной основе и одной обмоткой хлопчатобумажной пряжей	ПЭЛБО	Круглые диаметром 0,38—2,1	0,17—0,22	A
Провод, изолированный эмалью на масляно-смоляной основе и одной обмоткой натуральным шелком	ПЭЛШО	Круглые диаметром 0,05—1,56	0,08—0,16	A
Провод, изолированный высокопрочной эмалью (винифлекс или металвин) и одной обмоткой волокном лавсан	ПЭВЛО	Круглые диаметром 0,06—1,3	0,09—0,17	A
Провод, изолированный несколькими слоями обмотки из телефонной или кабельной бумаги	ПБ	Круглые диаметром 1,20—2,10 2,26—5,2 Прямоугольные $a = 1,0 \div 5,6$ $b = 3,0 \div 19,6$	0,30—1,2 0,30—5,76 0,45—1,92	A
Провод, изолированный несколькими слоями кабельной бумаги марки КВУ	ПБУ	Прямоугольные $a = 1,80 \div 5,6$ $b = 6,7 \div 22,0$	2,0—4,4	A
Провод, изолированный тремя лавсановыми пленками и одной обмоткой хлопчатобумажной пряжи	ППЛБО	Прямоугольные $a = 0,9 \div 5,5$ $b = 2,1 \div 14,5$	0,38—0,53	A
Провод, изолированный двухслойной обмоткой стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком	ПСД	Круглые диаметром 0,31—5,2 Прямоугольные $a = 0,9 \div 5,5$ $b = 2,1 \div 12,5$	0,23—0,33 0,27—0,4	F

Тип изоляции провода	Марка провода	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Толщина изоляции, мм ($D-b$) для круглых и ($B-b$) для прямоугольных проводов	Класс нагревостойкости
Провод, изолированный двухслойной обмоткой стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя кремнийорганическим лаком	ПСДК	Круглые диаметром 0,31—5,2	0,23—0,33	Н
		Прямоугольные $a = 0,9 \div 5,5$ $b = 2,1 \div 12,5$	0,27—0,4	
Провод, изолированный двухслойной обмоткой утоньшенным стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком	ПСДТ	Круглые диаметром 0,31—2,1	0,18—0,23	Ф
Провод, изолированный двухслойной обмоткой утоньшенным стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя кремнийорганическим лаком	ПСДКТ	Круглые диаметром 0,31—2,10	0,14—0,22	Н
		Прямоугольные $a = 0,9 \div 4,4$ $b = 2,10 \div 10,0$	0,22 0,26—32	

чатобумажной пряжи, снижается толщина изоляции и в то же время повышается ее электрическая прочность.

Основными конструкциями обмоточных проводов повышенной нагревостойкости являются провода с дельта-асбестовой и стекловолокнистой изоляцией. Первые провода (марка ПДА, класс нагревостойкости Ф) по сравнению с проводами со стекловолокнистой изоляцией обладают пониженными электроизоляционными свойствами, и поэтому их производство в последнее время значительно сокращается.

Основные конструкции обмоточных проводов со стекловолокнистой изоляцией приведены в табл. 1-17. Эти провода обладают достаточно высокой эксплуатационной надежностью и нагревостойкостью. В частности, провода ПСДКТ пригодны для эксплуатации в течение 300—400 ч при 300°C и 25—50 ч при 400°C.

Провода ПСДК, имеющие большую толщину изоляции, естественно, обладают одновременно и высокой нагревостойкостью, и поэтому могут эксплуатироваться при этих температурах более длительное время.

Нагревостойкость проводов подобного типа значительно повышается, если поверхность медного проводника защищается от окисления гальванически нанесенным слоем никеля толщиной 3—5 мкм (провода ПНСДК и ПНСДКТ) и применением жаростойких пропитывающих составов (провода ПОЖ, ПОЖБ и т. п.).

Никелирование повышает устойчивость медных жил против окисления и увеличения в связи с этим активного сопротивления при 250 °С и выше. Кроме того, при повышенных температурах на поверхности токопроводящих жил происходит образование пористого слоя из окислов никеля, что увеличивает адгезию стекловолнистой изоляции к поверхности проволоки.

Перспективным является применение вновь разработанного стекловолни на алюмомагнезиальной основе, обладающего повышенными механической прочностью и нагревостойкостью в сравнении с обычным алюмоборосиликатным стекловолни, и в особенности кварцевых нитей, состоящих из тонких элементарных кварцевых волокон (диаметром 5—7 мкм). При применении этих волокон принципиально можно создать конструкции обмоточных проводов, которые определенное время могут работать при 1000 °С.

Глава вторая

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАБЕЛЯ

2-1. ОБЩИЕ ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК РАСЧЕТА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Основной задачей расчета и конструирования силовых кабелей является создание конструкций, надежных в работе и экономичных по использованию материалов.

Для расчета кабеля должны быть заданы передаваемая мощность и рабочее напряжение кабельной линии, режим изменения нагрузки в линии, значения и характер возможных перенапряжений и токов короткого замыкания, а также условия прокладки кабеля по длине линии.

Современные изоляционные материалы обладают высокой электрической прочностью, поэтому толщина изоляции кабелей на напряжение ниже 6 кВ выбирается, главным образом, из соображений механической прочности изоляции. В таких кабелях производятся лишь поверхностные расчеты электрической прочности изоляции.

В кабелях повышенного напряжения тепловые расчеты тесно связаны с электрическими, так как энергия электрического поля, частично рассеиваясь в диэлектрике, переходит в тепло, что вызывает нагревание кабеля. В свою очередь нагревание снижает электрическую прочность изоляции и увеличивает ее $\text{tg } \delta$.

Общая схема расчета кабеля может быть представлена в следующем порядке.

1. Выбор сечения и конструкции жилы кабеля на основании имеющихся данных для подобных конструкций кабеля, предназначенных для заданной нагрузки и условий прокладки.

2. Выбор допустимой рабочей напряженности электрического поля в изоляции и расчет толщины изоляции.

3. Расчет допустимой нагрузки для выбранного сечения кабеля с учетом выделяемого тепла в жиле, изоляции, оболочках и броне при заданных условиях прокладки и режиме нагрузки во времени.

Далее производится корректировка сечения токопроводящей жилы, если это оказывается необходимым, и новый, поверочный расчет.

Для кабелей высокого напряжения необходимо производить расчет условий, при которых может возникнуть тепловой пробой кабеля.

Все более широкое применение находит искусственное охлаждение кабелей высокого напряжения путем пропускания вдоль кабеля потока охлаждающего масла, воды, жидкого азота и других хладагентов. В этом случае расчет допустимой нагрузки должен производиться с учетом системы искусственного охлаждения.

2.2. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕПЛОВОГО ПОЛЕЙ В КАБЕЛЕ

В общем случае при переменном токе должны рассматриваться электромагнитные процессы в изоляции кабеля. Из теории электротехники известно, что если длина волны в изоляции значительно больше диаметра кабеля, то электрическое и магнитное поля можно рассматривать отдельно. При этом для потенциала U электрического поля в изоляции применимо уравнение Пуассона

$$\nabla^2 U + Q/\varepsilon\varepsilon_0 = 0, \quad (2-1)$$

где Q — заряд единицы объема изоляции, Кл;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума;

∇^2 — оператор Лапласа;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

При постоянной нагрузке в кабеле имеет место стационарное тепловое поле, при этом для температуры T в изоляции может быть записано уравнение

$$\nabla^2 T + q/\lambda = 0, \quad (2-2)$$

где q — количество тепла, выделяющегося за единицу времени в единице объема диэлектрика; λ — теплопроводность диэлектрика.

При переменной нагрузке необходимы расчеты переходных тепловых процессов в кабеле, для которых справедливо уравнение

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2-3)$$

где $a = \lambda/c$ (c — теплоемкость единицы объема изоляции).

При расчете электрического и теплового полей в кабеле находят применение в основном три указанных уравнения, которые справедливы при постоянных значениях ϵ , λ и c .

Оператор Лапласа в цилиндрических координатах, наиболее удобных при вычислении электрического и теплового полей в кабелях, имеет следующий вид:

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}. \quad (2-4)$$

В частном случае, который имеет место в одножильных кабелях, потенциал зависит только от расстояния от центра кабеля. Оператор Лапласа будет иметь вид:

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right). \quad (2-5)$$

Если в изоляции нет объемных зарядов и не выделяется тепло, то для электрического и теплового полей будет справедливо уравнение Лапласа

$$\nabla^2 U = 0, \text{ или } \nabla^2 T = 0. \quad (2-6)$$

Как правило, температуру оболочки можно считать постоянной во всех точках по окружности. В этом случае при заданном потенциале или температуре на жиле и оболочке получим одинаковую картину электрического и теплового полей. Поэтому при тепловом расчете можно использовать решения, найденные для электрического поля.

2-3. РАДИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И ТЕПЛОВОЕ ПОЛЯ В ОДНОЖИЛЬНОМ КАБЕЛЕ

Распределение потенциала в электрическом поле может быть получено при решении (2-6)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) = 0.$$

Так как потенциал зависит только от радиуса, знак частной производной можно заменить знаком обычной производной. Интегрируя это уравнение, получаем:

$$rdU/dr=A, \quad (2-7)$$

где A — постоянная интегрирования.

При $r=r_0$ $U=U_0$,

где r_0 — радиус жилы;

U_0 — потенциал жилы.

Если потенциал оболочки принять равным нулю, то после интегрирования (2-7) получим:

$$A=-U_0/\ln \frac{R}{r_0}, \quad (2-8)$$

где R — радиус кабеля по изоляции.

Подставляя выражение A в (2-7) и учитывая, что $E=-dU/dr$, получаем:

$$E=U_0/r \ln \frac{R}{r_0}. \quad (2-9)$$

Уравнение (2-9) справедливо лишь при постоянных электрических параметрах среды. Если среда будет неоднородной, то для простейшего случая радиального поля можно не решать общие сложные уравнения, а получить расчетные формулы более простым способом.

Изоляционная среда характеризуется диэлектрической проницаемостью ϵ и удельным объемным сопротивлением $\rho_V=1/\gamma$, где γ — проводимость. В неоднородной среде в первый момент после включения постоянного напряжения напряженность поля распределяется в соответствии с диэлектрическими проницаемостями неоднородностей. С течением времени на границах неоднородностей появляются поверхностные заряды, процесс накопления которых вызывает ток абсорбции. В установившемся режиме напряженность постоянного электрического поля распределяется в соответствии с проводимостями неоднородностей.

Постоянная времени переходного процесса накопления зарядов внутри изоляции зависит главным образом от электрических свойств, а также от формы и размеров неоднородностей и по порядку величины совпадает с произведением $\epsilon \rho_V$ для изоляции.

При переменном напряжении, если постоянная времени значительно больше полупериода ($\epsilon \rho_V \gg 1/(2f)$),

объемные заряды не успевают накапливаться, и напряженность поля распределяется в соответствии с ϵ , а при $\epsilon\epsilon_0\nu \ll 1/(2f)$ процесс накопления зарядов успевает завершиться полностью, и напряженность поля распределяется в соответствии с проводимостями (при постоянном токе). Если $\epsilon\epsilon_0\nu \approx 1/(2f)$, то необходимо исследовать неустановившийся режим накопления зарядов внутри диэлектрика. Но такой случай в силовых кабелях (при промышленной частоте) может иметь место только в полупроводящей среде.

Таким образом, в первом случае имеет место соотношение

$$D = \epsilon\epsilon_0 E = -\epsilon\epsilon_0 dU/dr, \quad (2-10)$$

где D — электрическое смещение.

Во втором случае

$$j = \gamma E = -\gamma dU/dr, \quad (2-11)$$

где j — плотность тока в изоляции;

γ — удельная электрическая проводимость изоляции.

Наконец, для теплового поля можно записать:

$$-\lambda d\tau/dr = q, \quad (2-12)$$

где $\tau = T - T_{об}$ — превышение температуры в изоляции над температурой оболочки ($T_{об}$ — температура оболочки);

q — поток тепла через единицу поверхности в единицу времени. Очевидно, что

$$D \sim j \sim q, \quad \epsilon\epsilon_0 \sim \gamma \sim \lambda$$

и

$$d\tau/dr \sim E, \quad U \sim T. \quad (2-13)$$

Соответственно для уравнений (2-10) — (2-12) можно записать интегральные соотношения:

$$\oint_S D ds = Q; \quad (2-14)$$

$$\oint_S j dS = I; \quad (2-15)$$

$$\oint_S q dS = Q_t, \quad (2-16)$$

где S — замкнутая поверхность;

Q — заряд внутри поверхности S ;

I — общее число зарядов, вытекающих из объема, ограниченного поверхностью S (общий ток утечки);

Q_t — общее количество тепла, выделяющееся внутри объема, ограниченного поверхностью S .

При решении (2-14) будем предполагать, что диэлектрик не имеет объемных зарядов, а при решении (2-16) — что он не имеет источников тепла.

Выберем поверхность S в виде концентрического цилиндра с образующей, равной единице длины кабеля. Если поле радиально, то на цилиндрической поверхности значения D , j и q будут постоянными и могут быть вынесены за знак интеграла. При этом решения (2-14) — (2-16) можно получить в следующем виде:

$$-dU/dr = E = Q/(2\pi r \epsilon \epsilon_0); \quad (2-17)$$

$$-dU/dr = E = I/(2\pi r \gamma); \quad (2-18)$$

$$-d\tau/dr = p_{ж}/(2\pi r \lambda), \quad (2-19)$$

где Q — заряд;

I — общий ток утечки от жилы через изоляцию;
 $p_{ж} = Q_t$ — потери энергии в жиле.

Все значения относятся к единице длины кабеля.

Уравнения для всех трех полей одинаковы, поэтому с учетом аналогии (2-13) достаточно привести решение для одного из этих случаев.

Проинтегрируем (2-17) и подставим в качестве пределов радиусы по жиле и изоляции. Получим соотношение между зарядом на жиле и ее потенциалом:

$$U_0 = \frac{Q}{2\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{\epsilon \epsilon_0 r}. \quad (2-20)$$

Подставив выражение для Q из (2-20) в (2-17), получим:

$$E = U_0 \left/ \left(r_s \int_{r_0}^R \frac{dr}{r_s} \right) \right. \quad (2-21)$$

и для емкости кабеля

$$C = \frac{Q}{U_0} = 2\pi \epsilon_0 \left/ \int_{r_0}^R \frac{dr}{r_s} \right. \quad (2-22)$$

При $\epsilon = \text{const}$ емкость кабеля вычисляется по формуле

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 / \ln \frac{R}{r_0}. \quad (2-23)$$

Проинтегрировав (2-18), получим формулы для кабеля постоянного тока:

$$E = U_0 \left| \left(\gamma r \int_{r_0}^R \frac{dr}{\gamma r} \right) \right|; \quad (2-24)$$

$$R_{\text{из}} = \frac{U_0}{I} = \frac{1}{2\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{\gamma r}, \quad (2-25)$$

а при $\gamma = \text{const}$ сопротивление изоляции на единицу длины кабеля

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\gamma} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (2-26)$$

Для теплового поля из (2-19) при $\lambda = \text{const}$ следует:

$$\tau_{\text{ж}} = \frac{\rho_{\text{ж}}}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (2-27)$$

где $\tau_{\text{ж}}$ — превышение температуры жилы над температурой оболочки.

В соответствии с (2-27) можно ввести понятие о тепловом законе Ома:

$$\tau_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} S_{\text{из}}, \quad (2-28)$$

где $\tau_{\text{ж}}$ — соответствует напряжению;

$\rho_{\text{ж}}$ — току;

$S_{\text{из}}$ — сопротивлению.

Из (2-27) следует, что тепловое сопротивление кабеля равно:

$$S_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (2-29)$$

Из (2-19) можно получить зависимость температуры в изоляции от радиуса

$$\tau = \frac{\rho_{\text{из}}}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r}. \quad (2-30)$$

Таким образом, к (2-13) после сравнения уравнений (2-23), (2-26) и (2-29) можно добавить:

$$1/C \sim R_{\text{из}} \sim S_{\text{из}}. \quad (2-31)$$

Параметр $\ln \frac{R}{r_0}$ можно рассматривать как геометрический коэффициент (фактор) G , который зависит только от конфигурации электродов.

Из теории поля известно, что если поле подчиняется уравнению Лапласа, то при любой конфигурации электродов для однородной среды геометрический коэффициент будет одинаковым для электрического смещения, проводимости, а также для теплового поля.

При этом достаточно знать одну из величин (2-31), чтобы рассчитать обе другие.

Если изоляционная среда неоднородна, то геометрический фактор будет одинаковым при условии, что зависимость параметров среды от радиуса будет одинаковой.

2-4. ГРАДИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

В соответствии с (2-9) в однородной изоляции напряженность электрического поля у жилы максимальна и убывает по направлению к оболочке. В этом случае имеет место полное использование запаса электрической прочности изоляции, которое может быть количественно оценено коэффициентом использования изоляции:

$$\eta = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{макс}}} = \frac{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}{(R - r_0)} = \frac{\ln}{(N - 1)}, \quad (2-32)$$

где $N = R/r_0$;

$E_{\text{ср}}$ — средняя напряженность поля в кабеле, которая имела бы место в конденсаторе с плоскопараллельными электродами и толщиной изоляции $\Delta = R - r_0$.

В большинстве случаев толщина изоляции кабеля определяется максимально допустимой рабочей напряженностью поля E_p . При этом значение N может быть определено по формуле, которая следует из (2-9),

$$N = \frac{R}{r_0} = e^{U/r_0 E_p}. \quad (2-33)$$

Из (2-21) и (2-24) следует, что при соотношении $er = \text{const}$ (переменное напряжение) или $ur = \text{const}$ (постоянное напряжение) напряженность поля будет постоянной и равной $E_{\text{ср}} = U_0/(R - r_0)$. При этом толщина изоляции будет минимальной, а коэффициент использования равен 1.

Практически при переменном напряжении уменьшение ε с увеличением радиуса производится ступенями. Такая изоляция называется градирированной. При двухслойном градирировании интеграл в (2-21) можно разделить на два с пределами от r_0 до r_1 , и от r_1 до R , в которых ε_1 и ε_2 будут постоянными. После интегрирования получим уравнение

$$E = U / \left[\varepsilon r \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right) \right], \quad (2-34)$$

из которого следует, что напряженности полей в начале первого и второго слоев будут равны:

$$E_1 = U / \left[\varepsilon_1 r_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right) \right] \quad (2-35)$$

и

$$E_2 = U / \left[\varepsilon_2 r_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right) \right]. \quad (2-36)$$

Разделив (2-35) на (2-36), получим:

$$r_1 = r_0 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{E_1}{E_2} = r_0 k f, \quad (2-37)$$

где ε_1 и ε_2 — относительные диэлектрические проницаемости первого и второго слоев;

E_1 и E_2 — рабочие напряженности для изоляции первого и второго слоев;

$$k = \varepsilon_1 / \varepsilon_2; f = E_1 / E_2.$$

Поставим r_1 из (2-37) в (2-35). После алгебраических преобразований при решении этого уравнения получим:

$$N = R / r_0 = k f e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U}{r_0 E_1} - \ln k f \right)}. \quad (2-38)$$

Если мы имеем слоистую изоляцию, состоящую из n слоев (рис. 2-1) с диэлектрическими проницаемостями соответственно $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и т. д., то из (2-21) можно получить зависимости напряженности поля и емкости от радиуса

$$E = U / \left[\varepsilon r \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_n} \ln \frac{R}{r_{n-1}} \right) \right]; \quad (2-39)$$

$$C = 2\pi\varepsilon_0 \left/ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} \right. \quad (2-40)$$

Будем исходить из условия равнопрочности каждого слоя, причем электрическую прочность будем определять по максимальной напряженности поля, которая имеет место в начале слоя.

Примем допустимую (расчетную) максимальную напряженность поля в каждом слое $E_1, E_2, E_i, \dots, E_n$ и введем обозначения

$$f_i = E_1/E_{i+1} \text{ и} \\ \epsilon_i/\epsilon_{i+1} = k_i. \quad (2-41)$$

Так как выражение в круглых скобках в уравнении (2-39) имеет постоянное значение, то можно получить:

$$\frac{E_i}{E_{i+1}} = \frac{\epsilon_{i+1} r_i}{\epsilon_i r_0} \quad \text{или} \quad r_i = f_i k_i r_0 \quad \text{и} \quad \frac{r_{i+1}}{r_i} = \frac{k_{i+1} f_{i+1}}{k_i f_i}. \quad (2-42)$$

При этом на границе в начале каждого слоя будем иметь расчетную напряженность поля, соответствующую этому слою.

После подстановки (2-42) в (2-39) и алгебраических преобразований можно получить:

$$N = k_{n-1} f_{n-1} \exp \frac{1}{k_{n-1}} \left[\frac{U}{r_0 E_1} - \ln f_1 k_1 - \right. \\ \left. - k_1 \ln \frac{f_2 k_2}{f_1 k_1} - \dots - k_{n-1} \ln \frac{f_{n-1} k_{n-1}}{f_{n-2} k_{n-2}} \right]. \quad (2-43)$$

Очевидно, что градирование имеет смысл лишь при условиях

$$f_i k_i > 1 \quad \text{и} \quad \frac{f_{i+1} k_{i+1}}{f_i k_i} > 1, \quad (2-44)$$

что следует из (2-42).

В отечественной практике кабели с пропитанной бумажной изоляцией градируются в два слоя, так как диапазон плотности бумаги лежит в пределах 1200—

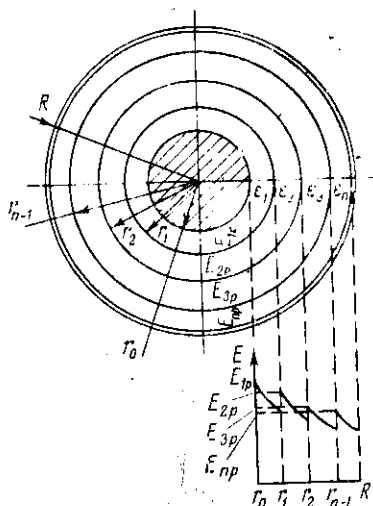


Рис. 2-1. Расположение слоев изоляции при градировании.

850 кг/м³, а допуск на плотность бумаги составляет 50 кг/м³. При этом в пропитанной бумаги с наибольшей плотностью составляет 4,3, а с наименьшей 3,5.

Пример 2-1. Рассчитать радиус кабеля по изоляции, если радиус жилы $r_0 = 12,2$ мм, допустимая рабочая напряженность поля $E_p = 12,5$ МВ/м и номинальное напряжение кабеля 220 кВ.

По (2-33) рассчитываем радиус по изоляции:

$$R = r_0 e^{U/r_0 E_p} = 12,2 e^{220/\sqrt{3} \cdot 12,2 \cdot 12,5} = 28,1 \text{ мм.}$$

Пример 2-2. Рассчитать радиус кабеля по изоляции, если она состоит из двух слоев. Первый слой имеет $\epsilon_1 = 4,3$, $E_1 = 9,2$ МВ/м. Второй слой $\epsilon_2 = 3,5$, $E_2 = 8,6$ МВ/м. Радиус жилы $r_0 = 12,2$ мм. Номинальное напряжение кабеля 220 кВ.

Рассчитываем предварительно величины $k = \epsilon_1/\epsilon_2$ и $f = E_1/E_2$:

$$k = 4,3/3,5 = 1,23; f = 9,2/8,6 = 1,064.$$

Далее по (2-38) получим:

$$R = 12,2 \cdot 1,064 \cdot 1,23 e^{\frac{1}{1,23} \left(\frac{220}{\sqrt{3} \cdot 12,2 \cdot 9,2} - \ln 1,23 \cdot 1,064 \right)} = 32,3 \text{ мм.}$$

Толщина изоляции $\Delta = R - r_0 = 32,3 - 12,2 = 20,1$ мм.

На рис. 2-2 построены зависимости напряженности поля от радиуса, рассчитанные по данным примеров 2-1, из которых видно, что использование во вто-

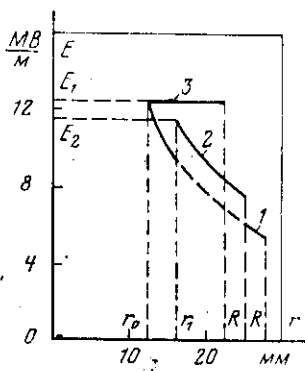


Рис. 2-2. Зависимость напряженности электрического поля от радиуса.

1 — для неградированной изоляции; 2 — для градированной изоляции; 3 — для однородного поля.

ром слое бумаги с уменьшенной диэлектрической проницаемостью приводит к возрастанию электрического поля в этом слое. Площадь под кривой зависимости напряженности поля от радиуса равна напряжению, приложенному к кабелю ($220/\sqrt{3}$ кВ), что легко показать прямым интегрированием при использовании уравнения (2-21). Поэтому очевидно, что при постоянной напряженности поля (прямая 3 на рис. 2-2) толщина изоляции будет наименьшей. При градировании наибольший эффект достигается при большом соотношении радиусов

R/r_0 , так как при малом соотношении радиусов неравномерность поля невелика и выравнивание поля при градировании лишь незначительно сказывается на уменьшении толщины изоляции.

2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В КАБЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В нагруженном кабеле температура в изоляции зависит от радиуса. В кабелях постоянного тока выделение тепла в изоляции невелико по сравнению с потерями в жиле, поэтому зависимость температуры в изоляции от радиуса может быть выражена уравнением (2-30).

Проводимость изоляции в определенных пределах с увеличением температуры возрастает по экспоненциальному закону. Кроме того, проводимость изоляции обычно возрастает с увеличением напряженности электрического поля. Приблизительно зависимость проводимости от напряженности поля можно выразить степенной функцией.

В общем случае закон изменения проводимости в удобной для расчетов форме можно представить в виде:

$$\gamma = \gamma_R e^{a\tau} (E/E_R)^k, \quad (2-45)$$

где τ — превышение температуры в изоляции над температурой оболочки;

k и a — постоянные для данной изоляции коэффициенты;

γ_R — проводимость изоляции у оболочки;

E_R — напряженность поля в изоляции у оболочки.

Из (2-24) можно получить соотношение

$$E/E_R = \gamma_R R / (\gamma r). \quad (2-46)$$

При подстановке в (2-45) соотношения (2-46) и τ из (2-30) получим:

$$\gamma = \gamma_R \left(\frac{\gamma_R R}{\gamma r} \right)^k e^{\frac{a p_m}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r}},$$

решая далее относительно γ найдем:

$$\gamma = \gamma_R (R/r)^m, \quad (2-47)$$

где

$$m = (k + b) / (k + 1); \quad b = p_m a / (2\pi\lambda).$$

В кабеле постоянного тока напряженность поля выражается уравнением (2-24); подставляя (2-47) в (2-24) и интегрируя, получаем:

$$E = Umr^{m-1}/(R^m - r_0^m). \quad (2-48)$$

В слабо нагруженном кабеле $b < 1$ и, следовательно, $m < 1$. При этом наибольшая напряженность поля будет у жилы. В сильно нагруженном кабеле b может быть больше единицы и тогда $m > 1$. В этом случае наибольшая напряженность поля будет у оболочки, так как электрическая проводимость изоляции у жилы будет значительно больше, чем у оболочки.

При $b = 1$ получим $E = E_{\text{ср}} = \frac{U}{R - r_0}$, т. е. напряженность поля не зависит от радиуса и равна среднему значению. В этом случае удельная электрическая проводимость изоляции будет изменяться обратно пропорционально радиусу, а произведение γr будет постоянным, и в соответствии с (2-24) напряженность поля не зависит от радиуса.

На рис. 2-3 приведена зависимость напряженности поля от радиуса при различных значениях m .

С увеличением коэффициента k распределение напряженности поля становится более равномерным, так как в области с большей напряженностью поля электрическая проводимость изоляции возрастает.

В кабелях с пластмассовой (полиэтиленовой) изоляцией значение k очень важно, и по данным [Л. 14] $k = 2,1 \div 2,4$, а для бумажной пропитанной изоляции оно близко к нулю.

При $b = 0$ и $k = 0$ значение m также равно нулю и в пределе (2-48) переходит в (2-9), относящееся к однородной изоляции для переменного и постоянного напряжения.

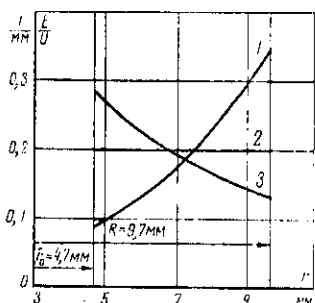


Рис. 2-3. Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля постоянного тока.

1 — $m=3$; 2 — $m=1$; 3 — $m=0,1$.

Таким образом, расчет кабеля постоянного тока необходимо производить как для случая отсутствия нагрузки, так и при нагрузке. Кроме того, в некоторых случаях необходимо учитывать искажение электрического поля за счет объемных зарядов около жилы и оболочки кабеля, появляющихся вследствие неодинаковой подвижности носителей зарядов (ионов) [Л. 19].

Если допустимая рабочая напряженность поля в изоляции равна E_p , то, подставив выражение для нее в (2-48) вместо E , можно определить радиус по изоляции R , если известен радиус жилы r_0 .

При $m < 1$ необходимо вместо r подставлять r_0 . При этом из (2-48) получим:

$$N = \frac{R}{r_0} = \left(1 + \frac{U}{E_p r_0} m\right)^{1/m}. \quad (2-49)$$

При $m > 1$ соотношение N можно получить приближенным решением уравнения

$$N^m \left(1 + \frac{U m}{E_p r_0 N}\right) = 1, \quad (2-50)$$

которое получено подстановкой $r = R$ в (2-48).

2-6. ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ КАБЕЛЕЙ С НЕРАДИАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

В трехжильных кабелях с неэкранированными изолированными жилами и в кабелях с жилой некруглой формы имеет место нерадиальное электрическое поле, точный расчет которого очень сложен. Составляющая напряженности электрического поля, направленная вдоль бумажных лент (тангенциальная составляющая), способствует развитию скользящих разрядов. Допустимое значение тангенциальной составляющей напряженности поля в 8—10 раз меньше радиальной. Поэтому в кабелях на напряжение 20 кВ и выше изолированные жилы экранируют, создавая радиальное поле. В то же время при напряжении ниже 6 кВ толщина изоляции определяется в основном ее механическими характеристиками, и напряженность

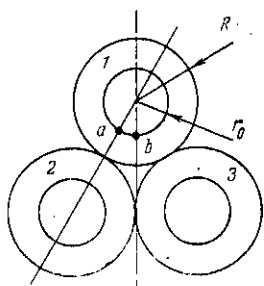


Рис. 2-4. К расчету максимальной напряженности электрического поля в кабелях с круглыми жилами.
1—3 — жилы.

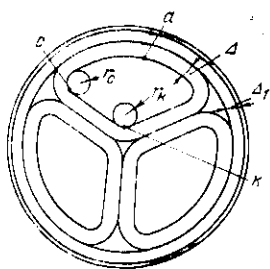


Рис. 2-5. Сечение кабеля с секторными жилами.

поля в таких кабелях обычно ниже допускаемой для данного типа изоляции. В этом случае производится лишь проверка электрической прочности по приближенным формулам.

В трехжильном кабеле с круглыми жилами и поясной изоляцией в момент, когда трехфазное напряжение между жилами 1 и 2 (рис. 2-4) равно линейному U_L , наибольшая напряженность поля имеет место в точке a .

В момент, когда фазное напряжение (U_ϕ) на жиле 1 наибольшее, жилы 2 и 3 имеют потенциалы, равные минус $0,5 U_\phi$. В этом случае наибольшая напряженность поля будет в точке b .

Максимальная напряженность поля может быть рассчитана приближенно по формуле

$$E_{\text{макс}} = U_L (1/2\Delta + 0,18/r_0), \quad (2-51)$$

где $\Delta = R - r_0$ — толщина жильной изоляции, мм;

r_0 — радиус жилы, мм;

$E_{\text{макс}}$ — МВ/м.

Наибольшую напряженность поля в точке a можно вычислить по формуле из теории поля для параллельных цилиндров, пренебрегая влиянием оболочки кабеля:

$$E_{a \text{ макс}} = \frac{U_L \sqrt{(N+1)/(N-1)}}{2r_0 \ln(N + \sqrt{N^2 - 1})}, \quad (2-52)$$

где $N = R/r_0$.

Для $N = 1,1 \div 2,0$ результаты, получаемые по (2-51), превышают результаты по (2-52) не более чем на 4%.

В трехжильных кабелях с секторными жилами проверочный расчет напряженности поля производится для трех характерных точек: a , c и k (рис. 2-5).

В точке a напряженность поля можно вычислить по (2-9) для одножильного кабеля, принимая вместо радиуса жилы радиус закругления секторной жилы (радиус по скрутке) $R_{\text{ск}}$ и вместо радиуса по жильной изоляции — радиус по поясной изоляции:

$$E_a = U_\phi / \left(R_{\text{ск}} \ln \frac{R_{\text{ск}} + \Delta + \Delta_1}{R_{\text{ск}}} \right), \quad (2-53)$$

где Δ_k — толщина поясной изоляции.

Напряженность поля у внутреннего ребра жилы вычисляется по той же формуле, в которую вместо радиуса жилы подставляется радиус закругления внутреннего (центрального) ребра сектора (r_k на рис. 2-5), а толщина изоляции принимается равной расстоянию от точки k до оси кабеля (на оси кабеля потенциал равен нулю). При этом получим:

$$E_k = U_\Phi / \left(r_k \ln \frac{r_k + 1,155\Delta}{r_k} \right). \quad (2-54)$$

Приближенное значение напряженности поля между внешними ребрами двух жил (точка c) находим при напряжении U_Φ по (2-52) для двух параллельных цилиндров, в которую вместо r_0 подставляем r_c , а вместо R — сумму $r_c + \Delta$.

Для кабелей с отдельно экранированными секторными жилами напряженность поля в точке a вычисляется по формуле

$$E_a = U_\Phi / \left(R_{\text{ск}} \ln \frac{R_{\text{ск}} + \Delta}{R_{\text{ск}}} \right), \quad (2-55)$$

в точках c и k по формуле

$$E_{\text{макс}} = U / \left(r \ln \frac{r + \Delta}{r} \right), \quad (2-56)$$

где r — радиус закругления сектора в точках c или k .

У кабелей с жилами эллиптической формы наибольшая напряженность поля соответствует точке A (рис. 2-6) и вычисляется по формуле

$$E_A = U / \left(\rho_A \ln \frac{\rho_A + \Delta}{\rho_A} \right), \quad (2-57)$$

где ρ_A — радиус кривизны в точке A , равный b^2/a (рис. 2-6).

До сих пор мы рассматривали электрическое поле для жилы с идеально гладкой поверхностью. Любая неровность поверхности жилы создает местные увеличения напряженности поля в самом ответственном месте изоляции. Для исключения таких искажений применяют полупроводящие экраны.

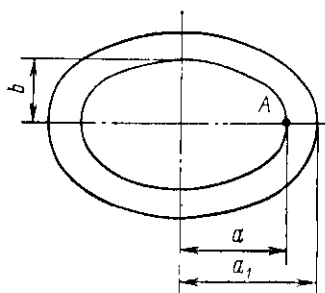


Рис. 2-6. Сечение жилы овальной формы.

Если круглая жила не экранирована и скручена из круглых проволок, то местную напряженность поля можно вычислить по формуле

$$E_{\text{макс}} = \frac{U}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}} \frac{\lambda \ln \frac{R}{r_0}}{\ln \frac{\lambda}{m} + m \ln \frac{R}{r_0}}, \quad (2-58)$$

где $\lambda = \left(1 + m \sin \frac{\pi}{m}\right) / \sin \frac{\pi}{m}$;

m — число проволок во внешнем повиве жилы.

Эта формула справедлива, когда в наружном повиве имеется не менее 12 проволок.

Предельное увеличение напряженности поля за счет «проволочности» жилы достигает 30%.

2-7. ПРОБОЙ ИЗОЛЯЦИИ И ВИДЫ ПРОБОЯ

Пробивное напряжение материала является сложной функцией физических свойств материала, размеров образца, условий окружающей среды и характера приложенного напряжения.

Различают два основных вида пробоя однородных диэлектриков: электрический и тепловой.

Кроме электрического и теплового пробоя твердых диэлектриков можно говорить еще об «ионизационном» пробое, который является следствием ионизации газовых включений, содержащихся в твердом изолирующем материале.

Существенное влияние на механизм пробоя в слоистой изоляции оказывает развитие скользящих разрядов вдоль лент.

Электрическая прочность применяемых на практике диэлектриков существенно зависит от неоднородности поля, а также от характера и интенсивности таких процессов в диэлектрике, как ионизация газовых включений и химические изменения материала изоляции.

Наличие слабых мест приводит к тому, что отдельные образцы одного и того же материала пробиваются при различном напряжении, т. е. к появлению разброса значений электрической прочности, значение которого зависит от степени однородности диэлектрика.

Обычно пробивное напряжение оценивается средним значением из многочисленных результатов испытаний от-

дельных образцов. Для кабельной изоляции вследствие большой протяженности кабеля необходимо определить главным образом минимальное значение пробивного напряжения, возможного при данной технологии производства.

В связи с целым рядом факторов, определяющих пробивное напряжение изоляции, выбор рабочей напряженности электрического поля является сложной и ответственной частью расчета кабеля. В дальнейшем будут рассмотрены методы оценки пробивного напряжения и экспериментальные значения электрической прочности кабельной изоляции, а затем и методика выбора и расчета рабочей напряженности изоляции кабелей.

2.8. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В НЕОДНОРОДНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Кабельная изоляция имеет следующие особенности: а) неоднородность структуры (слоистость, волокнистость, зернистость); б) наличие воздуха и влаги в виде мелких включений и пленок; в) зависимость основных характеристик от температуры; г) неизбежное старение диэлектрика (постепенное ухудшение основных свойств во времени).

Все эти особенности влияют на распределение потенциала в изолирующем слое, на его электрическую прочность и на характер использования изолирующего материала в конструкциях кабелей высокого напряжения.

В силовых кабелях с пропитанной бумажной изоляцией наличие слоев бумаги и находящихся между ними прослоек масла создает неоднородность структуры изоляции и неравномерность распределения электрического поля по объему изоляции.

Наиболее опасны газовые включения. Поэтому представляет интерес определение напряженности поля в воздушных включениях в зависимости от их размеров и электрических свойств соприкасающихся с ними слоев кабельной изоляции.

Предположим, что элементарный слой кабельной изоляции толщиной Δr расположен на расстоянии r от центра одножильного кабеля и состоит из трех слоев:

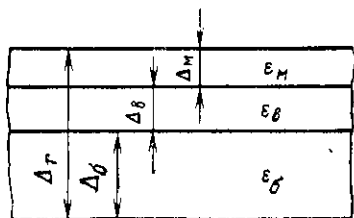


Рис. 2-7. Схема элементарного слоя пропитанной маслом бумажной изоляции.

пропитанной бумаги Δ_6 , масла (или пропиточного состава) Δ_m и газа (воздуха) Δ_a , как это показано на рис. 2-7.

Так как $\Delta r \ll r$, то падение напряжения на элементарном слое в электрическое поле одножильного кабеля с учетом (2-9) будет равно:

$$\Delta U \approx E \Delta r = \frac{U}{r \ln \frac{R}{z_0}} \Delta r. \quad (2-59)$$

Слой бумаги, масла и воздуха могут рассматриваться как три последовательно соединенных конденсатора. Общая емкость элементарного слоя Δr может быть вычислена из выражения

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{\Delta_6}{\epsilon_6 \epsilon_0} + \frac{\Delta_m}{\epsilon_m \epsilon_0} + \frac{\Delta_a}{\epsilon_0} \right). \quad (2-60)$$

Напряжение, приходящееся на слой воздуха, найдем из соотношения ($C_a = \epsilon_0 / \Delta_a$):

$$\frac{\Delta U_a}{\Delta U} = \frac{C}{C_a} \quad \text{или} \quad \Delta U_a = \Delta U \frac{\Delta_a}{\frac{\Delta_6}{\epsilon_6} + \frac{\Delta_m}{\epsilon_m} + \Delta_a}. \quad (2-61)$$

Подставляя ΔU из (2-59) в (2-61) и учитывая, что $\Delta r = \Delta_a + \Delta_m + \Delta_6$, получаем выражение для напряженности поля в пленке воздуха:

$$E_a = \frac{\Delta U_a}{\Delta_a} = E \left(1 + \frac{\Delta_m + \Delta_6}{\Delta_a} \right) / \left(1 + \frac{\epsilon_6 \Delta_m + \epsilon_m \Delta_6}{\epsilon_6 \epsilon_m \Delta_a} \right). \quad (2-62)$$

Отношение напряженности поля в слое воздуха к напряженности поля в данной точке однородной изоляции будет равно:

$$\frac{E_a}{E} = \left(1 + \frac{\Delta_m + \Delta_6}{\Delta_a} \right) / \left(1 + \frac{\Delta_m}{\Delta_a \epsilon_m} + \frac{\Delta_6}{\Delta_a \epsilon_6} \right). \quad (2-63)$$

Аналогично для напряженности поля в слое масла получим:

$$\frac{E_m}{E} = \left(1 + \frac{\Delta_a + \Delta_6}{\Delta_m} \right) / \left(1 + \frac{\Delta_a \epsilon_m}{\Delta_m} + \frac{\Delta_6 \epsilon_m}{\Delta_m \epsilon_6} \right). \quad (2-64)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи применения полученных формул.

Кабельная бумага наматывается на жилу кабеля с большой плотностью, поэтому слои воздуха и масла между лентами значительно тоньше слоя бумаги. Из (2-63) и (2-61) следует:

$$E_{\text{в}}/E \approx \epsilon_{\text{б}} \quad \text{и} \quad E_{\text{м}}/E \approx \epsilon_{\text{б}}/\epsilon_{\text{м}}. \quad (2-65)$$

Однако бумажные ленты обычно накладываются с зазорами; эти зазоры, толщина которых примерно соответствует толщине бумажной ленты, обычно заполнены маслом (или пропиточным составом), но при неполной пропитке в них может находиться воздух.

Для случая, когда $\Delta_{\text{м}} \approx 0$, напряженность поля в воздушном зазоре

$$E_{\text{в}}/E = (1+n)/(1+n/\epsilon_{\text{б}}), \quad (2-66)$$

где n — число бумажных лент между зазорами (при условии, что зазоры целиком заполнены газом, что соответствует конструкции газонаполненного кабеля).

Если $\Delta_{\text{в}} \approx 0$, то напряженность поля в масляном зазоре

$$E_{\text{м}}/E = (1+n)/(1+n\epsilon_{\text{м}}/\epsilon_{\text{б}}), \quad (2-67)$$

Последний случай соответствует конструкции маслонаполненного кабеля.

При относительном перекрытии, равном 50%, $n=1$, а при перекрытии на 33% $n=2$.

Наконец, может иметь место случай, когда почти все зазоры заполнены пропиточным составом и лишь отдельные — воздухом. При этом можно приближенно считать, что $\Delta_{\text{в}} \ll \Delta_{\text{б}}$, $\Delta_{\text{в}} \ll \Delta_{\text{м}}$ и $\Delta_{\text{б}} = n\Delta_{\text{м}}$. Тогда из (2-63) следует

$$\frac{E_{\text{в}}}{E} = (1+n) / \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{м}}} + \frac{n}{\epsilon_{\text{б}}} \right). \quad (2-68)$$

Диэлектрическая проницаемость масла равна примерно 2,2, а пропитанной бумаги 3,5—4,3 в зависимости от ее плотности. Поэтому при переменном напряжении в пленках газа и масла имеет место повышение напряженности поля, которое зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей и относительных размеров слоев.

Из (2-66)—(2-68) следует, что с увеличением числа лент бумаги между двумя последовательными зазорами напряженность поля в масляном или воздушном зазоре возрастает, и при весьма большом числе бумажных лент повышение напряженности поля будет равно отношению

диэлектрических проницаемостей пропитанной бумаги и материала, заполняющего данный зазор.

Выведенные уравнения справедливы лишь для переменного напряжения, когда выполняется соотношение $\epsilon\epsilon_0 r \ll 1/2f$ для каждого слоя (§ 2-3).

Однако при постоянном напряжении справедливо соотношение $\epsilon\epsilon_0 r \ll 1/2f$, и тогда напряженность поля распределяется между отдельными слоями диэлектрика в соответствии с их проводимостями.

В этом случае вместо (2-60) для проводимости элементарного слоя при $\Delta_b = 0$ можно записать:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{\Delta_6}{\gamma_6} + \frac{\Delta_m}{\gamma_m} \right). \quad (2-69)$$

Напряжение на масляном слое найдем из соотношения, аналогичного (2-61):

$$\Delta U_m / \Delta U = G / G_m. \quad (2-70)$$

Из аналогии соотношений (2-69), (2-70) и (2-60), (2-61) следует, что при постоянном токе в уравнении для E_m/E вместо диэлектрической проницаемости необходимо подставить проводимость слоев γ .

Проводимость масла больше, чем пропитанной бумаги, поэтому напряженность поля в масляных пленках будет меньше.

Таким образом, при постоянном напряжении наибольшая напряженность поля приходится на слой пропитанной бумаги, которая имеет наиболее высокую электрическую прочность, в то время как при переменном напряжении большая напряженность поля имеет место в масляных пленках, обладающих меньшей электрической прочностью. Это обстоятельство является одной из причин, которая обуславливает повышенную электрическую прочность кабельной изоляции при постоянном напряжении.

Если в зазорах вместо масла будут воздушные включения, проводимость которых очень мала, то все напряжение будет приложено к воздушным промежуткам. Тогда

$$E_b/E = (\Delta_b + \Delta_m + \Delta_6) / \Delta_b.$$

Как будет показано ниже, значительное увеличение напряженности поля в воздушных включениях при постоянном напряжении вызывает менее интенсивную ионизацию и оказывает менее существенное влияние на

электрическую прочность изоляции, чем при переменном напряжении.

Полученные формулы являются приближенными и относятся к слоистому диэлектрику с правильным чередованием слоев для случая, когда можно пренебречь искажением поля у краев включений.

В пластмассовой изоляции кабелей включения могут иметь произвольную форму и расчет напряженности поля в таких включениях труден. Если приближенно считать, что включение имеет форму эллипсоида вращения с направлением оси вращения x (рис. 2-8) вдоль направления однородного электрического поля $E_{ср}$, то напряженность поля $E_{вк}$ внутри такого включения также будет однородной и может быть подсчитана (при переменном напряжении) по уравнению из [Л. 15]:

$$E_{вк} = \frac{4\epsilon_1}{(4 + \kappa) \epsilon_1 - \kappa \epsilon_2} E_{ср}, \quad (2-71)$$

где $E_{ср}$ — напряженность однородного поля при отсутствии включения;

ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрические проницаемости среды и включения.

Коэффициент κ может быть подсчитан по уравнениям:

$$\psi < 1; \quad \kappa = \frac{2\psi}{1-\psi} \left(2 - \frac{1}{\sqrt{1-\psi}} \ln \frac{1 + \sqrt{1-\psi}}{1 + \sqrt{1+\psi}} \right);$$

$\psi = 1$ (сферическое включение) $\kappa = -4/3$;

$$\psi > 1; \quad \kappa = -\frac{4\psi}{\psi-1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\psi-1}} \operatorname{arctg} \sqrt{\psi-1} \right).$$

Значение $\psi = c^2/a^2$ определяется соотношением осей эллипсоида (рис. 2-8).

Наибольшая напряженность поля $E_{макс}$ в диэлектрике вне включения будет в точке A и может быть получена из соотношения $\epsilon_2 E_{вк} = \epsilon_1 E_{макс}$ из (2-71):

$$E_{макс} = \frac{4\epsilon_2}{(4 + \kappa) \epsilon_1 - \kappa \epsilon_2} E_{ср}. \quad (2-72)$$

Для очень вытянутого (иглообразного) включения $\psi \rightarrow 0$ и $\kappa \rightarrow 0$. При этом из (2-71) следует, что $E_{вк} \approx E_{ср}$,

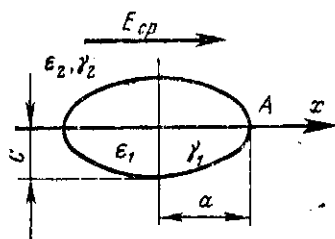


Рис. 2-8. Схема расположения эллипсоидального включения в электрическом поле.

а из (2-72), что $E_{\text{макс}} \approx E_{\text{ср}} \epsilon_2 / \epsilon_1$. Для чечевицеобразного включения $\psi \rightarrow \infty$, $\kappa \rightarrow -4$ и соответственно получим

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_{\text{ср}} \approx E_{\text{вк}}, \text{ а } E_{\text{макс}} \approx E_{\text{ср}}.$$

При постоянном напряжении в уравнения следует вместо диэлектрических проницаемостей подставлять проводимости изоляции.

Очевидно, что наибольшая напряженность поля будет внутри чечевицеобразных воздушных включений, а в изоляционной среде — в случае иглообразных включений с большой диэлектрической проницаемостью и проводимостью (влага, полупроводящие или металлические нити). В последнем случае местная напряженность поля $E_{\text{макс}}$ в точке А (рис. 2-8) может во много раз превышать $E_{\text{ср}}$, так что эта точка будет являться слабым местом, в котором начнется развитие пробоя в изоляции.

2-9. ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ГАЗОВ И МАСЛА НА ПРОБОЙ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В § 2-8 было показано, что напряженность поля в газовых, а при переменном напряжении и в масляных включениях будет выше, чем в однородной изоляции. Это приводит к уменьшению электрической прочности изоляции, так как эти включения в электрическом отношении представляют более слабые места изоляции.

Как известно, электрическая прочность газа зависит от его природы и согласно закону Пашена является функцией плотности (давления) и толщины слоя газа:

$$U_{\text{пр}} = f(p\Delta).$$

Под электрической прочностью газовой пленки понимается напряженность электрического поля $E_{\text{п}}$, при которой начинаются разряды в газе.

Зависимость $U_{\text{пр}} = f(p\Delta)$ имеет вид кривой с резко выраженным минимумом. Минимальное значение $U_{\text{пр}}$ для воздуха соответствует $p\Delta = 750 \text{ Па} \cdot \text{мм}$ и равно 327 В. Для меньших значений $p\Delta$ пробивное напряжение возрастает, потому что плотность воздуха (или расстояние Δ) значительно уменьшается и ионизирующее столкновение в промежутке Δ становится все менее вероятным. Для $p\Delta > 750 \text{ Па} \cdot \text{мм}$ пробивное напряжение возрастает примерно по линейному закону, который нарушается лишь при абсолютном давлении более 2 МПа.

Закон Пашена в полном виде установлен для газовых промежутков между металлическими электродами. В изоляции кабелей газовые включения располагаются или внутри изоляционного слоя, или между изоляционным слоем и металлической поверхностью жилы или оболочки. В этом случае возможны отклонения от закона Пашена, особенно в области малых значений $p\Delta$, так как возможно развитие разрядов по поверхности газовых включений.

Для воздушных прослоек, расположенных между стеклянными пластинами, С. М.

Брагиным были получена зависимость $U_{пр}$ прослоек от $p\Delta$ при переменном напряжении, которую можно рекомендовать для приближенных расчетов в кабельной изоляции (рис. 2-9) [Л. 17].

В табл. 2-1 приведены значения напряженности электрического поля, соответствующие однородному диэлектрику [для расчета по (2-33)], при которых будет иметь место начало ионизации в воздушных промежутках в кабелях с вязкой пропиткой ($\epsilon_0 = 3,5$), если считать, что зазоры наполнены воздухом (2-66) и толщина воздушного зазора равна толщине бумажной ленты. Из табл. 2-1 видно, насколько опасно появление в изоляции воздушных включений с пониженным давлением.

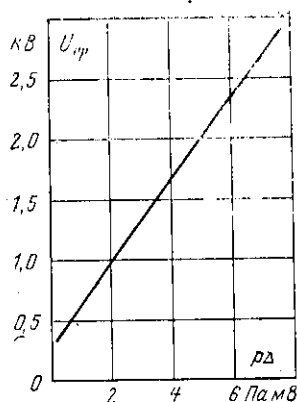


Рис. 2-9. Пробивное напряжение пленки газа в зависимости от произведения $p\Delta$.

Таблица 2-1

Напряженность поля при начале ионизации

Толщина воздушного зазора, мм	Напряженность поля в кабеле, МВ/м			
	$p = 0,1 \text{ МПа}$		$p\Delta = 0,001 \text{ МПа} \cdot \text{мм}$	
	$n = \frac{\Delta_6}{\Delta_в} = 1$	$n = 2$	$n_1 = 1$	$n = 2$
0,12	3,9	3,2	1,7	1,4
0,06	5,4	4,4	3,5	2,8

Электрическая прочность газовой пленки зависит также от природы самого газа. Для повышения электрической прочности газонаполненных кабелей могут быть применены элегаз (SF_6) и фреон (CCl_2F_2). Электрическая прочность этих газов примерно в 2,2—2,5 раза выше электрической прочности воздуха.

По данным [Л. 16 и 17] зависимость напряженности поля, соответствующей началу разрядов в масле, от толщины масляных пленок следует приближенным закономерностям вида

$$E_m = a/\sqrt{\Delta} \quad (2-73)$$

или $E_m = 31,1 \Delta^{-0,2085}$, МВ/м,

где Δ — толщина масляной пленки, мм;

a — коэффициент, зависящий от чистоты и природы масла, а также от давления.

Зависимость (2-73) справедлива для пленки масла в зазоре, прилегающем к жиле. Электрическая прочность пленки толщиной 0,12 мм может быть принята равной примерно 60 МВ/м при кратковременном приложении напряжения промышленной частоты.

2-10. РАЗРЯДЫ В ВОЗДУШНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ПРИ ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИЯХ

При постоянном напряжении и высокой напряженности поля (E_n) в газовом включении возникает ионизация, в результате которой на некоторое время (примерно 10^{-7} с) газ становится проводником. При этом на поверхности включения образуется свободный поверхностный заряд. Плотность заряда распределяется таким образом, что напряженность поля этого заряда частично компенсирует внешнее приложенное поле, так что результирующее поле во включении будет значительно уменьшено. Это приводит при некоторой напряженности поля погасания E_n к прекращению ионизации, и воздушное включение снова становится непроводником (рис. 2-10). На рис. 2-10 период существования ионизации обозначен Δt_1 .

В дальнейшем свободные заряды стекают через диэлектрик, и напряженность поля во включении нарастает по экспоненциальному закону с постоянной времени релаксации, равной примерно $\tau \approx \epsilon \epsilon_0 \rho v$. Если бы не происходило ионизации, то напряженность поля достигла

бы некоторого значения $E_{\text{в}}$, определяемого по (2-66) или (2-71). Но при $E = E_{\text{н}}$ ионизация возникает снова, и цикл повторяется. Время цикла определяется в основном периодом между погасанием и зажиганием Δt_2 , который зависит от постоянной времени релаксации τ . Значение τ для высококачественных диэлектриков находится обычно в пределах от нескольких секунд до десятков секунд.

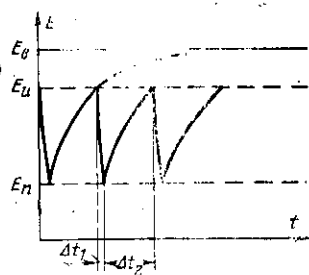


Рис. 2-10. Напряженность электрического поля при разрядах в воздушных включениях.

При переменном напряжении после ионизации во включении также возникают поверхностные заряды, поле которых в один полупериод направлено против внешнего поля. Но в следующий полупериод внешнее поле изменяет направление, и поле зарядов уже не ослабляет его, а усиливает, что приводит к новой вспышке ионизации. В зависимости от внешнего напряжения частота вспышек может быть вдвое больше частоты напряжения или даже выше, вызывая интенсивную ионизацию [Л. 15].

Таким образом, влияние ионизации на процесс старения изоляции при переменном напряжении будет значительно большим, чем при постоянном напряжении.

Наличие интенсивной ионизации при переменном напряжении является одним из основных факторов, ограничивающих рабочую напряженность поля в изоляции.

2-11. ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ОТ ВИДА ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЕГО ДЕЙСТВИЯ

Расчет соотношения напряженностей поля в различных компонентах практического диэлектрика позволяет лишь ориентировочно определить пробивную напряженность поля для изоляции, но этот расчет необходим при выборе типа изоляции и конструкции кабеля с наименьшим значением напряженности поля в ослабленных местах изоляции.

Значение местной напряженности поля не всегда однозначно определяет электрическую прочность изоляции. Например, из (2-67) следует, что напряженность поля

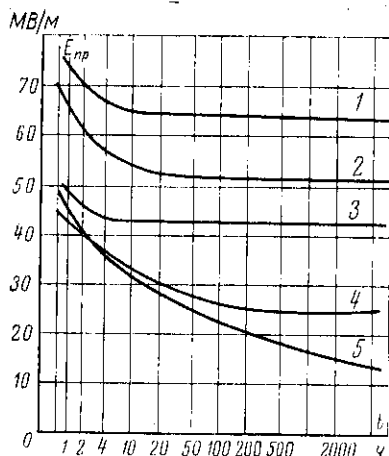


Рис. 2-11. Типичные зависимости электрической прочности от времени действия переменного напряжения для кабелей с пропитанной бумажной изоляцией.

1 — маслонаполненный кабель под давлением 1,5 МПа; 2 — кабель при давлении газа над оболочкой 1,5 МПа; 3 — маслонаполненный кабель под давлением 0,13 МПа; 4 — газонаполненный кабель под давлением 1,5 МПа; 5 — кабель с вязкой пропиткой.

уровню пробивного напряжения для выбранной конструкции изоляции.

Электрическая прочность кабельной изоляции зависит от рода приложенного напряжения и снижается с увеличением длительности действия напряжения. Причиной снижения электрической прочности при длительном приложении напряжения является процесс старения, протекающей в изоляции под влиянием ионизации и нагревания.

На рис. 2-11 показаны типичные зависимости электрической прочности от времени действия переменного напряжения («кривые жизни») для кабелей высокого напряжения с пропитанной бумажной изоляцией.

Из рассмотрения этих кривых следует, что соотношение между значениями кратковременной и длительной прочности кабельной изоляции зависит от типа кабеля: наибольшее соответствует кабелю с вязкой пропиткой, наименьшее — маслонаполненному кабелю,

в пленке масла при 50%-ном перекрытии бумажных лент ($n=1$) будет меньше, чем при 33%-ном перекрытии ($n=2$). Однако практически электрическая прочность при 33%-ном перекрытии имеет большее значение. Это происходит вследствие того, что бумага не является сплошным барьером для носителей тока и при 50%-ном перекрытии соседние зазоры оказываются более связанными между собой, чем при 33%-ном перекрытии, что приводит к увеличению толщины масляного зазора.

Окончательный выбор рабочей напряженности поля в изоляции производится с учетом экспериментальных данных по

Для кабельной изоляции зависимость электрической прочности от времени может быть выражена приближенно следующей эмпирической формулой

$$E_{np} = E_{\infty} + \Delta E / \sqrt[n]{t}, \quad (2-74)$$

где E_{∞} — электрическая прочность при весьма длительном приложении напряжения;
 ΔE и n — постоянные параметры, зависящие от свойств изоляции;

t — время до пробоя изоляции.

Если по оси ординат отложить электрическую прочность, а по оси абсцисс — параметр $1/\sqrt[n]{t}$, то на графике при правильно подобранном коэффициенте n зависимость (2-74) выразится прямой линией. Пересечение прямой с осью ординат дает предельное значение электрической прочности при весьма длительном приложении напряжения E_{∞} .

На рис. 2-12 приведен пример построения зависимости 5 из рис. 2-11 для кабеля с изоляцией с вязкой пропиткой в указанных координатах при n , равном 2, 4 и 6. Правильное значение n , при котором зависимость (2-74) превращается в прямую линию, равно 4.

Для кабелей с вязкой пропиткой $E_{\infty} = 12$ МВ/м, значения E_{∞} для маслонеполненного и газонаполненного кабелей в зависимости от толщины бумажных лент и давления приведены на рис. 2-13.

На рис. 2-14 приведены кривые жизни для кабелей с пластмассовой изоляцией по данным [Л. 18], полученным на большом числе образцов, выдержанных под напряжением в течение 7 лет.

Электрическая прочность кабелей с пластмассовой изоляцией заметно уменьшается с увеличением толщины изоляции и увеличением диаметра жилы.

По экспериментальным данным средняя электрическая прочность при весьма длительном приложении на-

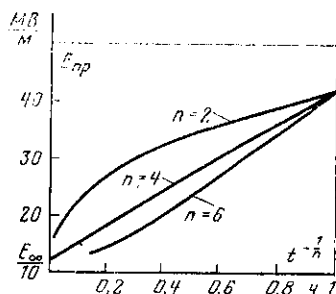


Рис. 2-12. Построение зависимости электрической прочности от аргумента $t^{-1/n}$.

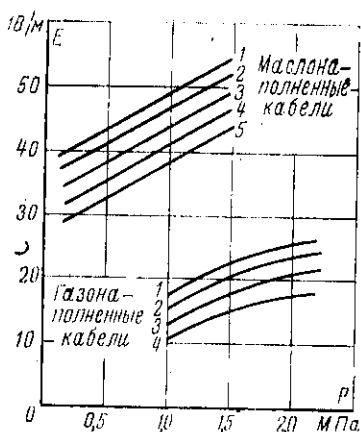


Рис. 2-13. Примерные зависимости пробивной напряженности поля от давления при длительном воздействии переменного напряжения для разной толщины бумажных лент.

1 — 0,030 мм; 2 — 0,045 мм; 3 — 0,075 мм;
4 — 0,125 мм; 5 — 0,175 мм.

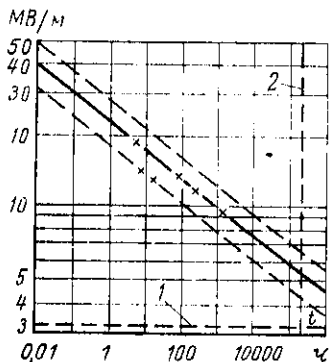


Рис. 2-14. Примерная зависимость электрической прочности от времени для кабелей с пластмассовой изоляцией.

1 — допустимая в эксплуатации напряженность поля; 2 — время эксплуатации 30 лет.

пряжения для полиэтилена и поливинилхлорида составляет около 10 МВ/м [Л. 18].

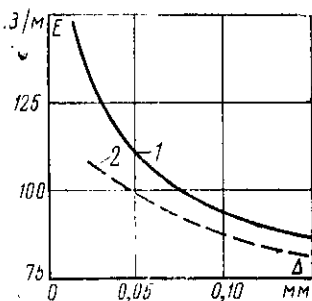
Во время работы кабельной линии изоляция периодически может подвергаться воздействию импульсных перенапряжений. Поэтому импульсная прочность изоляции должна быть учтена при выборе ее конструкции и толщины.

Импульсная прочность бумажной пропитанной изоляции кабелей высокого напряжения возрастает с уменьшением толщины бумажных лент (рис. 2-15), с повышением плотности бумаги и с увеличением вязкости пропитывающего состава и почти не зависит от давления.

Импульсная прочность кабелей с пластмассовой изоляцией уменьшается с повышением температуры, толщины изоляции и числа импульсов. При положительной полярности на жиле импульсная прочность на 10—40% ниже, чем при отрицательной полярности. Как показывают экспериментальные исследования, импульсная прочность кабелей с полиэтиленовой изоляцией (а также при постоянном токе) определяется не максимальной напряженностью поля (на

Рис. 2-15. Зависимость импульсной прочности от толщины бумажных лент.

1 — маслонаполненные кабели; 2 — газонаполненные кабели под давлением 1,5 МПа.



жиле), а средней напряженностью, которая для полиэтилена находится в пределах 40—70 МВ/м.

Электрическая прочность изоляции при постоянном напряжении близка к прочности при импульсном напряжении. Так, пробивная средняя напряженность поля $E_{ср}$ для полиэтилена составляет около 50 МВ/м.

2-12. ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При расчете изоляции кабеля необходимо учитывать, что кабельные линии во время эксплуатации, помимо длительно приложенного рабочего напряжения, подвергаются воздействию внутренних и атмосферных перенапряжений, размер и длительность которых определяются параметрами сети и установленной защитной аппаратуры. Необходимо учитывать также неоднородность изоляции по длине кабеля вследствие различного взаиморасположения зазоров между бумажными лентами и наличия дефектов в виде морщин, вмятин и совпадений зазоров между лентами.

В связи с этим для выбора изоляции целесообразно установить два расчетных напряжения: промышленной частоты и импульсное. Конструирование изоляции должно производиться с учетом обоих напряжений.

Учет различных факторов, определяющих расчетные напряжения, удобно производить в виде соответствующих коэффициентов. Расчетные напряжения промышленной частоты могут быть выбраны по формуле

$$U_1 = k_1 k_2 k_3 k_4 \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}, \quad (2-75)$$

где $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение системы.

Коэффициент k_1 учитывает наибольшее возможное повышение рабочего напряжения и обычно принимается равным 1,15.

Коэффициент k_2 учитывает возможные отклонения фактической электрической прочности изоляции от среднего значения, принимаемого при конструировании изоляции. Практически расположение зазоров между бумажными лентами распределяется по статистической закономерности. Пробивное напряжение изоляции кабелей может изменяться в пределах 15—20%.

Кроме того, наличие вмятин, морщин и других дефектов может снизить электрическую прочность примерно на 10—25% в зависимости от совершенства технологии изготовления кабеля. Поэтому коэффициент k_2 выбирается в пределах 1,25—1,50.

Коэффициент k_3 учитывает уровень внутренних (коммутационных) перенапряжений, воздействующих на кабельную линию. Опыт эксплуатации кабельных линий показывает, что максимальное перенапряжение в сетях с напряжением 110 кВ достигает $3,1 U_{\phi}$ и постепенно уменьшается с повышением напряжения до $2,25 U_{\phi}$ в сетях 500 кВ. В большинстве случаев перенапряжения имеют кратность 2,50—2,25. Учитывая, что максимальные перенапряжения бывают редко, коэффициент k_3 может быть принят равным 2,25 для линий 500 кВ и 2,50 для линий 110 кВ.

Коэффициент k_4 учитывает уменьшение пробивного напряжения при снижении давления масла от расчетного до минимально допустимого значения, определяемого аппаратурой подпитки линии. Он может быть рассчитан по кривой (рис. 2-13) и обычно находится в пределах 1,10—1,20.

Таким образом, общий коэффициент запаса находится в пределах 3,3—5,0, причем меньшее значение выбирается при надежной защите сети от перенапряжений и при применении наиболее высококачественных материалов.

Для проверки электрической прочности изоляции изготовленного кабеля его подвергают испытанию высоким напряжением. В соответствии с указанными факторами для каждого номинального линейного напряжения устанавливается испытательное напряжение промышленной частоты, при котором кабель выдерживают в течение заданного времени.

Определение толщины изоляции производится на основании напряжения, принимаемого в качестве расчетного.

Выбор расчетного импульсного напряжения может быть произведен по формуле

$$U_2 = k_{\text{имп}} U_{\text{имп}}, \quad (2-76)$$

где $U_{\text{имп}}$ — испытательное импульсное напряжение.

Коэффициент $k_{\text{имп}}$ учитывает неоднородность изоляции и снижение пробивной прочности с увеличением числа импульсов, $k_{\text{имп}} = 1,10 \div 1,20$.

В соответствии с ГОСТ 16441-70 строительные длины маслонаполненных кабелей испытываются переменным напряжением в течение 15 мин. Для кабелей на напряжение 110 и 220 кВ установлены значения испытательного напряжения между жилой и оболочкой 220 кВ и 390 кВ соответственно (при контрольных испытаниях).

Образцы кабеля среднего и высокого давления после изгибания должны выдерживать испытание импульсным напряжением (10 ударов волной положительной полярности и 10 ударов отрицательной полярности), равным $8,5 U_n$, форма волны 1—5/40—50 мкс при 85°C.

Для кабелей других конструкций и на другие напряжения испытательное импульсное напряжение для сетей с заземленной нейтралью соответствует формуле $U_{\text{имп}} = 3,47 U_n + 40$ кВ. При других конструкциях сетей на 10—30% выше [Л. 19].

Расчетная напряженность поля промышленной частоты $E_{p\sim}$ выбирается равной электрической прочности изоляции при бесконечно длительном приложении напряжения.

Расчетная импульсная напряженность принимается равной электрической прочности при многократном воздействии импульсов с отрицательной полярностью на жиле.

2-13. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При расчете изоляции высоковольтных кабелей градиентирование изоляции по диэлектрической проницаемости обычно производится в два слоя. В каждом таком слое напряженность поля убывает с увеличением радиуса, поэтому толщина бумажных лент постепенно ступенями увеличивается так, чтобы запас прочности по всей толщине изоляции оставался примерно одинаковым. Такая конструкция позволяет уменьшить число бумажных лент

в изоляции, а это облегчает наложение изоляции и позволяет повысить качество намотки бумаги.

Толщина изоляции рассчитывается с использованием соотношения (2-38) по двум расчетным напряжениям: промышленной частоты U_1 и импульсному U_2 . При этом выбирается большая толщина изоляции (например, по U_2) и по формуле (2-37) производится расчет радиусов, при которых следует изменять диэлектрическую проницаемость и толщину бумажных лент. После этого необходимо произвести проверку, не превышает ли напряженность поля допустимое значение, рассчитанное по другому напряжению (U_1) во всех слоях изоляции. Если превышает, то необходимо изменить толщину бумажных лент в соответствующем слое.

Обычно производится расчет нескольких вариантов, а затем выбирается экономически наиболее выгодный.

Таблица 2-2

Свойства бумажной изоляции

№ слоя	Толщина бумаги, мм	Плотность бумаги, Т/м³	*	$E_{пр}^1$ МВ/м	$E_{пр}^2$ МВ/м	$f_1 = \frac{E_{1пр}^{(1)}}{E_{2пр}^{(1)}}$	$f_2 = \frac{E_{1пр}^{(2)}}{E_{2пр}^{(2)}}$	$k = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$
1	0,75	1,1—1,2	4,3	50	100	—	—	—
2	0,125	0,85—0,90	3,5	47	90	1,064	1,11	1,23
3	0,175	0,85—0,90	3,5	46	86	—	1,162	1,23

Пример 2-3. Рассчитать изоляцию маслонаполненного кабеля в стальном трубопроводе под давлением 1,5 МПа на напряжение $U=220$ кВ. Радиус жилы $r_0=12,2$ мм.

Выбираем бумагу толщиной 0,075 ($\gamma=1,1 \div 1,2$), 0,125 и 0,175 мм ($\gamma=0,85 \div 0,9$). По кривым рис. 2-13 можно определить электрическую прочность при длительном приложении напряжения $E_{пр}^{(1)}$ и при импульсном напряжении $E_{пр}^{(2)}$ (рис. 2-15). Данные о свойствах выбранной бумаги приведены в табл. 2-2.

По (2-38) находим соотношение радиусов. При промышленной частоте

$$\begin{aligned}
 N = \frac{R_1}{r_0} &= k f_1 e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U_1}{r_0 E_1^{(1)}} - \ln f_1 k \right)} = \\
 &= 1,23 \cdot 1,064 e^{\frac{1}{1,23} \left(\frac{508}{12,2 \cdot 50} - \ln 1,23 \cdot 1,064 \right)} = 2,07.
 \end{aligned}$$

При импульсном напряжении

$$N_2 = \frac{R_2}{r_0} = k f_2 e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U_2}{r_0 E_1^{(2)}} - \ln f_2 k \right)} =$$

$$= 1,23 \cdot 1,11 e^{\frac{1}{1,23} \left(\frac{1080}{12,2 \cdot 100} - \ln 1,23 \cdot 1,11 \right)} = 2,18.$$

Расчетное напряжение U_1 находим по (2-75), принимая общий коэффициент запаса равным 4. В общем случае его следует выбирать, исходя из конкретных условий работы линии, как это рекомендуется в § 2-12:

$$U_1 = \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot 4 = 508 \text{ кВ.}$$

Значение U_2 можно определить из (2-76), приняв $k_{\text{нп}} = 1,20$ и выбрав значение $U_{\text{нп}} = 900 \text{ кВ}$:

$$U_2 = 900 \cdot 1,20 = 1080 \text{ кВ.}$$

Из двух вычисленных значений N выбирается большее ($N_2 = 2,18$). Таким образом, толщину изоляции кабеля в данном случае определяет импульсное напряжение.

При низком и среднем давлении толщину изоляции, как правило, определяет напряжение промышленной частоты.

Находим радиус по изоляции: $R_2 = 2,18 \cdot 12,2 = 26,6 \text{ мм}$. Толщина изоляции $\Delta_{\text{из}} = R_2 - r_0 = 14,4 \text{ мм}$.

Радиус r_1 , начиная с которого необходимо производить наложение бумаги с меньшей диэлектрической проницаемостью (0,125 мм), определяется по (2-37):

$$r_1 = f_2 k r_0 = 1,11 \cdot 1,23 \cdot 12,2 = 16,6 \text{ мм.}$$

Толщина слоя уплотненной бумаги (0,075 мм) $\Delta_1 = 4,4 \text{ мм}$.

Радиус перехода от бумаги толщиной 0,125 мм к бумаге толщиной 0,175 мм находим по аналогичной формуле, только значение f необходимо подсчитать для третьего слоя: $f = 100/86 = 1,162$; $r_2 = 1,162 \cdot 1,23 \cdot 12,2 = 17,4 \text{ мм}$.

Далее необходимо проверить значение напряженности поля во втором (при $r = r_1$) и в третьем (при $r = r_2$) слоях при расчетном напряжении $U_1 = 508 \text{ кВ}$.

Формулы (2-38) и (2-37) выведены из условия получения на границе слоев заданной напряженности поля. Поэтому при напряжении $U_2 = 1080 \text{ кВ}$ напряженность электрического поля составит: при $r = r_0$ $E_{r_0}^{(2)} = 100 \text{ МВ/м}$, при $r = r_1$ $E_{r_1}^{(2)} = 90 \text{ МВ/м}$ и при $r = r_2$ $E_{r_2}^{(2)} = 86 \text{ МВ/м}$.

Очевидно, что при напряжении $U_1 = 508 \text{ кВ}$ напряженность поля уменьшится в $1080/508$ раз. Тогда для U_1 напряженность поля составит: при $r = r_0$ $E_{r_0}^{(1)} = 100/2,12 = 47,1 \text{ МВ/м}$, при $r = r_1$ $E_{r_1}^{(1)} = 90/2,12 = 42,5 \text{ МВ/м}$ и при $r = r_2$ $E_{r_2}^{(1)} = 86/2,12 = 40,5 \text{ МВ/м}$.

Таким образом, напряженность поля при расчетном напряжении промышленной частоты не превышает электрической прочности для всех слоев.

При расчете последующих вариантов можно уменьшить толщину бумаги, чтобы повысить импульсную прочность изоляции.

Расчет газонаполненных кабелей высокого давления производится таким же образом, как и маслонаполненных кабелей.

Рабочая напряженность поля в изоляции кабелей с вязкой пропиткой выбирается, исходя из электрической прочности при длительном приложении напряжения $E_{\infty} = 12$ МВ/м.

Учитывая, что общий коэффициент запаса выбирается в пределах 3,5—4, рабочая напряженность поля в кабелях ОСБ 20 кВ выбирается в пределах 2,6—2,8 и в кабелях ОСБ 35 кВ — около 3,2—3,3 МВ/м.

Импульсная электрическая прочность изоляции кабеля с вязкой пропиткой значительно превышает E_{∞} , поэтому такие кабели имеют большой запас по импульсной прочности и соответствующие расчеты для этих кабелей могут не производиться.

В кабелях с нерадиальным полем с секторными жилами на напряжение 6 и 10 кВ рабочая напряженность поля выбирается несколько меньшей, чем для кабелей с радиальным полем. При этом необходимо проверить максимальную напряженность поля около ребер секторной жилы по формулам (2-52) — (2-54).

В кабелях с пластмассовой изоляцией максимальное пробивное напряжение (около жилы) замстно зависит от радиуса жилы. С увеличением радиуса жилы максимальное пробивное напряжение уменьшается, что особенно заметно при небольших радиусах жилы. В то же время среднее пробивное напряжение слабо зависит от радиуса жилы (при ступенчатом подъеме постоянного и переменного напряжения) и примерно соответствует электрической прочности изоляции при однородном поле (на пластинах).

Поэтому в отличие от кабелей с бумажной пропитанной изоляцией электрический расчет кабелей с полиэтиленовой изоляцией производится не по максимальной, а по средней напряженности поля. Толщина изоляции вычисляется из простого соотношения $\Delta_{из} = U_{ф}/E_{ср}$. Для стабилизированного полиэтилена, применяемого для изготовления силовых кабелей переменного тока до 35 кВ, значение $E_{ср}$ принимается равным 2,5 МВ/м. В кабелях на напряжение 1—6 кВ $E_{ср}$ значительно меньше, так

как здесь толщина изоляции зависит еще и от запаса механической прочности.

Изоляция кабелей повышенного напряжения обычно экранируется как со стороны жилы, так и со стороны оболочки с целью выравнивания поля и уменьшения влияния металлов на старение изоляции. От степени надежности экранирования и плотности прилегания экранов к изоляции (исключение воздушного зазора между экраном и изоляцией) зависит напряжение начала ионизации в кабеле и в конечном счете допустимая рабочая напряженность поля в изоляции.

Наилучший эффект дают экраны, изготовленные из материала, в физико-механическом отношении аналогичного изоляции. В этом случае температурные коэффициенты линейного расширения у изоляции и экрана будут одинаковыми, и при изменениях температуры экран всегда будет плотно прилегать к изоляции, исключая появление газовых включений.

В кабелях с бумажной пропитанной изоляцией наилучший эффект дают экраны, в которых последняя, прилегающая к изоляции, лента в экране из полупроводящих бумаг берется той же толщины, что и первая изоляционная лента, и состоит из двух слоев: полупроводящего, примыкающего к экрану, и изоляционного, прилегающего к изоляции.

В кабелях с пластмассовой изоляцией жила опрессовывается тонким слоем полупроводящего полиэтилена, затем накладывается основная изоляция, которая сверху экранируется коллоидальным графитом или полупроводящим полиэтиленом.

Электрический расчет кабелей постоянного тока должен производиться одновременно с тепловым расчетом, так как распределение напряженности поля в изоляции зависит от тока нагрузки кабеля [Л. 19].

2-14. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В КАБЕЛЕ

При прохождении переменного тока по жилам кабеля возникает магнитное поле, которое приводит к возникновению следующих явлений: 1) увеличивается электрическое сопротивление токопроводящих жил вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости; 2) возникают потери в металлических оболочках и броне кабеля; 3) появляются электродинамические силы, при-

ложенные к жилам кабеля. Эти силы действуют также и в кабелях постоянного тока. В кабелях переменного тока они создают вибрацию жил.

В обычном режиме работы кабелей эти силы невелики, однако для силовых кабелей при коротких замыканиях эти силы могут достигнуть сотен и тысяч ньютонов, что может создать опасность механического повреждения кабелей.

Для синусоидального переменного тока в теории электромагнитного поля для проводящей среды получено уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{F} = j\omega \mu \mu_0 \gamma \mathbf{F}, \quad (2-77)$$

где $\mathbf{F}$ — вектор напряженности либо электрического, либо магнитного поля;

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м);

μ — относительная магнитная проницаемость среды;

γ — удельная электрическая проводимость среды.

Точное решение этого уравнения можно получить лишь для сравнительно простых случаев, например для коаксиального кабеля.

Из (2-77) можно заключить, что распределение тока в проводе будет зависеть от параметра $k = \sqrt{j\omega \mu \mu_0 \gamma}$, имеющего размерность метр в степени — 1. При прохождении расстояния, равного $\delta_0 = \sqrt{2/k}$, в глубь поверхности проводящего тела амплитуда электромагнитной волны убывает в e раз. Параметр δ_0 условно называют глубиной проникновения.

Отношение сопротивления токопроводящей жилы при переменном токе $R_{ж\sim}$ к сопротивлению ее при постоянном токе $R_{ж=}$ удобно выразить через коэффициенты y_{π} и y_{δ} :

$$R_{ж\sim}/R_{ж=} = 1 + y_{\pi} + y_{\delta}, \quad (2-78)$$

где y_{π} и y_{δ} — коэффициенты, которые учитывают возрастание сопротивления вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости.

Под поверхностным эффектом следует понимать возрастание сопротивления жилы, обусловленное вытеснением тока к поверхности провода собственным магнитным полем провода.

Неравномерное распределение тока в проводе из-за влияния магнитного поля соседнего провода называют

эффектом близости. Эффект близости проявляется сильнее при близком расположении соседних проводов.

Коэффициенты y_n и y_b определяются параметром $x = kd_{ж}/2(d_{ж} - \text{диаметр жилы})$. Поскольку сопротивление жилы постоянному току на единицу длины жилы равно $R_{ж} = 4/(\gamma \pi d_{ж}^2)$, то параметр x можно выразить соотношением

$$x = \sqrt{2\mu_0 f / R_{ж}}. \quad (2-79)$$

Это выражение справедливо для жилы, изготовленной из сплошного металла. Многопроволочная жила будет иметь больший диаметр, что увеличивает параметр x . Одновременно эффективная удельная электрическая проводимость уменьшается вследствие наличия неметаллических включений и контактных переходных сопротивлений между отдельными проволоками, что приводит к уменьшению параметра x . Поэтому для приближенных расчетов поверхностного эффекта и эффекта близости у многопроволочных жил вводят поправочный коэффициент b . После подстановки величины μ_0 в (2-79) получим при $\mu = 1$:

$$x = 1,59 \cdot 10^{-4} \sqrt{f b / R_{ж}}, \quad (2-80)$$

где f — частота, 1/с;

$R_{ж}$ — сопротивление жилы постоянному току, Ом/см;

коэффициент $b \leq 1$ учитывает, что жила состоит из отдельных проволок.

Таблица 2-3

Значения коэффициента b для жил различной конструкции

Конструкция жил	Значение b	
	Поверхностный эффект	Эффект близости
Круглые и секторные скрученные	1	0,8
Круглые сплошные и полые, состоящие из изолированных друг от друга секторов или сегментов:		
4 сегмента	0,435	0,37
6 сегментов	0,39	—
Полые жилы	$b = \frac{d_{ж} - d_{к}}{d_{ж} + d_{к}} \left(\frac{d_{ж} + 2d_{к}}{d_{ж} + d_{к}} \right)$	
	$(d_{к} - \text{диаметр канала жилы})$	

При слабо выраженном поверхностном эффекте, когда глубина проникновения больше радиуса жилы, для расчета y_6 и y_n могут быть рекомендованы приближенные формулы, справедливые при $x \leq 2,8$ [Л. 5]:

$$y_n = x^4 / (192 + 0,8 x^4) \quad (2-81)$$

и

$$y_6 = y'_n \left(\frac{d_{ж}}{S} \right)^2 \left[\frac{1,18}{y'_n + 0,27} + 0,312 \left(\frac{d_{ж}}{S} \right)^2 \right], \quad (2-82)$$

где y'_n — определяется по (2-80) и (2-81), но значение коэффициента b берется из табл. 2-3 для эффекта близости;

S — расстояние между осями жил.

У кабелей, проложенных в стальном трубопроводе или бронированных стальной броней, значения y_n и y_6 рекомендуется увеличивать в 1,7 раза, так как наличие такой брони приводит к возрастанию магнитного поля.

В конструкциях криогенных кабелей электрическая проводимость металла жил значительно возрастает, что приводит к сильно выраженному поверхностному эффекту. В этом случае следует пользоваться методами расчета, разработанными в теории кабелей связи, или применять общие методы электротехники для жил специальной конструкции. В обычных конструкциях кабелей влияние поверхностного эффекта и эффекта близости практически начинает сказываться только для жил сечением 300 мм² и более.

Пример 2-4. Рассчитать сопротивление переменному току медной жилы кабеля сечением 550 мм². Диаметр жилы $d=31$ мм. Расстояние между жилами $S=62$ мм. Температура жилы 70 °С. Сопротивление постоянному току

$$\begin{aligned} R_{ж} &= 1,03 \frac{\rho_{20}}{Q} [1 + 0,004 (T_{ж} - 20)] = \\ &= \frac{1,03 \cdot 1,724 \cdot 10^{-4}}{5,50} (1 + 0,2) = 4,03 \cdot 10^{-7} \text{ Ом/см.} \end{aligned}$$

Коэффициент 1,03 учитывает увеличение сопротивления жилы за счет скрутки.

Вычислим значение x_n для определения поверхностного эффекта

$$x_n = 1,59 \cdot 10^{-4} \sqrt{fb/R_{ж}} = 1,59 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{50 \cdot 1}{4,03 \cdot 10^{-7}}} = 1,77$$

и эффекта близости

$$x_6 = 1,59 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{50 \cdot 0,8}{4,03 \cdot 10^{-7}}} = 1,6.$$

Таблица 2-4

*Электрические удельные сопротивления
и температурные коэффициенты*

Материал	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м при 20 °С	$\alpha \cdot 10^3$, 1/°С
Медь	1,7241	3,93
Алюминий	2,8264	4,03
Свинец	21,4	4
Сталь	13,8	4,5
Бронза	3,5	3,0
Нержавеющая сталь	70	—

По (2-81) и (2-82) находим y_n , y'_n и y_s : $y_n = 1,77^4 / (192 + 0,8 \times 1,77^4) = 0,0485$; $y'_n = 1,6^4 / (192 + 0,8 \cdot 1,6^4) = 0,033$;

$$y_s = 0,033 \left(\frac{31}{62} \right)^2 \left[\frac{1,18}{0,033 + 0,27} + 0,312 \left(\frac{31}{62} \right)^2 \right] = 0,032.$$

Таким образом, $R_{ж\sim} = R_{ж\sim} = (1 + y_n + y_s) = 4,03 \cdot 10^{-7} (1 + 0,0485 + 0,032) = 4,35 \cdot 10^{-7}$ Ом/см.

Сопротивление на переменном токе на 8% больше, чем на постоянном.

В табл. 2-4 приведены значения ρ и α , рекомендованные в [Л. 5].

Для изделий, изготовленных из этих металлов (провода, жилы), значение ρ несколько превышает приведенные в табл. 2-4.

2-15. ПОТЕРИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ КАБЕЛЕЙ

При передаче переменного тока по одножильным кабелям жилы образуют первичную обмотку воздушного трансформатора, вторичной обмоткой которого являются металлические оболочки.

Если оболочки замкнуты и заземлены только с одного конца линии, то на противоположном конце линии между оболочками возникает напряжение, пропорциональное току в жилах и длине линии. Это напряжение может достигать нескольких десятков или даже сотен вольт на длине 1 км. Наличие такого напряжения нежелательно, и для его устранения необходимо замкнуть и заземлить оболочки на обоих концах линии.

В этом случае по оболочкам проходит ток, который составляет 20—80% тока в жилах, а потенциалы оболочек близки к нулю, так как наведенная э. д. с. равна

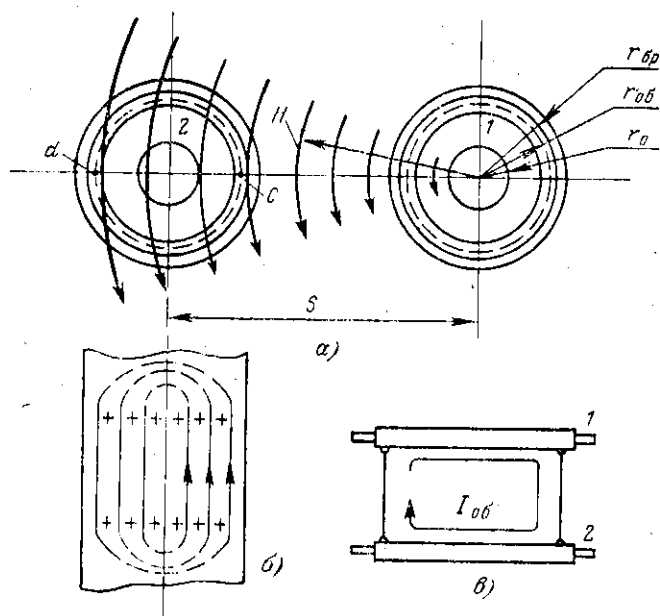


Рис. 2-16. Магнитное поле двух одножильных кабелей.

падению напряжения за счет уравнивающего тока, проходящего по оболочкам. Ток в оболочках приводит к появлению в них значительных потерь энергии.

Рассмотрим электромагнитные процессы в оболочках на примере однофазной линии. Ток в жиле кабеля 1 (рис. 2-16, а) обуславливает магнитное поле, напряженность которого направлена по concentрическим окружностям и может быть вычислена на основании закона полного тока:

$$H = \mu_0 I / 2\pi r, \quad (2-83)$$

где H — напряженность магнитного поля, А/м;

I — ток в жиле, А.

Электродвижущая сила, возникающая в контуре, ограниченном оболочкой кабеля 1 и отдельными участками оболочки кабеля 2, пропорциональна магнитному потоку от жилы кабеля 1, заключенному в этом контуре. В точке с она будет наименьшей, а в точке d — наибольшей.

Если оболочки на одном из концов будут разомкнуты, то по оболочке кабеля 2 будут проходить замкнутые

токи, как это показано на рис. 2-16,б. При этом на конце оболочки появится среднее общее напряжение, приближенно определяемое магнитным потоком между осью кабеля 2 и оболочкой кабеля 1.

При замкнутых оболочках (рис. 2-16,в) по оболочке кабеля 2 будут также проходить уравнивающие токи, так что на единице длины оболочки будет иметь место некоторая средняя э. д. с., значение которой мы также приближенно будем рассчитывать, исходя из потока между осью кабеля 2 и оболочкой кабеля 1. Этот поток может быть вычислен по формуле:

$$\Psi = \frac{\mu_0}{2\pi} I \int_{r_{об}}^S \mu \frac{dr}{r}, \quad (2-84)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$, Г/м;

$r_{об}$ — средний радиус оболочки.

Магнитное поле, которое проходит в области между оболочкой и жилой кабеля 1, не пересекает контура между оболочками и не учитывается при расчете э. д. с. в оболочках.

Относительную магнитную проницаемость μ для всех материалов, кроме стальной брони, можно принимать равной 1. Тогда интеграл в (2-84) может быть разделен на слагаемые, в которых μ постоянна:

$$\Psi = \frac{\mu_0}{2\pi} I \int_{r_{об}}^{r_{бр}} \frac{dr}{r} + \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} I \int_{r_{бр}}^{r_{бр} + \Delta_{бр}} \frac{dr}{r} + \frac{\mu_0}{2\pi} I \int_{r_{бр} + \Delta_{бр}}^S \frac{dr}{r}, \quad (2-85)$$

где $r_{бр}$ — внутренний радиус брони;

$\Delta_{бр}$ — толщина брони.

Из (2-85) следует, что

$$\Psi = \frac{\mu_0}{2\pi} I \left[\ln \frac{r_{бр}}{r_{об}} + \ln \frac{S}{r_{бр} + \Delta_{бр}} \right] + \frac{\mu \mu_0}{2\pi} I \ln \left(1 + \frac{\Delta_{бр}}{r_{бр}} \right). \quad (2-86)$$

Так как $\Delta_{бр} \ll r_{об}$, то сумму логарифмов в квадратных скобках можно приближенно записать как $\ln(S/r_{об})$, а второе слагаемое — в виде первого члена разложения в ряд $\ln(1+x) = x - x^2/2 + \dots$

$$\Psi = \frac{\mu_0}{2\pi} I \left(\ln \frac{S}{r_{об}} + \mu \frac{\Delta_{бр}}{r_{бр}} \right). \quad (2-87)$$

По определению коэффициент взаимной индукции между жилой I и контуром оболочек на единице длины кабеля равен:

$$M = \frac{\Psi}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{S}{r_{об}} + \mu \frac{\Delta_{оп}}{r_{сп}} \right), \quad (2-88)$$

а э. д. с. в контуре оболочек на единице длины кабеля

$$E = j\omega MI. \quad (2-89)$$

Аналогичные выводы можно сделать и для тока в жиле 2. При этом суммарная э. д. с. в контуре оболочек от тока в двух жилах будет

$$E = 2j\omega MI. \quad (2-90)$$

Эта формула может быть применена для расчета напряжения между разомкнутыми на одном конце оболочками.

Если оболочки замкнуты с обоих концов, то магнитное поле в контуре оболочек будет определяться суммой тока в жиле и оболочке. Это приведет к изменению выражения (2-90):

$$E = 2j\omega M(I + I_{об}). \quad (2-91)$$

Ток $I_{об}$ вызовет в контуре оболочек падение напряжения, равное $2I_{об}R_{об}$. Тогда в соответствии с законом Кирхгофа

$$2j\omega M(I + I_{об}) + 2I_{об}R_{об} = 0.$$

Решая это уравнение, получаем выражение для тока в оболочках:

$$I_{об} = -I \frac{j\omega M}{R_{об} + j\omega M}, \quad (2-92)$$

где $R_{об}$ — сопротивление оболочки на единицу длины кабеля.

Модуль тока равен:

$$I_{об} = \omega M / \sqrt{R_{об}^2 + (\omega M)^2}. \quad (2-93)$$

Отношение потерь в оболочке к потерям в жиле равно:

$$y_{об} = \frac{I_{об}^2 R_{об}}{I^2 R_{ж\sim}} = m^2 \frac{R_{об}}{R_{ж\sim}}, \quad (2-94)$$

где

$$m^2 = (\omega M)^2 / [R_{об}^2 + (\omega M)^2].$$

Аналогичным методом могут быть получены формулы для вычисления потерь в оболочках трехфазной линии [Л. 19]. Если кабели расположены по вершинам равностороннего треугольника, то справедливо (2-94).

При расположении трех кабелей в одной плоскости с одинаковым расстоянием между осями жил формулы для вычисления потерь в оболочках имеют вид (2-94): для среднего кабеля

$$m_{21}^2 = 1/(Q^2 + 1), \quad (2-95)$$

а для крайних кабелей

$$m_{1,3}^2 = \frac{P^2 + 3Q^2 \pm 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}, \quad (2-96)$$

где

$$P = R_{об}/[\omega(M + M_1)]; \quad Q = R_{об}/[\omega(M + M_1/3)];$$

$$M_1 = (\mu_0/2\pi) \ln 2 = 1,38 \cdot 10^{-7} \text{ Г/м.}$$

Значение M вычисляется по (2-88). Формулы для другого расположения трех и более кабелей приведены в [Л. 19].

Индуктивность линии L может быть получена по (2-88), однако в этом случае нужно учесть магнитный поток между жилой и оболочкой, т. е. при записи уравнения (2-84) следует нижний предел интегрирования принять равным r_0 . Тогда формула для внешней индуктивности L_1 будет иметь вид (отнесенная к одной жиле):

$$\bar{L}_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{S}{r_0} + \mu \frac{\Delta_{ср}}{r_{ср}} \right). \quad (2-97)$$

Кроме того, имеется магнитное поле внутри жилы, которое приводит к появлению внутренней индуктивности L_2 , причем L_2 может быть вычислено по формулам, приведенным в гл. 9. При слабо выраженном поверхностном эффекте $L_2 \approx \mu_0/4\pi$. Тогда суммарная индуктивность

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{S}{r_0} + \mu \frac{\Delta_{ср}}{r_{ср}} + \frac{1}{2} \right). \quad (2-98)$$

При разомкнутых оболочках падение напряжения в линии можно вычислить из соотношения

$$\Delta U = 2I(R_{ж} + j\omega L). \quad (2-99)$$

При замкнутых оболочках следует учесть э. д. с., наведенную в жилах за счет тока в оболочках

$$\Delta U = 2(R_{ж} + j\omega L)I + 2I_{об}j\omega M. \quad (2-100)$$

Подставив в (2-100) $I_{об}$ из (2-92) и сделав преобразования, получим:

$$\Delta U = Iz,$$

где

$$z = 2[R_{ж}(1 + y_{об}) + j\omega(L - m^2M)]. \quad (2-101)$$

Таким образом, наличие потерь и тока в оболочках приводит к увеличению активной составляющей падения напряжения и уменьшению реактивной.

Подобным способом могут быть получены выражения и для падения напряжения в трехфазной линии.

Потери в оболочках и падение напряжения на линии зависят от соотношения $R_{об}/(\omega M)$. Выражение (2-94) может быть представлено в виде

$$y_{об} = \frac{R_{об}}{R_{ж}} \frac{1}{1 + (R_{об}/\omega M)^2}. \quad (2-102)$$

Это выражение имеет максимум при $R_{об}/(\omega M) = 1$, при этом $y_{об} = R_{об}/(2R_{ж})$ и может быть много больше 1. При $R_{об}/(\omega M) \gg 1$ для $y_{об}$ получим:

$$y_{об} \approx (\omega M)^2 / (R_{об}R_{ж}). \quad (2-103)$$

В обычных конструкциях кабелей значения ωM и $R_{ж}$ значительно меньше $R_{об}$ и потери в оболочках приблизительно пропорциональны взаимной индуктивности M .

Значение M возрастает с увеличением расстояния между кабелями, поэтому для уменьшения потерь в оболочках следует прокладывать кабели на меньшем расстоянии друг от друга. В то же время это ухудшает условия теплоотвода от кабелей. Поэтому для каждого конкретного случая следует рассчитывать оптимальное расстояние между кабелями.

Наличие стальной брони также увеличивает значения M и L . Так, если отношение $\Delta_{бр}/r_{бр}$ составляет примерно 0,1, а $\mu = 300$, то второе слагаемое в скобках (2-88) достигает 30, в то время как $\ln(S/r_{бр})$ будет значительно меньше. Таким образом, наличие ленточной стальной брони может в несколько раз увеличить потери в оболочках и падение напряжения на линии. Поэтому стальную ленточную броню нельзя применять для одножильных кабелей.

В трехжильных кабелях, работающих в трехфазной системе, сумма токов во всех жилах равна нулю и от-

существует м. д. с., направленная вдоль замкнутой ферромагнитной цепи, которая состоит из стальной брони, расположенной по внешней окружности кабеля. Магнитное поле в броне в этом случае будет значительно меньшим, и это позволяет применять стальную броню для трехжильных кабелей.

Потери при наличии брони из круглых проволок будут значительно меньше, так как в местах переходов от одной проволоки к другой магнитный поток встречает значительное сопротивление, тем более что обычно применяется оцинкованная стальная проволока. Для уменьшения потерь заменяют часть стальных проволок медными, расположенными равномерно по окружности кабеля.

Пример 2-5. Определить коэффициент y_{06} для маслonaполненного кабеля сечением 550 мм^2 на напряжение 220 кВ. Наружный диаметр кабеля 82 мм. Толщина оболочки $\Delta_{06}=2,5 \text{ мм}$. Расстояние между осями кабеля $S=200 \text{ мм}$. Кабели расположены в горизонтальной плоскости.

1. Определяем сопротивление свинцовой оболочки. Сечение оболочки равно:

$$Q_{06} = \frac{\pi}{4} (8,2^2 - 7,7^2) = 6,28 \text{ см}^2.$$

Температуру оболочки примем равной 45°C :

$$R_{06} = \frac{\rho_{06}}{Q_{06}} [1 + 0,004 (45 - 20)] = \frac{21,4 \cdot 10^{-8}}{6,28} 1,1 = 3,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом/см.}$$

Значения ρ_{06} для металлов определяются из табл. 2-4.

2. Определяем сопротивление жилы переменному току, как это показано в примере 2-4. Для выбранного сечения жилы оно рассчитано и равно $4,26 \cdot 10^{-7} \text{ Ом/см}$.

3. Определяем y_{06} (2-95) и (2-96):

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{S}{r_{06}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-9}}{2\pi} \ln \frac{200 \cdot 2}{79,5} = 3,92 \cdot 10^{-8} \text{ Г/см;}$$

$$M_1 = 1,38 \cdot 10^{-8} \text{ Г/см;}$$

$$P = \frac{R_{06}}{\omega (M + M_1)} = \frac{3,75 \cdot 10^{-8}}{314 (3,92 \cdot 10^{-8} + 1,38 \cdot 10^{-8})} = 2,22;$$

$$Q = \frac{R_{06}}{\omega \left(M + \frac{M_1}{3} \right)} = \frac{3,75 \cdot 10^{-8}}{314 \left(3,92 \cdot 10^{-8} + \frac{1,38}{3} 10^{-8} \right)} = 2,68;$$

$$y_{062} = \frac{1}{Q^2 + 1} \frac{R_{06}}{R_{ж}} = \frac{1}{2,68^2 + 1} \frac{3,75 \cdot 10^{-8}}{4,26 \cdot 10^{-7}} = 1,07;$$

$$y_{об1,3} = \frac{P^2 + 3Q^2 + 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)} \frac{R_{об}}{R_{ж\sim}} =$$

$$= \frac{2,22^2 + 3 \cdot 2,68^2 + 2 \cdot 1,73(2,22 - 2,68) + 4}{4(2,22^2 + 1)(2,68^2 + 1)} \cdot \frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{4,26 \cdot 10^{-7}};$$

окончательно $y_{об1,3}$ равен 2,27 при знаке плюс и 2,54 при знаке минус. Если кабели расположить по углам равностороннего треугольника с таким же расстоянием между осями, то

$$y_{об} = \frac{(\omega M)^2}{R_{ос}^2 + (\omega M)^2} \frac{R_{ос}}{R_{ж\sim}} =$$

$$= \frac{(314 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3})^2}{(3,75 \cdot 10^{-6})^2 + (314 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{4,26 \cdot 10^{-7}} = 0,86.$$

При таком расположении потери в оболочках значительно ниже.

Как видно из расчетов примера 2-5, потери в оболочках достаточно велики. К некоторому снижению потерь приводит уменьшение расстояния между осями кабеля. Если длина линии невелика, то можно замкнуть оболочки только с одной стороны, но при этом следует предусмотреть установку специальных изолирующих муфт. При большой длине линии целесообразно применять транспозицию оболочек, как это показано на рис. 2-17.

Вся линия должна быть разделена на секции транспонирования длиной l . Оболочки 1 на длине l должны быть разделены на три равных по длине изолированных участка изолирующими соединительными муфтами 2.

В конце первого участка напряжение между оболочками фаз A и B будет U_{AB} . В конце второго участка напряжение между оболочками фаз C и B будет равно геометрической сумме $U_{AB} + U_{BC}$. И, наконец, в конце третьего участка напряжение между оболочками фаз C и A будет равно геометрической сумме $U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}$, которая всегда будет равна нулю (при геометрически

постоянном взаимном расположении кабелей).

Так как напряжение между оболочками в конце секции транспонирования равно нулю, то можно произвести соединение оболочек и их заземление. Наибольшее напряжение между оболочками будет опреде-

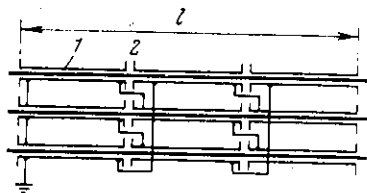


Рис. 2-17. Схема транспозиции оболочек в трехфазной линии.

1 — оболочка; 2 — соединительная муфта.

ляться длиной, равной $1/3$. Если оболочки замкнуты только на одном конце или соединены по системе транспозиции, то в них циркулируют замкнутые токи, как это показано на рис. 2-16,б, которые вызывают потери в оболочках. Эти потери значительно меньше потерь от токов в оболочках, замкнутых на обоих концах линии.

Для расчета потерь в оболочках от вихревых токов внутри каждой оболочки и в оболочках трехжильных кабелей используют приближенные формулы [Л. 5]. Неточность определения потерь в оболочках по таким формулам не имеет существенного значения, так как потери в оболочке в этом случае не превышают нескольких процентов потерь в жилах. При этом влияние потерь в оболочке на значение допустимого тока нагрузки кабеля невелико.

Глава третья

✓ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАБЕЛЯ

3-1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ТЕПЛОВОМ РАСЧЕТЕ КАБЕЛЯ

Вопрос о предельно допустимой температуре нагрева кабеля имеет большое значение, так как от нее зависят нагрузочная способность, срок службы и надежность работы кабеля. При нагревании кабеля наиболее быстрому старению подвергается бумага, механическая прочность и эластичность которой при этом понижаются. Длительно допустимые температуры для кабелей приведены в табл. 3-1.

Основной целью теплового расчета является определение допустимого тока нагрузки, при котором наибольшая температура в кабеле не превысит установленного значения.

При включении постоянной нагрузки температура кабеля постепенно нарастает (неустановившийся режим) и после определенного промежутка времени принимает постоянное значение. Практически наибольшую температуру всегда имеют жилы кабеля и слои изоляции, непосредственно прилегающие к жиле. Поэтому тепловой расчет кабеля прежде всего сводится к определению температуры жилы.

В § 2-2 было введено понятие о тепловом сопротивлении кабеля [см. (2-29)]. Аналогично можно рассматривать и тепловое сопротивление S_0 среды, окружающей кабель. Тогда температура жилы $T_{ж}$ может быть выра-

Таблица 3-1

Максимально допустимая температура в кабеле

Параметр	Кабель с бумажной изоляцией с вязкой пропиткой на напряжение, кВ				Кабель с полупроводниковой изоляцией на 1—35 кВ	Кабель с поливинилхлоридной изоляцией на 1—35 кВ	Кабель с резиновой изоляцией на 1—10 кВ	Маслянополимерный кабель на напряжение, кВ				Разновыполненный кабель на 35 кВ
	1—3	6	10	20—35				35	110	220	500	
Длительно допустимая температура, °С Кратковременно допустимая температура (не более 100 ч в год)	80	65	60	50	80—70	70	65	80	70	65	60	80
	—	—	—	—	—	—	—	90	80	75	70	90

жена упрощенной формулой (об учете потерь в изоляции см. § 3-2)

$$T_{ж} = (P_{ж} + P_{из}/2) S_{из} + \Sigma P_{к} (S_{п} + S_0) + T_0, \quad (3-1)$$

где T_0 — температура окружающей среды;

$\Sigma P_{к}$ — суммарные потери в кабеле;

$S_{п}$ — тепловое сопротивление защитных покровов;

S_0 — тепловое сопротивление окружающей среды. Принципиальные схемы замещения тепловых сопротивлений и тепловых потоков в различных кабелях показаны ниже.

Для теплового расчета необходимо вычислить: 1) потери в жиле $P_{ж}$, оболочках $P_{об}$ и изоляции $P_{из}$ кабеля; 2) тепловые сопротивления изоляции кабеля и его защитных покровов; 3) тепловое сопротивление среды, окружающей кабель.

Кроме того, необходимо учесть сезонные колебания температуры окружающей среды T_0 и влияние посторонних источников тепла.

Электрическое сопротивление жилы на единицу длины кабеля при постоянном токе можно вычислять по формуле

$$R_{ж} = \frac{(1 + \alpha_k) \rho_0}{q} \times [1 + \alpha (T_{ж} - 20)], \quad (3-2)$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление проволоки, примененной для изготовления жилы (при 20 °C);

α — температурный коэффициент увеличения сопротивления меди и алюминия;

q — номинальное сечение жилы;

k — коэффициент укрутки, равный 0,015—0,03.

Потери в жиле при переменном токе вычисляются по формуле

$$P_{ж} = R_{ж} I^2, \quad (3-3)$$

где сопротивление жилы переменному току $R_{ж}$ — вычисляется с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости (см. § 2-14) при заданной температуре жилы.

Потери в защитных металлических оболочках играют существенную роль в случае применения одножильных кабелей в сетях переменного тока. Они могут быть вычислены по формуле (§ 2-15)

$$P_{об} = P_{ж} y_{об}. \quad (3-4)$$

В кабелях высокого напряжения влияние выделения тепла в изоляции за счет диэлектрических потерь становится весьма существенным. Диэлектрические потери могут быть вычислены (при условии независимости $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ от радиуса) по формуле

$$P_{из} = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (3-5)$$

Емкость кабеля C вычисляется по (2-40).

3.2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОДНОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ И УЧЕТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Расчет теплового сопротивления изоляции одножильного кабеля на единицу длины производится по (2-29), которая может быть записана в следующей форме:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (3-6)$$

где $\sigma_{из}$ — удельное тепловое сопротивление изоляции.

Расчет теплового сопротивления защитных покровов производится по такой же формуле, но под знак логарифма необходимо подставлять отношение радиуса по защитным покровам к радиусу кабеля под защитными покровами.

Значения удельных тепловых сопротивлений различных материалов приведены в табл. 3-2.

Теплофизические свойства материалов

Материал	σ , °С·м/Вт	Удельная теплоемкость 10^{-3} , Дж/(кг·°С)	Плотность ρ , кг/м ³
Бумажная изоляция с вязкой пропиткой: в состоянии поставки:			
1—10 кВ	5—6,5	1,37	1252
20 и 35 кВ	5—5,5	1,37	1252
в нормальной эксплуатации:			
1—10 кВ	6—7	1,37	1252
20 и 35 кВ	5,5—6	1,37	1252
обедненная пропитка	7—7,5	—	—
Бумажная изоляция маслonaполненных кабелей	4,5—5	1,37	1252—1365
Полиэтилен:			
$T = 20^\circ\text{C}$	3	2,3	950
$T = 80^\circ\text{C}$	3	3,75	
Поливинилхлоридный пластикат	4—7	1,33	1250
Резина изоляционная	2,5—3	1,35—1,65	1400
Резина шланговая	3—3,5	1,35—1,65	1400
Кабельная пряжа пропитанная	5,5—6,5	—	—
То же с ленточной броней	3	—	—
Кабельная пряжа непропитанная	—	1,33	500
Медь	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,38	8800
Алюминий	$4,8 \cdot 10^{-3}$	0,92	2700
Свинец	$29 \cdot 10^{-3}$	0,13	11 340
Сталь	$(14,4—12,3) \cdot 10^{-3}$	0,46	7800
Минеральное масло	9	1,65	900
Почва с повышенной влажностью (песок больше 9%, песчано-глинистая больше 14%)	0,8	До 2,1	2200—2000
Почва с нормальной влажностью (песок 7—9%, песчано-глинистая 12—14%)	1,2	0,83	1900
Почва с пониженной влажностью (песок 4—7%, песчано-глинистая 8—12%)	1,8	0,83	1800

Материал	$\sigma, ^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$	Удельная теплоем- кость 10^{-3} , Дж/(кг $\cdot^\circ\text{C}$)	Плотность ρ , кг/м ^{3}
Сухая почва (песок 4% влаги, каменистая почва)	2,4	0,80	1430
Бетон	0,9	0,83	2200
Асфальт	1,6	1,65	1000

Тепловые потери в диэлектрике в отличие от потерь в жиле распределены по всей изоляции кабеля, поэтому расчет перегрева кабеля за счет диэлектрических потерь будет несколько иным.

Диэлектрические потери в единице объема равны:

$$P = E^2 \omega \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta = \left(\frac{U}{r \ln \frac{R}{r_0}} \right)^2 \omega \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta. \quad (3-7)$$

Диэлектрические потери в слое между r и $r+dr$ на единице длины кабеля будут (объем слоя равен $2\pi r dr$):

$$dP = \frac{U^2}{\left(\ln \frac{R}{r_0} \right)^2} \omega 2\pi \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta \frac{dr}{r}. \quad (3-8)$$

Сравнивая (3-5) и (3-8), записываем:

$$dP = \frac{P_{из}}{\ln \frac{R}{r_0}} \frac{dr}{r}. \quad (3-9)$$

Тепловой поток от диэлектрических потерь, проходящий через слой с радиусом r , равен:

$$P_r = \int_{r_0}^r dP = \frac{P_{из}}{\ln \frac{R}{r_0}} \int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = P_{из} \ln \frac{r}{r_0} / \ln \frac{R}{r_0}. \quad (3-10)$$

Перепад температуры в слое dr

$$d\tau = P_r dS = P_r \frac{\sigma_{из} dr}{2\pi r} = P_{из} \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_0}} \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \frac{dr}{r}. \quad (3-11)$$

Разность температур между жилой и оболочкой

$$\tau_{\text{ж}} = \int_{r_0}^R d\tau = \frac{P_{\text{из}} \sigma_{\text{из}}}{2\pi \ln \frac{R}{r_0}} \int_{r_0}^R \ln \frac{r}{r_0} \frac{dr}{r} = \frac{P_{\text{из}}}{2} \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0} = \frac{P_{\text{из}}}{2} S_{\text{из}}. \quad (3-12)$$

Таким образом, перепад температуры в изоляции, обусловленный диэлектрическими потерями, равен половине произведения потерь в изоляции на ее тепловое сопротивление между жилой и оболочкой.

Это происходит вследствие того, что тепловой поток от потерь в слоях изоляции, расположенных ближе к оболочке, не проходит через всю изоляцию, а только через слои, разделяющие рассматриваемый слой от оболочки.

При наличии потерь в жиле и изоляции перепад температуры между жилой и оболочкой вычисляется по формуле

$$\tau_{\text{ж}} = \left(P_{\text{ж}} + \frac{P_{\text{из}}}{2} \right) S_{\text{из}}. \quad (3-13)$$

При определении нагрева кабелей диэлектрические потери в изоляции учитываются только в кабелях на напряжение 100 кВ и выше, так как в современных кабелях на меньшее напряжение диэлектрические потери весьма малы по сравнению с потерями в жиле.

3-3. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МНОГОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

По аналогии с формулой теплового сопротивления изоляции одножильного кабеля (§ 3-2) тепловое сопротивление изоляции многожильного кабеля, отнесенное к потерям во всех жилах, можно выразить уравнением

$$S_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi n} G, \quad (3-14)$$

где n — число жил (если потери в них одинаковы);

G — геометрический коэффициент (фактор).

Так как теплопроводность жилы и оболочки во много раз больше теплопроводности изоляции, то делаем допущение, что поверхности жилы и оболочки являются изотермическими.

Приближенная картина поля внутри многожильного кабеля может быть получена, если заменить оболочку

соответствующими зеркальными отображениями каждой жилы. Если при построении поля считать, что источники тепла сконцентрированы на осях жил, то для теплового сопротивления двухжильного кабеля может быть получено выражение

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \left[\frac{R^2}{r_0^2} \frac{1 - \frac{a^4}{R^4}}{\sqrt{\frac{4a^2}{r_0^2} - 1}} \right], \quad (3-15)$$

где $a = r_0 + \Delta$ и $R = r_0 + \Delta + \Delta_1$;

r_0 — радиус жилы;

R — радиус оболочки;

Δ — толщина изоляции на жиле;

Δ_1 — толщина общего (поясного) слоя изоляции.

При графическом методе построения картины плоскопараллельного поля должны быть соблюдены следующие условия: 1) линии теплового поля и линии равной температуры (изотермические поверхности) должны пересекаться всюду под прямым углом; 2) линии теплового поля должны быть перпендикулярны к поверхности жилы и оболочки; 3) ячейки сетки, образованной линиями теплового поля и изотермическими линиями, по возможности должны быть подобными друг другу, т. е. отношения $\Delta n / \Delta a$ должны быть одинаковыми во всех ячейках.

На рис. 3-1 показан пример построения теплового поля трехжильного кабеля с круглыми жилами. Вследствие симметрии в этом случае достаточно рассмотреть поле в секторе с углом 60° .

Тепловое сопротивление каждой ячейки равно:

$$\Delta S = \sigma_{из} \Delta n / \Delta a.$$

Общее тепловое сопротивление можно получить, сложив последовательно и параллельно (в соответствии с чертежом поля) сопротивления отдельных ячеек.

С помощью графического метода получено следующее уравнение для вычисления

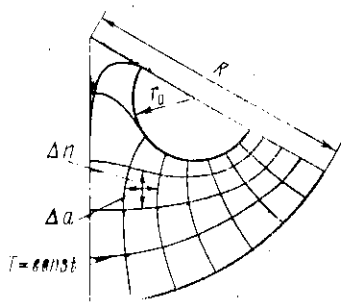


Рис. 3-1. Пример построения теплового поля трехжильного кабеля.

геометрического коэффициента трехжильного кабеля с поясной изоляцией:

$$G = (0,85 + 0,2n) \ln [(8,3 - 2,2n)m + 1], \quad (3-16)$$

где $m = (\Delta + \Delta_1) / (2r_0)$; $n = \Delta_1 / \Delta$

(Δ и Δ_1 — толщины жильной и поясной изоляции).

Для кабелей с числом жил m более трех можно использовать приближенную формулу

$$G = \ln \left[\frac{m(8\Delta + \Delta_1)(\Delta + \Delta_1)}{8r_0\Delta_1} + 1 \right]. \quad (3-17)$$

При вычислении теплового сопротивления кабеля с секторными жилами можно найти его наибольшее и наименьшее значения.

Если бы вместо трех секторных жил была одна жила большого сечения с радиусом, равным радиусу закругления секторных жил $R_{ск}$ (рис. 2-4), то значение теплового сопротивления такого одножильного кабеля явилось бы нижним пределом теплового сопротивления трехжильного кабеля с секторными жилами:

$$S_{к.н} = \frac{\sigma_{нз}}{2\pi} \ln \frac{R_{ск} + \Delta + \Delta_1}{R_{ск}}. \quad (3-18)$$

Верхний предел получим, если будем учитывать теплопередачу только от внешней поверхности жил к металлической оболочке:

$$S_{к.в} = \frac{\sigma_{нз}}{2\pi} \frac{2\pi r_2}{2\pi r_2 - 6\Delta} \ln \frac{R_{ск} + \Delta + \Delta_1}{R_{ск}}, \quad (3-19)$$

где $r_2 = R_{ск} + \Delta$.

Фактическое значение $S_k = S_{к.н} + S_{к.в}$. Обычно имеет место соотношение $S_{к.в} / S_{к.н} = (1,1 \div 1,2)$. Поэтому можно вычислять тепловое сопротивление по формуле

$$S_k = 1,1 S_{к.н}. \quad (3-20)$$

При наличии экранов на каждой жиле трехжильного кабеля уменьшение теплового сопротивления может быть получено по кривым рис. 3-2 в зависимости от параметра p :

$$p = \frac{\Delta_э}{2r_0} \frac{\sigma_{нз}}{\sigma_{эк}}, \quad (3-21)$$

где $\Delta_э$ — толщина экрана;

$\sigma_{эк}$ — удельное тепловое сопротивление экрана.

При определении теплового сопротивления изоляции кабеля с отдельно освинцованными жилами (ОСБ)

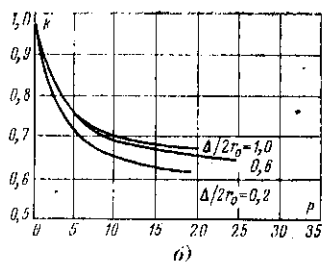
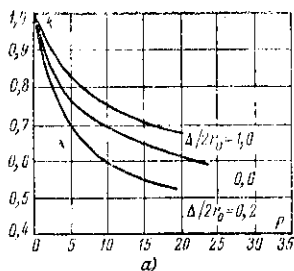


Рис. 3-2. Отношение теплового сопротивления изоляции кабеля с экранированными жилами к теплового сопротивлению изоляции кабеля с жилами без экранов.

а — с круглыми жилами; б — с секторными жилами.

вследствие значительной толщины и теплопроводности свинцовые оболочки вокруг каждой фазы можно приближенно рассматривать как изотермические поверхности. Тогда тепловое сопротивление фазы кабеля от жилы до брони можно определить как сумму тепловых сопротивлений изоляции одножильного кабеля и теплового сопротивления заполнения между свинцовой оболочкой и броней.

Если броню кабеля также принять за эквипотенциальную поверхность, то тепловое сопротивление заполнения $S_{к.п}$ может быть вычислено по (3-16) и (3-14), в которых вместо r_0 нужно подставить наружный радиус свинцовой оболочки, вместо Δ — толщину подушки, нанесенной на каждую свинцовую оболочку, и вместо Δ_1 — толщину подушки, нанесенной вокруг трех скрученных отдельно освинцованных жил.

Таким образом, тепловое сопротивление кабеля марки ОСБ можно определить из формулы

$$\frac{\tau_{ж}}{3P_{ж}} = S_{к} = \frac{S_{из}}{3} + S_{к.п}, \quad (3-22)$$

где $\tau_{ж}$ — перепад температуры между жилой и броней;

$P_{ж}$ — потери в жиле;

$S_{из}$ — тепловое сопротивление между жилой и свинцовой оболочкой, рассчитываемое по (3-6).

3-4. ТЕПЛОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАБЕЛЕЙ В ТРУБОПРОВОДЕ С МАСЛОМ ИЛИ ГАЗОМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Для кабелей в трубе при расположении фаз по треугольнику с вершиной в верхнем положении (рис. 3-3) наибольшую температуру имеет верхняя жила. Поэтому

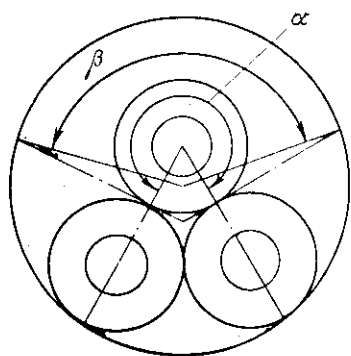


Рис. 3-3. Схема расположения кабеля в трубопроводе.

все расчеты производятся именно для этой жилы.

Как показывают эксперименты [Л. 16], экран на изолированной жиле и труба могут быть приняты за изотермические поверхности, а перепад температур в масле или газе вследствие конвективной теплопередачи имеет место в основном у поверхности кабеля и трубопровода, а в средней части масляной или газовой зоны перепад температур практически отсутствует.

В этом случае тепловое сопротивление зоны масла можно рассматривать как сумму следующих сопротивлений теплопередачи: от поверхности кабеля в среду, заполняющую трубопровод, S_{m1} , и от среды к стенке трубопровода S_{m2} :

$$S_{m0} = S_{m1} + S_{m2} = \frac{b}{k_1 \pi d} + \frac{b}{k_2 \pi D}, \quad (3-23)$$

где b — удельное сопротивление теплопереходу от поверхности экрана или трубопровода в среду, заполняющую трубопровод;

d и D — диаметр кабеля по экрану и внутренний диаметр трубопровода;

$k_1 = \alpha / (2\pi) = 5/6$ — коэффициент, учитывающий, какая часть периметра верхнего кабеля участвует в теплоотводе через масло;

$k_2 = \beta / (2\pi)$ — коэффициент, учитывающий, какая часть периметра внутренней поверхности трубопровода участвует в теплопередаче через масло; он определяется графически по рис. 3-3.

Если трубопровод заполнен маслом средней вязкости, то при $40-60^\circ \text{C}$ $b = 4,25 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$. При заполнении азотом под давлением 1,4 МПа $b = (5 \div 5,2) \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$.

При расчете полного теплового сопротивления зоны масла S_m необходимо учитывать также теплоотвод от поверхности верхнего кабеля к трубопроводу благодаря непосредственному соприкосновению кабелей между со-

бой и трубопроводом, т. е. учитывать теплоотвод вдоль экранов, тепловое сопротивление которых подключено параллельно $S_{м0}$:

$$S_{м} = S_{м0} S_{эк} / (S_{м0} + S_{эк}). \quad (3-24)$$

Для кабеля с локровом из двух медных лент и двух полукруглых проволок значение $S_{эк}$ составляет примерно $2,30^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}/\text{Вт}$.

3.5. ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ, ОКРУЖАЮЩЕЙ КАБЕЛЬ

С точки зрения нагрева жил при нагрузке в наилучших условиях по сравнению с другими видами прокладки находится подводный кабель, так как вода, омывающая кабель, обеспечивает хороший отвод тепла с наружной поверхности кабеля, и тепловое сопротивление среды в этом случае можно считать практически равным нулю.

Однако прокладка в воде в большинстве случаев сводится к прокладке кабеля во влажной почве, так как большинство подводных кабелей при прокладке углубляются в дно реки, а если кабели прокладываются без углубления, то через некоторое время они заносятся грунтом.

Кабель, проложенный в воздухе, охлаждается вследствие переноса тепла от наружной поверхности к окружающему воздуху путем конвекции. Наряду с этим некоторое значение имеет и передача тепла посредством теплового излучения. Охлаждение кабеля может быть различным в зависимости от скорости и направления перемещения воздуха (обдувания). На практике для расчетов обычно принимают среднее значение коэффициента теплопередачи для свободной конвекции.

При прокладке кабелей в туннелях и каналах следует учитывать общий нагрев воздуха в туннеле, наличие горячих восходящих потоков воздуха от ниже расположенных кабелей и нагретых труб.

Как правило, воздушное охлаждение менее эффективно, чем охлаждение при прокладке в земле, за исключением некоторых случаев, когда прокладка высоковольтных кабелей производится на большой глубине. В нормах на кабели напряжением до 10 кВ нагрузка в воздухе снижается по сравнению с нагрузкой в земле примерно на 20—30%.

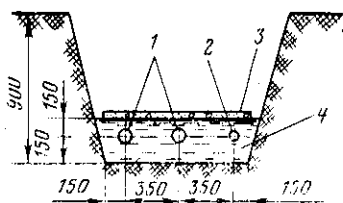


Рис. 3-4. Пример прокладки кабелей в земле.

1 — кабель на 20 или 35 кВ; 2 — кабель на 10 кВ; 3 — бетонная плита; 4 — мягкий грунт, песок.

Пример прокладки кабелей в земле приведен на рис. 3-4. Кабель укладывается на дно траншеи и засыпается мягкой землей с последующей тщательной утрамбовкой ее. Слой земли, непосредственно примыкающий к кабелю, должен плотно прилегать к его поверхности. Лучшее всего это достигается при использовании подсыпки из мягкой земли

или песка. В одной траншее могут быть уложены несколько кабелей.

Наименее благоприятные условия охлаждения имеют место при прокладке кабеля в бетонных блоках, находящихся в земле. В этом случае кабель без брони в одной свинцовой оболочке протягивается в отверстие блока, и тепловой поток, выходящий из кабеля, преодолевает сначала сопротивление прослойки воздуха, а затем проходит через стенки блока в окружающую почву.

При прокладке в воздухе превышение температуры поверхности кабеля над температурой окружающего воздуха может быть вычислено по формуле

$$T_{об} - T_0 = \theta_{об} = S_b \Sigma P, \quad (3-25)$$

где ΣP — сумма всех потерь в кабеле;

S_b — сопротивление теплопередачи к воздуху.

Сопротивление теплопередачи от поверхности кабеля в воздух зависит от диаметра кабеля, состояния его поверхности, разности температур между кабелем и воздухом и от средней температуры воздуха. Расчет конвективной теплопередачи может быть произведен по критерияльным уравнениям теории теплопередачи.

Таблица 3-3

Значения коэффициентов c и n в (3-27)

Gr Pr	c	n	Gr Pr	c	n
$10^{-4} - 10^{-2}$	0,50	0	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	$1/4$
$10^{-2} - 5 \cdot 10^2$	1,18	$1/8$	$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	$1/3$

Зависимость параметров сухого воздуха
от средней температуры

$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60
$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	2,50	2,59	2,67	2,75	2,82	2,89
$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	14,16	15,06	16,00	16,96	17,95	18,97

Коэффициент конвективной теплопередачи h связан с критерием Нуссельта следующим соотношением:

$$\text{Nu} = hd/\lambda, \quad (3-26)$$

где d — наружный диаметр кабеля;

λ — теплопроводность воздуха при средней температуре воздуха.

При свободной конвекции критерий Нуссельта может быть вычислен из приближенного соотношения [Л. 20]:

$$\text{Nu} = c(\text{GrPr})^n, \quad (3-27)$$

где c и n — постоянные коэффициенты, значения которых для различных произведений GrPr приведены в табл. 3-3;

Pr — критерий Прандтля, для воздуха равный 0,72;

Gr — критерий Грасгофа.

$$\text{Gr} = \beta d^3 g \vartheta_{\text{п}} / \nu^2, \quad (3-28)$$

где $\vartheta_{\text{п}}$ — перепад температуры между поверхностью кабеля и окружающей средой;

g — ускорение свободного падения;

ν — кинематическая вязкость воздуха;

β — коэффициент расширения воздуха, равный $1/T_{\text{ср}}$ ($T_{\text{ср}}$ — абсолютная температура).

Параметры воздуха (табл. 3-4) следует брать из справочников при средней температуре воздуха, равной $T_{\text{ср}} = T_0 + \vartheta_{\text{п}}/2$.

При подстановке критерия Nu из (3-27) в (3-26) получим значение коэффициента теплопередачи h . Характер зависимости h от d и $\vartheta_{\text{п}}$ может быть выражен приближенными уравнениями для соответствующих диапазонов, указанных в табл. 3-3:

$$1. \quad h = A_1 \left(\frac{\vartheta_{\text{п}}}{d} \right); \quad (3-29)$$

$$2. \quad h = A_2 \left(\frac{\vartheta_{\text{п}}}{d^5} \right)^{1/8}; \quad (3-30)$$

$$3. \quad h = A_3 \left(\frac{\theta_{\pi}}{d} \right)^{1/4}; \quad (3-31)$$

$$4. \quad h = A_4 \theta_{\pi}^{1/3}, \quad (3-32)$$

где A_1, A_2, A_3 и A_4 — коэффициенты, которые в небольшой степени зависят от $T_{\text{ср}}$.

Первый диапазон соответствует проводам диаметром менее 0,1 мм, для которых коэффициент h не зависит от температуры провода и обратно пропорционален диаметру провода. Значение h превышает 150 Вт/(м²·°C).

Второй диапазон соответствует проводам диаметром от 0,1 до 5 мм, для которых h очень слабо зависит от перепада температур и слабее, чем в первом диапазоне, зависит от диаметра. Значения h находятся в пределах 10—150 Вт/(м²·°C).

Третий диапазон соответствует кабелям диаметром от 5 до 150 мм. Здесь h уже более значительно зависит от перепада температур и довольно слабо зависит от диаметра кабеля. Значения h находятся в пределах 6—10 Вт/(м²·°C).

Четвертый диапазон относится к теплопередаче от трубопроводов диаметром более 150 мм, а также от наружных поверхностей технологического оборудования.

Для силовых кабелей справедливо соотношение (3-31). При обычных режимах работы кабеля можно получить приближенную формулу

$$h = 4,5 \sqrt[4]{\theta_{\pi}/d}, \quad (3-3)$$

где h , Вт/(м²·°C);

d — наружный диаметр кабеля, см.

Уравнения (3-26) и (3-27) могут быть использованы также для расчета коэффициента теплопередачи при охлаждении водой и другими жидкостями.

При прокладке кабеля в воздухе заметную роль может играть теплопередача излучением, при приближенном расчете которой можно использовать уравнение Стефана — Больцмана

$$P_{\pi} = \pi d \epsilon_{\pi} c_0 (T_{\pi}^4 - T_0^4), \quad (3-34)$$

где $c_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·K⁴) — постоянная излучения абсолютно черного тела;

ϵ_{π} — коэффициент черноты поверхности кабеля;

T_n и T_0 — абсолютная температура поверхности кабеля и окружающей среды;

P_n — количество тепла, передаваемого с единицы длины кабеля в единицу времени за счет излучения.

Для суммарной теплопередачи можно записать:

$$\Sigma P = \pi d h \vartheta_n + \pi d \varepsilon_n c_0 (T_n^4 - T_0^4). \quad (3-35)$$

Тогда тепловое сопротивление воздуха, полученное из (3-25) и (3-35), будет

$$S_n = \frac{\vartheta_n}{\Sigma P} = \frac{1}{\pi d (h + \varepsilon_n c_0 \theta)}, \quad (3-36)$$

где $\theta = (T_n^4 - T_0^4) / \vartheta_n \approx T_0^3 (4 + 6 \vartheta_n / T_0)$.

Коэффициент черноты ε_n в инфракрасной области излучения для пластмасс и других органических покрытий приблизительно можно принимать равным 0,8.

Для металлической поверхности ε_n зависит от степени окисления поверхности и ее загрязненности и может изменяться в пределах 0,2—0,6.

Пример 3-1. Рассчитать тепловое сопротивление воздуха для кабеля с наружным диаметром $d=2,5$ см в пластмассовой оболочке. Температура окружающего воздуха $T_0=25^\circ\text{C}$. Предполагаем, что перепад температуры между поверхностью кабеля и окружающим воздухом $\vartheta_n=25^\circ\text{C}$.

Вычислим Gr по (3-28):

$$\text{Gr} = \frac{9,81 (0,025)^3 \cdot 25}{\left(273 + 25 + \frac{25}{2}\right) (15,5 \cdot 10^{-6})^2} = 5,13 \cdot 10^4.$$

По (3-27) вычислим Nu:

$$\text{Nu} = 0,54 (0,72 \cdot 5,13 \cdot 10^4)^{1/4} = 7,47.$$

Из (3-26) находим h :

$$h = \text{Nu} \frac{\lambda}{d} = 7,47 \frac{2,7 \cdot 10^{-2}}{0,025} = 8,07 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Вычислим значение θ по (3-36):

$$\theta = \frac{(273 + 25 + 25)^4 - (273 + 25)^4}{25} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ K}^3.$$

Подставив $\varepsilon_n = 0,8$, θ и h в (3-36), найдем:

$$S_n = \frac{1}{\pi \cdot 0,025 (8,07 + 0,8 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1,2 \cdot 10^8)} = 0,94 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}.$$

При прокладке нескольких параллельных кабелей в воздухе рекомендуется укреплять их таким образом, чтобы между ними сохранялся зазор не менее диаметра

кабеля. В этом случае снижение допустимого тока нагрузки вследствие взаимного подогрева будет незначительным. Однако при прокладке группы большого количества кабелей в условиях цехов заводов такой способ прокладки неудобен и занимает много места. Поэтому в последнее время находит применение прокладка группы кабелей, расположенных вплотную. При этом допустимый ток нагрузки снижается, однако увеличение сечения жил кабелей компенсируется экономией и удобством при монтаже кабелей.

Для расчета допустимого тока нагрузки можно рекомендовать метод понижающих коэффициентов:

$$I_{\text{гр}} = kI, \quad (3-37)$$

где $I_{\text{гр}}$ — допустимый ток нагрузки для кабелей, проложенных группой;

I — допустимый ток нагрузки для одиночно проложенного кабеля;

k — коэффициент снижения нагрузки, вычисляемый по приближенному эмпирическому соотношению [Л. 21]:

$$k = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \lg \frac{n}{m}\right) (1 + 2,3 \lg m)}}, \quad (3-38)$$

где n — общее число кабелей в группе;

m — число слоев в группе.

Число слоев кабелей в группе рекомендуется выбирать не более 3. При прокладке кабелей в металлических оболочках и бронированных кабелей коэффициент k возрастает на 10—15%.

При прокладке кабеля в земле поверхность земли и кабеля можно приближенно принять за изотермы. Тогда, пользуясь методом зеркальных отображений для однородного грунта, по аналогии с электрическим полем можно получить формулу для теплового сопротивления земли (рис. 3-5):

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \left[\frac{2L}{D_n} + \sqrt{\frac{4L^2}{D_n^2} - 1} \right] \approx \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_n}, \quad (3-39)$$

где σ_3 — удельное тепловое сопротивление земли, окружающей кабель, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}/\text{Вт}$;

D_n — наружный диаметр кабеля;

L — глубина прокладки кабеля.

При постоянной температуре поверхности грунта в установившемся режиме тепло будет отводиться только к поверхности грунта. Удельное тепловое сопротивление земли сильно зависит от структуры почвы и содержания в ней влаги, как это видно из табл. 3-2. Правильный выбор значения σ_3 позволяет существенно снизить стоимость кабельной линии, поэтому лучше всего производить измерения σ_3 по всей трассе прокладки кабеля.

Удельное тепловое сопротивление $\sigma_3 = 0,90^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}$ может быть принято для песчаных, меловых и содержащих гравий грунтов. Значение $\sigma_3 = 1,50^\circ\text{C} \times \text{м/Вт}$ может быть принято при сильной загрузке кабелей в сухое время года для дренированных песчаных и меловых почв, а также для скалистых грунтов. Для всех остальных условий $\sigma_3 = 1,20^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}$.

Нагревание наружной поверхности ряда параллельно проложенных кабелей определяется суммированием тепловых полей в грунте от всех кабелей. Превышение температуры поверхности n -го кабеля ϑ_n над температурой поверхности земли может быть выражено суммой превышения температур за счет всех m кабелей:

$$\vartheta_n = P_n S_3 + \sum_1^m \Delta\vartheta_k, \quad (3-40)$$

где P_n — потери в рассматриваемом кабеле;

S_3 — тепловое сопротивление для единичного кабеля;

$\Delta\vartheta_k$ — перегрев земли на оси рассматриваемого n -го кабеля под действием потерь в k -м кабеле.

Значение $\Delta\vartheta_k$ для кабеля n может быть вычислено методом зеркальных отображений (рис. 3-5) по формуле, аналогичной (3-37):

$$\Delta\vartheta_k \approx P_k \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{r'_{kn}}{r_{kn}}, \quad (3-41)$$

где P_k — потери в кабеле k ; обозначения r'_{kn} и r_{kn} взяты по рис. 3-5 в предположении, что ось кабеля n расположена в O_n и ось кабеля k — в O_k .

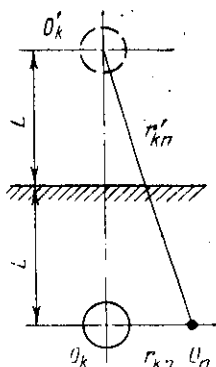


Рис. 3-5. К расчету теплового сопротивления земли.

Формула (3-41) позволяет вычислять превышение температуры поверхности кабеля над средней годовой температурой поверхности грунта в данной местности. Суточные колебания температуры грунта на глубине прокладки кабелей практически отсутствуют, однако сезонные колебания могут быть значительными и подлежат учету.

Будем считать, что колебания температуры поверхности земли носят периодический характер с периодом, равным одному году. Тогда отклонение температуры поверхности земли от среднегодовой можно записать в виде

$$\vartheta_0 = \vartheta_m \sin \omega t, \quad (3-42)$$

где ϑ_m — наибольшее отклонение температуры поверхности земли от среднегодовой температуры;

$\omega = 2\pi/T$ ($T=1$ год).

В (3-42) $t=0$ в момент когда температура поверхности земли равна среднегодовой.

Температура внутри грунта на глубине x может быть вычислена из уравнения теплопроводности (см. § 2-3):

$$\partial \vartheta / \partial t = a \partial^2 \vartheta / \partial x^2. \quad (3-43)$$

Решение этого уравнения при граничном условии (3-42) может быть записано в виде периодической функции:

$$\vartheta = \vartheta_m e^{-kx} \sin(\omega t + b), \quad (3-44)$$

где ϑ — отклонение температуры грунта от среднегодовой на глубине x ;

k и b — постоянные коэффициенты.

Подставив (3-44) в (3-43), можно найти значения k и b :

$$\vartheta = \vartheta_m e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{aT}}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - x \sqrt{\frac{\pi}{aT}}\right). \quad (3-45)$$

В среднем для грунта коэффициент температуропроводности a равен $5 \cdot 10^{-7}$ м²/с, при этом $\sqrt{\pi/(aT)} = 0,45$ 1/м. Тогда амплитуда колебаний температуры на

глубине 1 м составит 0,64 $\varnothing_m$, на глубине 2 м 0,41 $\varnothing_m$ и на глубине 3 м 0,26 $\varnothing_m$.

В качестве расчетной температуры окружающей среды для данного годового сезона может быть принята температура $T_o = T_{cp} + \varnothing$, где T_{cp} — среднегодовая температура поверхности земли, а $\varnothing$ вычисляется для глубины прокладки L по (3-45).

Расчет теплового сопротивления земли и сами расчетные формулы являются приближенными, если конкретные свойства грунта по трассе прокладки кабеля не измерены. Свойства грунта могут изменяться также в зависимости от глубины. Расчетные формулы получены лишь для однородного грунта. Кроме того, при нагревании кабеля влага мигрирует из грунта, расположенного вблизи кабеля, что увеличивает удельное тепловое сопротивление земли.

Температура грунта на уровне грунтовых вод обычно составляет около 10°C. Если грунтовые воды расположены близко к глубине прокладки кабеля, то это приводит к дополнительному отводу тепла в глубь грунта, а не только к его поверхности. Это уменьшает тепловое сопротивление земли. В связи с этим в (3-39) вводят коэффициент 2/3.

При прокладке кабеля в туннелях и незасыпанных желобах температура воздуха в туннеле поднимается за счет нагрева от всех кабелей, проложенных в туннеле. При этом температура воздуха в туннеле не должна превышать температуру наружного воздуха более чем на 10°C [Л. 22]. Это должно обеспечиваться естественной или искусственной вентиляцией. Вентиляционные устройства оборудуют заслонками для прекращения доступа воздуха в случае возникновения пожара.

Расчет теплового сопротивления воздуха в туннеле производится по (3-36), но температуру окружающей среды увеличивают на 10°C.

Кабели прокладывают также в каналах, расположенных в бетонных блоках и трубах, которые могут находиться в земле или в воздухе. В этом случае тепловое сопротивление окружающей среды состоит из суммы теплового сопротивления воздуха в канале и теплового сопротивления между стенкой канала и окружающей средой. Аналитический расчет этих тепловых сопротивлений очень сложен, поэтому в данном случае применяют приближенные эмпирические формулы:

Для расчета теплового сопротивления между поверхностью кабеля и стенкой канала применяют следующее уравнение [Л. 5]:

$$S_p = \frac{\vartheta_n - \vartheta_k}{\Sigma p} = \frac{10^{-2}}{d_n \left[a \left(\frac{\vartheta_n - \vartheta_k}{d_n} \right)^{1/4} + b + c T_{cp} \right]}, \quad (3-46)$$

где d_n — наружный диаметр кабеля, см;
 ϑ_n и ϑ_k — температура поверхности кабеля и стенки канала;

T_{cp} — средняя температура среды, заполняющей пространство канала, °C;

значения b и c выбираются по табл. 3-5;

$$a = 1,11 \cdot 10^{-3}.$$

Значение $\vartheta_n - \vartheta_k$ в среднем составляет около 20 °C.

Тепловое сопротивление трубопровода рассчитывается так же, как и тепловое сопротивление кабеля.

Тепловое сопротивление между поверхностью канала в бетоне и окружающей средой для блока, зарытого в земле, условно рассчитывается как и для кабеля с диаметром, равным диаметру канала, расположенного в земле. При этом удельное тепловое сопротивление берется для бетона ($\sigma_6 = 0,70 \div 1,0$ °C · м/Вт). Необходимо проводить расчет с учетом подогрева от соседних кабелей, расположенных в других каналах блока в соответствии с (3-40) и (3-41).

Если удельное тепловое сопротивление грунта, в котором зарыт блок, сильно отличается от удельного теплового сопротивления бетона, то необходимо ввести поправку к тепловому сопротивлению канала блока. При этом кабельные блоки принимаются за эквивалентные

Таблица 3-5

Значения коэффициентов b и c в (3-46)

Условия прокладки	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^4$
Кабель в металлической трубе	1,56	21,96
Кабель в фибровом канале в воздухе	0,465	11,62
Кабель в фибровом канале в бетоне	0,555	18,08
Кабель в асбоцементном канале в воздухе	1,111	10,33
Кабель в асбоцементном канале в бетоне	1,02	20,66

горизонтальному цилиндру с радиусом r_6 , определяемым по формуле

$$\ln r_6 = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2}, \quad (3-47)$$

где x и y соответствуют короткой и длинной сторонам блока.

К тепловому сопротивлению канала блока добавляется ΔS_6 :

$$\Delta S_6 = \frac{\sigma_3 - \sigma_6}{2\pi} \ln \left[\frac{2L}{r_6} + \sqrt{\left(\frac{2L}{r_6} \right)^2 - 1} \right], \quad (3-48)$$

где L — средняя глубина прокладки блока.

3-6. РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО ТОКА НАГРУЗКИ

Для расчета допустимого тока нагрузки в жиле необходимо построить схему замещения тепловых сопротивлений и потоков тепла для рассматриваемой конкретной конструкции кабеля и условий его прокладки.

Принцип построения таких схем ясен из рис. 3-6, где показаны примеры для одножильного кабеля в воздухе (рис. 3-6,а), трехжильного кабеля в трубе с маслом под давлением с прокладкой в земле (рис. 3-6,б) и для трехжильного кабеля с поясной изоляцией в канале блока (рис. 3-6,в).

Для одножильного кабеля в соответствии с тепловым законом Ома можно записать:

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{ж}} &= T_{\text{ж}} - T_0 = \\ &= \left(P_{\text{ж}} + \frac{P_{\text{из}}}{2} \right) S_{\text{из}} + (P_{\text{ж}} + \\ &+ P_{\text{из}} + P_{\text{об}}) (S_{\text{з.п}} + S_0). \end{aligned} \quad (3-49)$$

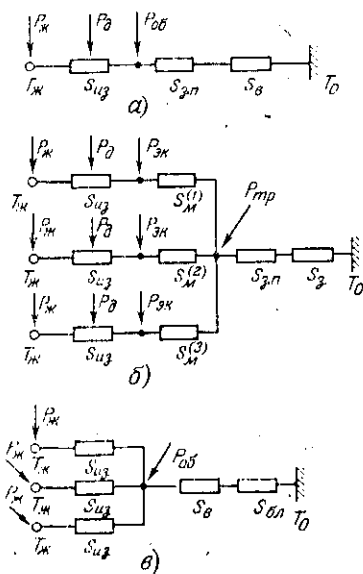


Рис. 3-6. Примеры построения схем замещения тепловых сопротивлений при расчете тока нагрузки.

Если подставим в (3-49) значения потерь по (3-3) и (3-4), то для допустимого тока нагрузки получим:

$$I = \sqrt{\frac{T_{\text{макс}} - T_0 - P_{\text{из}} \left(\frac{S_{\text{из}}}{2} + S_{\text{э.п}} + S_0 \right)}{R_{\text{ж}} [S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{об}}) (S_{\text{э.п}} + S_0)]}}, \quad (3-50)$$

где $T_{\text{макс}}$ — максимально допустимая температура жилы, выбираемая по табл. 3-1.

Для трехжильного кабеля, проложенного в блоке, справедливо уравнение

$$\vartheta_{\text{ж}} = P_{\text{ж}} S_{\text{из}} + (3P_{\text{ж}} + P_{\text{об}}) (S_{\text{н}} + S_{\text{бл}}), \quad (3-51)$$

которое с учетом (3-14), (3-4) и (3-3) можно записать в виде

$$\vartheta_{\text{ж}} = 3P_{\text{ж}} \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi\beta} G + P_{\text{ж}} (3 + y_{\text{об}}) (S_{\text{н}} + S_{\text{бл}}). \quad (3-52)$$

Тогда допустимый ток нагрузки может быть вычислен по формуле

$$I = \sqrt{\frac{T_{\text{макс}} - T_0}{R_{\text{ж}} \left[\frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi} G + (3 + y_{\text{об}}) (S_{\text{н}} + S_{\text{бл}}) \right]}}, \quad (3-53)$$

где G — геометрический коэффициент данного кабеля.

Рассмотрим также пример расчета допустимого тока нагрузки для кабеля в трубопроводе (рис. 3-6, б).

Наивысшая температура будет у жилы, удаленной от стенки трубопровода, например у жилы 2. Перепад температуры между жилой и окружающей средой складывается из перепадов температуры на изоляции кабеля, в зоне масла и между трубопроводом и поверхностью грунта:

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{ж}2} = & \left(P_{\text{ж}} + \frac{P_{\text{из}}}{2} \right) S_{\text{из}} + (P_{\text{ж}} + P_{\text{из}} + P_{\text{ок}}) S_{\text{м}} + \\ & + [P_{\text{тр}} + 3(P_{\text{ж}} + P_{\text{из}} + P_{\text{ок}})] (S_{\text{э.п}} + S_0). \end{aligned} \quad (3-54)$$

Температура жилы $T_{\text{ж}2}$, вычисляемая по формуле

$$T_{\text{ж}2} = \vartheta_{\text{ж}2} + T_0 + \sum_1^m \Delta\vartheta_{\text{к}}, \quad (3-55)$$

не должна превышать допустимой температуры $T_{\text{макс}}$.

Максимальное превышение температуры жилы $\vartheta_{\text{макс}}$ вычисляется из (3-55):

$$\vartheta_{\text{макс}} = T_{\text{макс}} - T_0 - \sum_1^m \Delta\vartheta_k, \quad (3-56)$$

где значения $\Delta\vartheta_k$ вычисляются по (3-41).

Если это значение подставить в (3-54) вместо $\vartheta_{ж2}$ и выразить потери через ток в жиле по (3-3) и (3-4), то допустимый ток в жиле может быть рассчитан по формуле

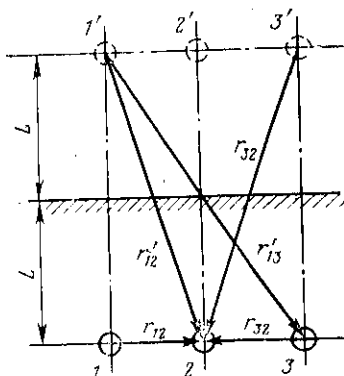


Рис. 3-7. К расчету допустимого тока нагрузки в трехфазной линии для кабелей, проложенных в земле.

1—3 — кабели; 1'—3' — симметричные обращения кабелей.

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{макс}} - P_{\text{пз}} [S_{\text{пз}}^2 + S_{\text{м}} + 3(S_{\text{з.п}} + S_{\text{з}})]}{R_{\text{ж}} \{S_{\text{пз}} + (1 + y_{\text{жк}}) S_{\text{м}} + [y_{\text{г}} + 3(1 + y_{\text{жк}})] (S_{\text{з.п}} + S_{\text{з}})\}}}. \quad (3-57)$$

Указанным методом могут быть получены формулы для расчета допустимого тока нагрузки при любых конструкциях кабеля и условиях прокладки.

Обычно параллельно прокладывается несколько кабелей. В этом случае происходит взаимный подогрев кабелей, который выражается значениями $\Delta\vartheta_k$ в (3-41) и которые в свою очередь зависят от тока нагрузки в кабелях.

Рассмотрим расчет допустимого тока нагрузки для случая прокладки трех одножильных кабелей, расположенных в земле в одной плоскости (трехфазная линия) (рис. 3-7). Превышения температур жил кабелей 1 и 2 равны:

$$\vartheta_{ж1} = (P_{ж1} + P_{из}/2) S_{из} + (P_{ж1} + P_{из} + P_{об1}) (S_{з.п} + S_{з}) + \Delta\vartheta_{21} + \Delta\vartheta_{31}; \quad (3-58)$$

$$\vartheta_{ж2} = (P_{ж2} + P_{из}/2) S_{из} + (P_{ж2} + P_{из} + P_{об2}) (S_{з.п} + S_{з}) + \Delta\vartheta_{12} + \Delta\vartheta_{32}. \quad (3-59)$$

Значения $\Delta\theta$ могут быть получены из приближенного соотношения (3-41):

$$\Delta\theta_{21} = (P_{ж2} + P_{из} + P_{об2}) S_{21}; \quad S_{21} = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{r'_{12}}{r_{12}}; \quad (3-60)$$

$$\Delta\theta_{31} = (P_{ж3} + P_{из} + P_{об3}) S_{31}; \quad S_{31} = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{r'_{31}}{r_{31}}; \quad (3-61)$$

$$\Delta\theta_{12} = (P_{ж1} + P_{из} + P_{об1}) S_{12}; \quad S_{12} = S_{21}; \quad (3-62)$$

$$\Delta\theta_{32} = (P_{ж3} + P_{из} + P_{об3}) S_{32}; \quad S_{32} = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{r'_{32}}{r_{32}}. \quad (3-63)$$

Подставив значения $\Delta\theta$ в (3-58) и (3-59), можно найти допустимые потери в жилах $P_{ж}$ и допустимый ток в жилах ($I = \sqrt{P_{ж}/R_{ж}}$).

При симметричной нагрузке потери в жилах и изоляции кабелей можно считать одинаковыми.

Если оболочки кабеля замкнуты только на одном конце или соединены по системе транспозиции, то потери в оболочках будут также одинаковыми. В этом случае, решая каждое из уравнений (3-58) и (3-59) относительно $P_{ж}$ (с учетом того, что $P_{об} = y_{об} P_{ж}$), получим формулу для вычисления тока нагрузки, совпадающую с (3-50), но в качестве теплового сопротивления окружающей среды S_0 должны быть приняты величины:

для кабеля 1: $S_0 = S_3 + S_{12} + S_{13}$;

для кабеля 2: $S_0 = S_3 + S_{12} + S_{32} = S_3 + 2S_{12}$.

Для указанного на рис. 3-7 расположения кабелей тепловые сопротивления равны:

$$S_{12} = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(2L)^2 + a^2}}{a}; \quad S_{13} = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(2L)^2 + (2a)^2}}{2a}. \quad (2-64)$$

Если оболочки замкнуты с обоих концов, то потери в оболочках значительны и существенно различны для среднего и крайних кабелей (см. пример 2-5). В этом случае (3-58) может быть записано в виде

$$\theta_{ж1} = \left(P_{ж} + \frac{P_{из}}{2} \right) S_{из} + [P_{ж}(1 + y_{об}) + P_{из}](S_{3.н} + S_3) + \\ + [P_{из} + P_{ж}(1 + y_{об2})] S_{21} + [P_{из} + P_{ж}(1 + y_{об3})] S_{31}. \quad (3-65)$$

Из (3-65) можно получить формулу, аналогичную (3-50):

$$I_1 = \sqrt{\frac{\theta_{макс} - P_{из}(S_{из}/2 + S_{3.н} + S_3 + S_{21} + S_{31})}{R_{ж}[S_{из} + (1 + y_{об1})(S_{3.н} + S_3) + (1 + y_{об2})S_{21} + (1 + y_{об3})S_{31}]}}. \quad (3-66)$$

Из (3-59) можно получить формулу для расчета допустимого тока нагрузки кабеля 2:

$$I_2 = \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{макс}} - P_{\text{из}} (S_{\text{из}}^2 + S_{3, \text{п}} + S_3 + 2S_{12})}{R_{\text{ж}} [S_{\text{из}} + (1 + y_{082}) (S_{3, \text{п}} + S_3) + (1 + y_{031}) S_{12} + (1 + y_{033}) S_{32}]}} \quad (3-67)$$

После расчета допустимого тока нагрузки в трех кабелях выбирают наименьшее из полученных значений.

В случае прокладки кабелей по вершинам равностороннего треугольника потери в оболочках каждого кабеля одинаковы; в этом случае можно использовать (3-50). При прокладке кабелей вплотную расстояние между осями кабелей примерно равно наружному диаметру кабеля и переходное сопротивление будет приближенно равно:

$$S_{12} \approx \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{2L}{D_{\text{н}}}.$$

Тогда

$$S_0 = S_3 + 2S_{12} \approx \frac{\sigma_3}{2\pi} \left[\ln \frac{4L}{D_{\text{н}}} + 2 \ln \frac{2L}{D_{\text{н}}} \right]. \quad (3-68)$$

Следует помнить, что условие (3-41) справедливо в том случае, если расчетная ось источника тепла совпадает с осью кабеля, что справедливо, если расстояние между кабелями значительно больше наружного радиуса кабеля. При плотном расположении кабелей это условие не выполняется, поэтому (3-68) является приближенной.

Пример 3-1. Определить допустимый ток нагрузки одножильных маслонаполненных кабелей 220 кВ сечением 1250 мм² при прокладке фаз в земле по вершинам треугольника вплотную один к другому.

Геометрические размеры кабеля: диаметр жилы 48 мм; диаметр по изоляции 100 мм (изоляция градирована в два слоя, $r_1 = 38$ мм); толщина свинцовой оболочки 2,5 мм; толщина защитных покровов 12,5 мм; наружный диаметр кабеля 130 мм; сопротивление жилы при 65°C равно $0,16 \cdot 10^{-4}$ Ом/м.

Потери в металлических оболочках незначительны, так как оболочки соединены и заземлены с одного конца секций.

1. Для определения диэлектрических потерь сначала рассчитаем емкость C изоляции по (2-40):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{\frac{1}{4,3} \ln \frac{38}{24} + \frac{1}{3,5} \ln \frac{50}{38}} = 0,297 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м.}$$

Диэлектрические потери рассчитываем по (3-5):

$$P_{\text{из}} = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = \left(\frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2 314 \cdot 0,297 \cdot 10^{-9} \cdot 0,004 = 6,12 \text{ Вт/м.}$$

2. Тепловое сопротивление изоляции на длине 1 м определяем по (3-6):

$$S_{из} = \frac{4,5}{2\pi} \ln \frac{50}{24} = 0,526 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}.$$

3. Тепловое сопротивление защитных покровов

$$S_{з.и} = \frac{6}{2\pi} \ln \frac{65}{52,5} = 0,202 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}.$$

4. Эффективное тепловое сопротивление земли определяем по (3-68) для заданного расположения кабелей:

$$S_0 = \frac{\sigma_z}{2\pi} \left[\ln \frac{4L}{D_n} + 2 \ln \frac{2L}{D_n} \right] = \frac{0,8}{2\pi} \left[\ln \frac{6}{0,130} + \right. \\ \left. + 2 \ln \frac{3}{0,130} \right] = 1,28 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{м}}{\text{Вт}}$$

(глубина прокладки L принята равной 1,500 м, а $\sigma_z = 0,80 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}$).

5. Допустимый ток рассчитываем по (3-50) при $T_{\text{макс}} = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $T_0 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$, $y_{об} = 0$:

$$I = \sqrt{\frac{65 - 15 - 6,12 (0,263 + 0,202 + 1,28)}{0,16 \cdot 10^{-4} (0,526 + 0,202 + 1,28)}} = 1100 \text{ А}.$$

При прокладке в земле в одной траншее нескольких кабелей разного сечения необходимо составлять и решать систему уравнений. Рассмотрим, например, случай, когда на одном уровне L на расстоянии a проложены два трехжильных кабеля разного сечения (например, один кабель ОСБ на 35 кВ, а другой на 10 кВ). Потери в изоляции таких кабелей можно пренебречь. Тогда для температуры жил первого и второго кабелей можно записать:

$$\vartheta_{ж1} = (S_{из1} + 3S_{кп}) P_{ж1} + 3P_{ж1} (1 + y_{об1}) (S_{з.и1} + S_{з1}) + \\ + 3P_{ж2} (1 + y_{об2}) S_{з1}; \quad (3-69)$$

$$\vartheta_{ж2} = 3P_{ж2} [S_{из2} + (1 + y_{об2}) (S_{з.и2} + S_{з2})] + \\ + 3P_{ж1} S_{из2} (1 + y_{об1}). \quad (3-70)$$

Решаем эту систему относительно $P_{ж1}$ и $P_{ж2}$ и, учитывая, что $I = \sqrt{P_{ж}/R_{ж}}$, находим допустимый ток нагрузки. Например, для кабеля 1 получим:

$$I_1 = \sqrt{\frac{\vartheta_{ж1, \text{макс}} [S_{из2} + (1 + y_{об2}) (S_{з.и2} + S_{з2})] - \\ - \vartheta_{ж2, \text{макс}} (1 + y_{об2}) S_{из2}}{3R_{ж1} \{ [S_{из1}/3 + S_{к.п} + (1 + y_{об1}) (S_{з.и1} + S_{з1})] [S_{из2} + \\ + (1 + y_{об2}) (S_{з.и2} + S_{з2})] - 3(1 + y_{об1})(1 + y_{об2}) S_{из2}^2 \}}}. \quad (3-71)$$

Для улучшения охлаждения кабелей, особенно высоковольтных, параллельно кабелям в грунте прокладываются трубы, в которых циркулирует охлажденная вода. При этом получается система косвенного искусственного охлаждения кабелей. При определении теплового поля для такой задачи в общем случае необходимо построить зеркальные отображения как для кабелей, так и для охлаждающих труб.

Однако температура воды в трубах в среднем мало отличается от температуры поверхности земли. При этом тепловым потоком между охлаждающей трубой и грунтом в первом приближении можно пренебречь. Тогда упрощенная схема замещения тепловых сопротивлений будет иметь вид, показанный на рис. 3-8, где P_1 и P_2 — части теплового потока, выделяемого в кабеле и отводимого соответственно в землю и охлаждающей водой, а S_3 и S_n — тепловые сопротивления земли и теплопередачи с поверхности кабеля к охлаждающей воде.

Для рассматриваемой системы можно составить следующие уравнения:

$$\vartheta_n = S_3 P_1; \quad (3-72)$$

$$\vartheta_n - \vartheta_n = S_n P_2; \quad (3-73)$$

$$P_1 + P_2 = P. \quad (3-74)$$

Кроме того, тепло, поступающее в трубопровод с водой на участке dl , приводит к повышению температуры воды при ее прохождении этого участка на $d\vartheta_n$:

$$P_2 dl = c Q d\vartheta_n, \quad (3-75)$$

где Q — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

c — теплоемкость воды, равная $4,18 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

Из (3-72) — (3-74) следует:

$$\frac{\vartheta_n}{S_3} + \frac{\vartheta_n - \vartheta_n}{S_n} = P \text{ и } P_2 = P - \vartheta_n/S_3, \quad (3-76)$$

откуда находим:

$$\vartheta_n = \frac{S_n S_3}{S_3 + S_n} \left(p + \frac{\vartheta_n}{S_n} \right) \text{ и } d\vartheta_n = \frac{S_3 + S_n}{S_3} d\vartheta_n. \quad (3-77)$$

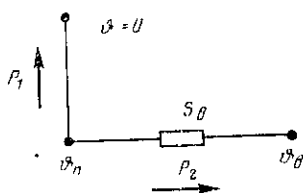


Рис. 3-8. Схема замещения к расчету косвенного искусственного охлаждения кабелей.

Подставив выражения для P_2 и $d\theta_n$ в (3-75), получим дифференциальное уравнение для θ_n :

$$(PS_3 - \theta_n)dl = Ld\theta_n, \quad (3-78)$$

где $L = cQ(S_3 + S_n)$.

В начале линии при $l=0$ температура поверхности кабеля будет $\theta_{n,0}$; ее можно найти из (3-77), подставив температуру воды в начале линии $\theta_{в,0}$, которая должна быть известна.

Решая (3-78), после алгебраических преобразований получаем:

$$\theta_n = PS_3(1 - Ke^{-l/L}) + \theta_{в,0}Ke^{-l/L}, \quad (3-79)$$

где $K = S_n / (S_3 + S_n)$.

Температуру жилы одножильных кабелей можно найти из уравнения

$$\theta_{ж} + \left(P_{ж} + \frac{P_{из}}{2} \right) S_{из} + PS_{3,п} + \theta_n, \quad (3-80)$$

где $P = P_{ж}(1 + y_{об}) + P_{из}$.

Подставив θ_n из (3-79) в (3-80), можно решить (3-80) относительно $P_{ж}$ и найти допустимый ток нагрузки:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{ж} - P_{из} \left[\frac{S_{из}}{2} + S_{3,п} + S_3(1 - Ke^{-l/L}) \right] - \theta_{в,0}Ke^{-l/L}}{R_{ж}[S_{из} + (1 + y_{об})S_{3,п} + (1 + y_{об})S_3(1 - Ke^{-l/L})]}}. \quad (3-81)$$

Расчет теплового сопротивления между кабелем и охлаждающей трубой может быть основан на определении геометрического коэффициента из формул для емкости параллельных цилиндров:

$$S_n = \frac{\sigma_n}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{h_1}{r_k} + \sqrt{\left(\frac{h_1}{r_k} \right)^2 - 1} \right) \left(\frac{h_2}{r_{тр}} + \sqrt{\left(\frac{h_2}{r_{тр}} \right)^2 - 1} \right) \right], \quad (3-82)$$

где

$$h_1 = (D^2 + r_k^2 - r_{тр}^2)/2D; \quad h_2 = (D^2 + r_{тр}^2 - r_k^2)/2D;$$

D — расстояние между осью кабеля и осью трубы;

r_k — наружный радиус кабеля;

$r_{тр}$ — радиус трубы с охлаждающей водой.

В случае близкого расположения нескольких кабелей и труб необходимо решать задачу с учетом взаимного

влияния всех кабелей и труб. Приближенные формулы для различных вариантов прокладки приведены в [Л. 16].

В формулах (3-79) и (3-81) значение l должно быть принято равным длине секции охлаждения. Чем больше эта длина, тем выше температура воды в конце секции и тем меньше допустимый ток нагрузки. Для получения определенного тока нагрузки необходимо обеспечить заданное значение отношения l/L , которое определяется отношением длины секции к расходу воды. При малом значении l/L получается наибольший ток нагрузки, который можно получить для заданного кабеля при данном способе прокладки. При большом значении l/L получается наименьший ток, соответствующий допустимому току нагрузки без искусственного охлаждения.

3-7. ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПО КАБЕЛЯМ

Наличие дешевых энергетических ресурсов в восточных районах СССР при концентрации потребителей электроэнергии в западной части страны требует передачи электроэнергии на большие расстояния.

Основным видом передачи энергии на большие расстояния являются воздушные линии электропередачи (ЛЭП). Наиболее эффективным способом увеличения передаваемой мощности является повышение напряжения ЛЭП, что приводит к созданию ЛЭП 500 кВ, рассчитанных на передачу 1—1,5 ГВт при длине до 1000 км и ЛЭП 750 кВ на 2—3 ГВт при длине до 1500 км. Создание ЛЭП на напряжение свыше 1500 кВ представляет собой трудную задачу. Для ЛЭП постоянного тока экономически обоснованной является мощность на одну цепь около 6 ГВт при напряжениях ± 750 кВ и 9—10 ГВт при 1200—1500 кВ.

Долгосрочное прогнозирование электроэнергетики показывает, что в 1980—1985 гг. потребуется передавать из восточных в центральные и западные районы страны такое количество электроэнергии, которое потребует сооружения нескольких параллельных ЛЭП сверхвысокого напряжения. В этих условиях экономически целесообразным может оказаться передача энергии по сверхпроводящему кабелю.

Весьма острыми в недалеком будущем станут также проблемы передачи огромных количеств электроэнергии и на относительно малые расстояния. Так, к 2000 г. мощ-

ность, потребляемая крупным городом, достигнет нескольких десятков гигаватт. В то же время прокладка ЛЭП потребует отчуждения значительной дорогостоящей территории в черте города. В этих условиях окажется экономически целесообразным делать глубокие кабельные вводы большой мощности на территории вблизи городов.

Некоторые технологические процессы в промышленности потребляют очень большое количество электроэнергии. Передача больших токов при относительно малых рабочих напряжениях требует также новых технических решений, при которых конструктивное выполнение кабеля должно быть достаточно компактным и могущим обеспечить низкие потери. Анализируя (3-50), видим, что с увеличением напряжения ток снижается. В самом деле, потери в изоляции в соответствии с (3-5) возрастают пропорционально квадрату напряжения. Поэтому при определенном напряжении числитель в (3-50) может вообще стать равным нулю. С увеличением напряжения передаваемая мощность сначала возрастает, затем проходит через максимум и начинает убывать. При $\operatorname{tg} \delta = 0,004$ максимум находится в области около 700 кВ. Таким образом, повышение напряжения может повысить передаваемую мощность только до определенного предела.

Увеличение сечения жилы кабеля высокого напряжения приводит к возрастанию емкости кабеля и росту потерь в изоляции. При этом тепловое сопротивление изоляции в свою очередь уменьшается, так что произведение $P_{\text{из}} S_{\text{из}}$ остается примерно постоянным. Однако тепловое сопротивление окружающей среды очень медленно уменьшается с увеличением сечения жилы кабеля. При этом допустимый ток в жиле возрастает медленнее, чем растет сечение жилы, и при сечении жил более 1200 мм² дальнейшее увеличение сечения жил оказывается малоэффективным. Наибольшая передаваемая мощность составит 0,5—1,0 ГВт.

Для дальнейшего увеличения передаваемой мощности можно использовать следующие пути:

1. *Уменьшение диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости изоляции.* Из (3-5) следует, что потери в изоляции пропорциональны произведению $\epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$. Для современных синтетических материалов это произведение значительно ниже, чем для бумаги. Однако

Таблица 3-6

Свойства композиционных материалов

Материал, объемное соотношение		Характеристика			Относительные потери, %
Полиэтилен	Бумага	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$	$\epsilon \operatorname{tg} \delta \cdot 10^3$	
0	1	3,7	0,0025	9,25	100
1	0	2,2	0,0003	0,66	7
1/3	2/3	3,2	0,0018	5,65	61
1/2	1/2	2,95	0,0014	4,13	45
2/3	1/3	2,7	0,0010	2,79	30

создание монолитной пластмассовой изоляции для кабелей сверхвысокого напряжения затруднено в связи с возможностью появления в изоляции газовых включений. Применение тонких синтетических лент вместо бумаги с последующим заполнением жидким диэлектриком под давлением позволяет получить необходимую изоляцию. Но так как жидкость между плотно лежащими лентами проникает с трудом, то можно использовать композицию с чередованием синтетических и бумажных лент. Электрическая прочность такой комбинированной изоляции несколько выше, чем у бумажной, а потери значительно меньше. В табл. 3-6 приведены характеристики композиции бумаги с полиэтиленовыми пленками.

Увеличение сечения жил и диаметра кабеля связано также с технологическими трудностями, так как для изготовления таких кабелей необходимо создание специального оборудования. При большом диаметре жил применяют токопроводы жесткой конструкции. В таких токопроводах укрепляются токоведущие жилы, помещаемые в трубе, заполненной жидким или газообразным диэлектриком под давлением. Газообразный диэлектрик имеет ничтожные потери. Для увеличения электрической прочности токопровод можно заполнять элегазом SF_6 . Такие токопроводы в значительной степени могут решить проблему передачи большой мощности.

2. *Применение искусственного охлаждения.* Разработано большое количество способов и схем искусственного охлаждения силовых кабелей, которые можно условно разделить на три группы:

Системы косвенного охлаждения, при которых трубы с проточной водой прокладываются в земле

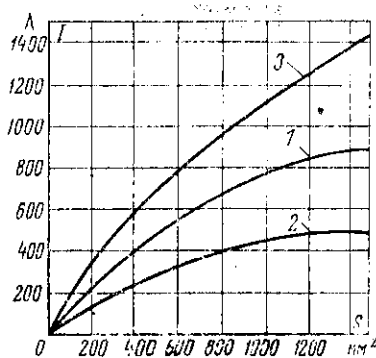


Рис. 3-9. Зависимость длительно допустимого тока нагрузки от сечения токопроводящих жил кабеля на 500 кВ в стальном трубопроводе, прокладка в воздухе при 25 °С и нагреве токопроводящих жил до 60 °С.

1 — естественное охлаждение; $\lg \delta$ изоляции равен 0,002; 2 — то же при $\lg \delta = 0,004$; 3 — искусственное охлаждение, длина линии 1 км, расход масла 2,8 дм³, температура масла, входящего в трубопровод, 20 °С, $\lg \delta = 0,004$.

вне кабеля в теплообменнике. На рис. 3-9 приведена нагрузочная характеристика такого кабеля. Наибольший эффект может быть достигнут, если кабель снаружи охлаждается потоком холодной воды. Методика расчета этих систем принципиально не отличается от расчета систем косвенного охлаждения, однако эффективность внешнего охлаждения более высокая.

В системах внутреннего охлаждения охлаждающая среда (масло, вода, сжиженный газ) находится внутри жилы кабеля. Охлаждающая среда циркулирует внутри жилы и возвращается обратно, проходя через охлаждающий теплообменник. В кабелях сверхвысокого напряжения для охлаждения применяется масло (маслонаполненный кабель). Характеристики масла могут постепенно ухудшаться и их необходимо контролировать. Вязкость масла сравнительно велика, поэтому сопротивление канала при протекании масла будет значительным, что требует создания большого перепада давления (§ 3-8).

При напряжении в несколько десятков киловольт в качестве охлаждающей жидкости используется вода

или в свободных ячейках блока около кабеля. Эти системы очень удобны и надежны в эксплуатации, однако эффективность их недостаточна. Смысл работы системы сводится к уменьшению теплового сопротивления окружающей земли. Метод расчета этой системы изложен в § 3-6.

Системы внешнего охлаждения, при которых охлаждается непосредственно поверхность кабеля маслом, водой или воздухом. В качестве примера можно привести конструкцию кабеля МВДТ на 500 кВ, у которого по трубе циркулирует масло, охлаждаемое

(с минимальным содержанием солей). Циркуляция охлаждающей жидкости по каналу в жиле является наиболее эффективным методом охлаждения, так как в этом случае тепло отводится непосредственно от самого источника тепла.

Если обозначить количество тепла, отводимого охлаждающей жидкостью на единице длины жилы, через P_1 , то на длине жилы dx температура жидкости возрастает на величину $d\theta_1$, при этом можно записать:

$$P_1 dx = cQ d\theta_1, \quad (3-83)$$

где c — теплоемкость охлаждающей жидкости, Дж/(м³ × °C);

Q — расход охлаждающей жидкости, м³/с.

Тогда через изоляцию кабеля и окружающую среду будет проходить количество тепла, равное $P_{ж} + P_{из}/2 - P_1$. В этом случае температура жилы

$$\theta_{ж} = (P_{ж} + P_{из}/2 - P_1) S_{из} + [P_{ж}(1 + y_{об}) + P_{из} - P_1] (S_{з.п} + S_0). \quad (3-84)$$

Если температуру жилы при отсутствии искусственного охлаждения обозначить θ_0 , то в соответствии с (3-49) запишем:

$$\theta_0 = (P_{ж} + P_{из}/2) S_{из} + [P_{ж}(1 + y_{об}) + P_{из}] (S_{з.п} + S_0). \quad (3-85)$$

С учетом (3-85) уравнение (3-84) приобретает вид:

$$\theta_{ж} = \theta_0 - P_1 (S_{из} + S_0 + S_{з.п}). \quad (3-86)$$

Передача тепла P_1 от жилы к охлаждающей жидкости осуществляется через тепловое сопротивление S_1 :

$$\theta_{ж} - \theta_1 = P_1 S_1, \quad (3-87)$$

где θ_1 — температура охлаждающей жидкости.

Подставив P_1 из (3-86) в (3-87), получим для температуры жилы:

$$\theta_{ж} = \frac{\theta_0 S_1 + \theta_1 (S_{из} + S_0 + S_{з.п})}{S_1 + S_{из} + S_0 + S_{з.п}}. \quad (3-88)$$

Решив совместно (3-83), (3-86) и (3-88), получим дифференциальное уравнение:

$$dx/L = d\theta_{ж} / (\theta_0 - \theta_{ж}), \quad (3-89)$$

где $L = cQ (S_1 + S_{из} + S_{з.п} + S_0)$.

Решение (3-89) имеет вид:

$$\vartheta_{ж} = \vartheta_0 - (\vartheta_0 - \vartheta_{ж.н}) e^{-x/L}, \quad (3-90)$$

где $\vartheta_{ж.н}$ — температура жилы в начале линии, вычисляемая по выражению (3-88), в которое подставляется температура охлажденной жидкости $\vartheta_{лн}$, подаваемой в кабель в начале линии ($x=0$).

Кроме того, вместо ϑ_0 должно быть подставлено выражение из (3-85). При этом, приравнивая $\vartheta_{ж}$ максимально допустимой температуре ϑ_m , можно решить (3-90) относительно $P_{ж}$ и найти допустимый ток нагрузки при длине линии $x=L$.

После алгебраических преобразований получим:

$$\vartheta_{ж} = \vartheta_0 (1 - ke^{-x/L}) + \vartheta_{лн} ke^{-x/L}, \quad (3-91)$$

а ток нагрузки

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_m - P_{из} (S_{из}/2 + S_{з.н} + S_0) (1 - ke^{-l/L}) - \vartheta_{лн} ke^{-l/L}}{R_{ж} [S_{из} + (1 + y_{ос}) (S_{з.н} + S_0)] (1 - ke^{-l/L})}}, \quad (3-92)$$

где $k = (S_{из} + S_{з.н} + S_0) / (S_1 + S_{из} + S_{з.н} + S_0)$.

Допустимый ток нагрузки, рассчитанный по (3-92), будет несколько занижен, так как при составлении дифференциального уравнения было принято, что тепловые потери в кабеле не зависят от длины и равны потерям в наиболее нагретом, дальнем конце линии, т. е. сопротивление жилы принято постоянным по длине и равным сопротивлению при максимально допустимой температуре.

Анализ (3-92) дает, что допустимый ток нагрузки определяется отношением длины линии к расходу охлаждающей жидкости и при $l/L \rightarrow \infty$ оказывается равным допустимому току нагрузки кабеля без искусственного охлаждения.

Тепловой расчет кабелей, рассмотренный ранее, позволяет определить максимально допустимый ток, который можно длительно пропускать через кабель без опасного нагрева его изоляции. Однако экономически не всегда целесообразно именно такой ток пропускать через кабель. Суммарные затраты на линию состоят из капитальных вложений на сооружение линии и эксплуатационных расходов. В свою очередь капитальные вложения складываются из стоимости материалов, стоимости изготовления кабеля и стоимости прокладки. Эксплуатаци-

онные расходы состоят главным образом из стоимости потерь электроэнергии в линии.

Экономическая эффективность передачи будет характеризоваться отношением суммарной стоимости единицы длины линии к переданному по этой линии количеству электроэнергии. При заданном передаваемом токе с возрастанием сечения жил кабеля увеличивается капитальная стоимость линии, но снижаются потери энергии в линии и уменьшаются эксплуатационные расходы. При определенном сечении жил сумма этих стоимостей имеет минимум. Для каждого кабеля имеется определенная плотность тока в жиле, при которой экономическая эффективность передачи энергии будет наибольшей.

В некоторых случаях выбор сечения протяженных линий передачи необходимо проводить в соответствии с рекомендуемой экономической плотностью тока, равной 2 А/мм^2 [Л. 22], даже если кабель по условиям нагрева способен пропустить большой ток. Кроме того, накладывается ограничение на максимальное падение напряжения в кабеле, которое должно быть не выше 5% U_n в том случае, если к нему подключены асинхронные двигатели. Указанные рекомендации относятся главным образом к кабелям низкого напряжения. Применение интенсивного искусственного охлаждения в высоковольтных линиях позволяет значительно увеличить допустимый ток нагрузки за счет того, что обеспечивается отвод увеличивающихся потерь в кабеле. Однако это приводит к увеличению эксплуатационных расходов. Передаваемая мощность растет пропорционально току, а потери — квадрату тока. Это может привести к ухудшению экономических показателей передачи. Поэтому применение искусственного охлаждения должно быть обосновано оценкой экономической целесообразности его применения.

3-8. КРИОГЕННЫЕ КАБЕЛИ

При приближении температуры к абсолютному нулю сопротивление чистых металлов стремится к некоторому остаточному значению ρ_0 , связанному с рассеянием электронов на дефектах кристаллической решетки и примесях. Характер зависимости удельного электрического сопротивления для меди и алюминия можно проследить по табл. 3-7.

Таблица 3-7

Удельное электрическое сопротивление
проводниковых материалов

Материал	Чистота, %	$\rho, 10^{-9}$ Ом·м, при температуре, К					
		295	230	150	78	20	5
Медь	99,95	17,24	10,8	7,4	2,1	0,35	0,34
Медь	99,90	17,54	11,1	7,7	2,4	0,65	0,64
Алюминий	99,999	27,61	16,41	10,61	2,11	0,04	$4 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	99,995	27,64	16,44	10,64	2,14	0,076	0,04
Алюминий	99,85	28,0	16,8	11,0	2,5	0,44	0,4
Нержавеющая сталь 304	—	1030	710	—	560	550	—

Сопротивление меди чистотой 99,999% при 20 К снижается в 770—1430 раз по сравнению с сопротивлением при 293 К. Интересны свойства бериллия, сопротивление которого при 78 К снижается до $2 \cdot 10^{-10}$ Ом·м.

При таком снижении сопротивления потери в кабеле могут быть значительно уменьшены, что приведет к возможности увеличить мощность, передаваемую по кабелю, и к повышению экономических показателей передачи энергии.

Некоторые материалы и соединения при снижении температуры переходят в состояние сверхпроводимости. Температура перехода в сверхпроводящее состояние называется критической температурой $T_{кр}$. По характеру поведения в магнитном поле различают сверхпроводники 1-го и 2-го рода. Большинство чистых элементов (свинец, олово) являются сверхпроводниками 1-го рода. Если поместить такой сверхпроводник в магнитное поле, то оно не проникает внутрь образца. Точнее, глубина проникновения поля не превышает $0,5 \cdot 10^{-7}$ м. Если повысить напряженность магнитного поля, то при некотором критическом значении $H_{кр}$ магнитное поле разрушает скачком состояние сверхпроводимости и проникает в образец. При снижении напряженности магнитного поля намагниченность образца изменяется по той же самой кривой, т. е. отсутствует явление гистерезиса.

Если по проводнику пропускать ток в отсутствие поперечного магнитного поля, то собственное поле тока на поверхности проводника может достигнуть $H_{кр}$ и разрушить состояние сверхпроводимости. При этом критический ток $I_{кр}$ может быть вычислен на основании зако-

на полного тока по формуле, которая определяет правило Силсби,

$$I_{кр} = \pi d H_{кр}, \quad (3-93)$$

где d — диаметр сверхпроводника.

Если сверхпроводник 2-го рода поместить в магнитное поле, то до некоторого значения H_2 магнитное поле не проникает в сверхпроводник. Далее при нарастании поля оно начинает проникать в сверхпроводник и напряженность поля в нем постепенно нарастает до некоторого значения H_3 , при котором полностью разрушается состояние сверхпроводимости. При уменьшении магнитного поля изменение поля внутри сверхпроводника изменяется по той же кривой, поскольку явление гистерезиса отсутствует. Такой сверхпроводник называют идеальным сверхпроводником 2-го рода. К таким сверхпроводникам можно отнести чистые ниобий и ванадий. В действительности материал содержит примеси и имеет дефекты кристаллической решетки. Это приводит к тому, что при снятии магнитного поля намагниченность образца не снижается до нуля, что приводит к появлению гистерезиса при намагничивании.

Сплавы типа Nb—Zr, Nb—Ti и некоторые интерметаллические соединения вида Nb₃Sn обладают ярко выраженными свойствами неидеальных сверхпроводников 2-го рода. Оказалось, что критическое поле, разрушающее состояние сверхпроводимости в таких материалах, значительно выше, чем в идеальных сверхпроводниках 2-го и 1-го рода. Для сравнения в табл. 3-8 приведены некоторые свойства сверхпроводниковых материалов.

Таблица 3-8

Свойства сверхпроводниковых материалов

Материал	Критическая температура, К	Критическая напряженность поля $H_{кр}$, 10^8 А/м при 0 К	Критическая плотность тока, А/мм ² , при 4 К во внешнем поперечном магнитном поле с $H_{кр}$, $4 \cdot 10^8$ А/м
Pb	7,22	0,64	—
Sn	3,72	0,246	—
Nb	9,2	1,58	—
V	5,1	1,04	—
Nb—Ti	≈10	30—115	≈500
Nb—Zr	≈10	28—100	≈500
Nb ₃ Sn	18,0	>200	>2000
V ₃ Ga	16,8	>280	—

Свойства сверхпроводников 2-го рода характеризуются зависимостью критической плотности тока $J_{кр}$ от поперечного внешнего магнитного поля. Различают три критических поля: $H_{кр1}$ — поле на поверхности проводника от протекающего тока, разрушающее сверхпроводимость при отсутствии внешнего магнитного поля; $H_{кр2}$ — внешнее поле, начинающее проникать в толщу образца (при $H > H_{кр2}$ зависимость $J_{кр} = f(H)$ становится круто падающей с увеличением H); $H_{кр3}$ — внешнее поле, разрушающее сверхпроводимость при токе в сверхпроводнике, равном нулю.

Значение $H_{кр1}$ обычно много меньше, чем $H_{кр3}$. При отсутствии внешнего магнитного поля критический ток можно вычислить по (3-93), подставляя вместо $H_{кр}$ значение $H_{кр1}$. В присутствии внешнего магнитного поля необходимы дополнительные экспериментальные исследования для конкретных случаев. В кабелях внешнее поперечное поле может быть вызвано током в рядом проложенных жилах. Современные материалы позволяют создать жилы кабелей, способные пропускать ток во много тысяч ампер.

Следует учитывать, что при приближении температуры к $T_{кр}$ значения $H_{кр}$ и $I_{кр}$ быстро убывают. Приближенно эту зависимость можно представить в виде

$$H_{кр} = H_{кр0} [1 - (T/T_{кр0})^2], \quad (3-94)$$

где $H_{кр0}$ — критическая напряженность поля при 0 К;
 $T_{кр0}$ — критическая температура при отсутствии магнитного поля.

Предполагается, что при объемном протекании тока по сверхпроводнику 2-го рода движение тока проходит по сетке тончайших сверхпроводящих нитей, пронизывающих сверхпроводник. При снятии внешнего магнитного поля внутри проводника остается захваченный магнитный поток, обусловленный замкнутыми токами в объеме сверхпроводника. Это приводит к появлению гистерезиса при намагничивании. Движение токов по нитям является неустойчивым, при этом возможно мгновенное местное выделение энергии, которое может привести к нагреванию и потере сверхпроводимости. Это приводит к явлению «деградации», т. е. к уменьшению критического тока при увеличении длины сверхпроводника. Для предотвращения этого явления необходимо применять стабилизацию. Существует несколько способов ста-

билизации сверхпроводников. В жилах кабеля целесообразно применять криостатическую стабилизацию. Сверхпроводящий материал наносят на подложку из гиперпроводника (особо чистые медь, алюминий и пр.). При местной потере сверхпроводимости ток временно шунтируется подложкой, сопротивление которой при низких температурах мало, а теплопроводность достаточно велика. При достаточно интенсивном охлаждении жидким гелием данный участок охлаждается и вновь становится сверхпроводящим.

При постоянном токе в сверхпроводящей жиле потери энергии практически отсутствуют. Однако при изменении тока нагрузки в сверхпроводниках 2-го рода появляются потери на гистерезис и вихревые токи.

При переменном токе потери на гистерезис и вихревые токи в жестких сверхпроводниках 2-го рода достаточно велики. Их эквивалентное удельное сопротивление может достигать значений порядка 10^{-12} Ом·м, что приближается к сопротивлению чистых гиперпроводников. Принципиально такие кабели будут относиться уже к криорезистивным кабелям. При переменном напряжении без потерь могут работать сверхпроводники 1-го рода или чистые сверхпроводники 2-го рода при напряженности магнитного поля меньше H_2 , при которой по сверхпроводнику протекает только поверхностный ток, при этом на металлическую подложку достаточно нанести слой сверхпроводника толщиной 10^{-7} м. Одним из перспективных материалов для этой цели является сверхчистый ниобий.

Сверхпроводящую линию передачи целесообразнее всего выполнять в виде коаксиального кабеля, так как в такой конструкции отсутствует внешнее магнитное поле кабеля, на проводники не действует поперечное магнитное поле, а индуктивность такого кабеля наименьшая.

При конструировании трехфазной линии целесообразнее окружать теплоизоляцией одновременно все жилы. Для примера на рис. 3-10 приведена одна из возможных конструкций криорезистивного кабе-

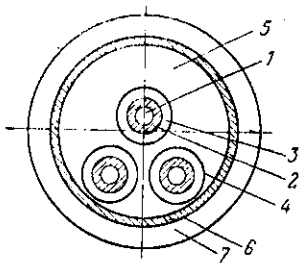


Рис. 3-10. Примерная конструкция кабеля, охлаждаемого жидким азотом.

ля, схожая с кабелем МВДТ. В каналах 1 трех жил 2, изготовленных из гиперпроводника, пропускается охлаждающий сжиженный газ (азот). Поверх жил расположена высоковольтная изоляция 3, далее экраны из фольги 4. Пространство в трубе заполнено пропитывающей жидкостью 5 под давлением. Поверх трубы 6 располагается теплоизоляция 7.

В качестве электрической изоляции при низких температурах может быть применен вакуум, жидкие газы и твердые диэлектрики.

Диэлектрические потери в вакууме малы, что очень важно для сверхпроводящего кабеля. Давление вакуумного электроизоляционного слоя должно составлять примерно 10^{-4} Па. Электрическая прочность вакуумного слоя зависит от материала электродов и степени чистоты их обработки. Вполне возможно получить электрическую прочность 10 МВ/м при толщине промежутка до нескольких сантиметров. Для поддержания вакуума вокруг жилы необходимо применять распорки из твердого диэлектрика. Наиболее слабым местом вакуумной изоляции являются распорки, по поверхности которых могут происходить разряды. Так, по [Л. 23] стержень длиной 2,2 см в вакууме перекрывается при 170 кВ (фарфор) и при 50 кВ (фторопласт-4). Подробно свойства вакуума как электрической изоляции описаны в [Л. 23].

Электрическая прочность сжиженных газов зависит от формы электродов, толщины зазора, давления, чистоты жидкости и других факторов. Для примера в табл. 3-9 приведены значения электрической прочности, полученные при атмосферном давлении, частоте 60 Гц, сфериче-

Таблица 3-9

Свойства сжиженных газов

Диэлектрик	Температура, К	Диэлектрическая проницаемость	Электрическая прочность, МВ/м
Гелий жидкий	4,2	1,048	16—25
Водород жидкий	14,0	1,253	70—140
Водород жидкий	20,4	1,227	85—133
Водород газообразный	20,4	1,0	20—40
Азот жидкий	77,4	1,433	40—133
Масло трансформаторное	293	2,1—2,4	15—20
Воздух газообразный	296	1,0	2,8—6,7

ских стальных электродах и зазоре 0,3 мм. Электрическая прочность заметно снижается при увеличении толщины зазора и возрастает с повышением давления. Значение $\text{tg } \delta$ сжиженных газов весьма мало и находится в пределах 10^{-6} — 10^{-7} .

Электрические свойства жидких газов (азот и водород) заметно выше, чем у трансформаторного масла.

Электрические свойства твердых диэлектриков при низких температурах, как правило, улучшаются. Так, в связи с уменьшением подвижности полярных групп $\text{tg } \delta$ обычно снижается до значений 10^{-4} — 10^{-5} и менее. При температурах жидкого гелия электрическая прочность твердых диэлектриков соизмерима с прочностью при обычных температурах, а в зоне температур жидкого азота она максимальна.

Электрическая прочность твердых диэлектриков при криогенных температурах изучена в основном для слоев малой толщины (0,1 мм), для которых она составляет 100—150 МВ/м. По предварительным данным при толщине слоя около 10 мм она снижается в 3—4 раза и составляет 25—50 МВ/м.

Эластичность большинства диэлектриков при криогенных температурах резко снижается, и они становятся хрупкими. Наивысшей эластичностью при низких температурах обладает фторопласт-4. Достаточной гибкостью обладают пленочные материалы. В этой связи целесообразно применять композиционную изоляцию, полученную повивом пленок или бумаг, пропитанных сжиженным газом под давлением. В частности, обычная бумага, пропитанная жидким азотом при атмосферном давлении, при толщине слоя до 1 мм обладает электрической прочностью 30—40 МВ/м.

Для повышения электрической прочности такой композиционной изоляции необходимо применять повышенное давление аналогично тому, как это делается в маслонаполненных кабелях. При температуре кипения жидкости в ее объеме легко образуются газовые включения, которые приводят к ионизации и пробое. Таким образом, переохлажденная жидкость должна иметь и более высокую электрическую прочность. В конструкции, приведенной на рис. 3-10, по герметичным жилам для охлаждения можно пропускать азот при 77,4 К, а в трубе поддерживать избыточное давление чистого жидкого азота.

В целом можно предполагать, что толщина изоляции криогенных кабелей будет приближаться к толщине изоляции маслонаполненных кабелей.

Экономичность передачи электроэнергии по криогенным кабелям во многом определяется созданием мощных и достаточно эффективных рефрижераторов. Так, например, по предварительным оценкам стоимость жидкоазотного криореистивного кабеля (ЖАК) на 70—80% будет определяться стоимостью рефрижератора. Мощность рефрижератора оценивается по количеству сжиженного газа, которое он может производить в единицу времени. Это равноценно тому, какую тепловую мощность рефрижератор может отбирать из зоны низкой температуры. Для криогенных кабелей потребуются рефрижераторы мощностью порядка 10^5 — 10^6 Вт, при этом с увеличением мощности капитальные затраты на единицу мощности снижаются. Удельные капитальные затраты оцениваются в рублях на единицу холодопроизводительности a_p , руб./Вт.

Если в кабеле имеется некоторый теплоприток P , который складывается из теплопритока через теплоизоляцию и потерь в кабеле, то холодопроизводительная мощность рефрижератора должна быть достаточна для вывода этой энергии из охлажденной зоны. При этом для работы рефрижератора необходимо затратить мощность P_p значительно большую, чем P . Отношение $P/P_p = \eta$ можно назвать к. п. д. рефрижератора. Идеальный к. п. д. η_i можно определить из термодинамического соотношения:

$$\eta_i = T_x / (T_0 - T_x),$$

где T_x — температура холодной зоны;

T_0 — температура окружающей среды.

Значение T_0 составляет около 300 К. Тогда для жидкого азота $\eta_i = 0,346$, а для гелия 0,0142. В действительности работа механизмов несовершенна и реальный к. п. д. составляет для жидкого азота примерно 0,1—0,12, водорода 0,01—0,025 и гелия $(1-2) \cdot 10^{-3}$. Таким образом, если даже теплоприток в кабель P будет мал, то расход энергии для работы рефрижератора может оказаться значительным и эксплуатационные расходы будут велики.

Для сверхпроводящих кабелей при температурах жидкого гелия необходим весьма малый теплоприток через теплоизоляцию, конструкция которой должна быть ва-

куумной для исключения теплопередачи конвекцией и теплопроводностью. Для существенного ослабления теплопередачи излучением в вакуумном пространстве должен быть установлен ряд отражающих экранов, например из алюминиевой фольги.

Для криорезистивных кабелей с применением жидкого азота оптимальный теплоприток значительно выше и применение вакуумной изоляции не обязательно. Целесообразно применять такой материал, как аэрогель, теплопроводность которого $\lambda = 1,6 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·°С), а плотность 100 кг/м³.

Криогенный кабель является линией с внутренним искусственным охлаждением, и для его расчета могут быть использованы формулы (3-91) и (3-92). При этом параметр S_0 будет представлять собой тепловое сопротивление теплоизоляции, во много раз превышающее все другие сопротивления, откуда следует, что $k \approx 1$. Максимально допустимая температура жилы $T_{ж.макс}$ должна быть ограничена температурой кипения жидкости при используемом давлении и возрастанием потерь в жиле при росте температуры. При этом изменение температуры вдоль линии должно быть значительно меньше, чем перепад температуры между окружающей средой и жилой, а для этого необходимо, чтобы отношение l/L было мало. В этом случае выражение $e^{-l/L}$ приближенно можно заменить выражением $1 - l/L$. При учете всех упрощений (3-92) примет вид:

$$I = \sqrt{\frac{T_{ж.макс} - T_{н1} - \frac{l}{cQ} \left(P_{нз} + \frac{T_0 - T_{н1}}{S_0} \right)}{R_{ж} (1 + y_{ос}) \frac{l}{cQ}}}, \quad (3-95)$$

где $T_{ж.макс}$ — максимальная температура жилы в конце линии, К;

$T_{н1}$ — температура охлаждающей жидкости, поступающей в кабель в начале линии, К;

T_0 — температура окружающей среды, К (примерно 300 К);

Q — расход охлаждающей жидкости, м³/с;

c — удельная объемная теплоемкость жидкости, Дж/(м³·°С);

l — длина линии, м.

Под коэффициентом $y_{об}$ здесь следует понимать отношение суммарных потерь во всех металлических элементах конструкции кабеля (кроме жил) к потерям в жиле.

Параметр $P_{из}$ отражает суммарные потери в охлаждаемой зоне кабеля, независимые от тока в жилах.

Приближенный расчет трехжильной конструкции можно произвести следующим упрощенным способом. Если суммарные потери в кабеле на единице длины умножить на длину линии, то это значение следует приравнять увеличению теплосодержания охлаждающей жидкости при ее протекании по всей длине линии:

$$\left[3I^2 R_{ж} (1 + y_{об}) + 3P_{из} + \frac{T_0 - T_{н1}}{S_0} \right] l = cQ [T_{ж. макс} - T_{н1}]. \quad (3-96)$$

Приближенно принимаем, что температура жилы мало отличается от температуры охлаждающей жидкости и потери, выделяемые в кабеле, одинаковы по его длине, а теплоемкость жидкости постоянна. Кроме того, мы условились, что теплоприток через теплоизоляцию $P_{и}$ постоянен и равен наибольшему значению для начала линии $(T_0 - T_{н1})/S_0$. Решив это уравнение относительно тока I , получим:

$$I = \sqrt{\frac{T_{ж. макс} - T_{н1} - \left(3P_{из} + \frac{T_{ж. макс} - T_{н1}}{S_{и}} \right) \frac{l}{cQ}}{3R_{ж} (1 + y_{об}) \frac{l}{cQ}}}, \quad (3-97)$$

где Q — расход жидкости через три жилы;

$y_{об}$ — отношение потерь в металлических элементах конструкции к потерям в трех жилах кабеля.

Пользуясь (3-97) и (3-95), при заданном токе нагрузки и расходе Q можно определить предельную длину секции охлаждения l или, если задана l , найти Q .

Если жила кабеля герметична, то охлаждение можно производить также за счет испарения жидкости, используя ее скрытую теплоту испарения. В этом случае длину секции охлаждения можно увеличить. При этом температура по длине кабеля будет постоянной. Однако движение смеси жидкости и газа по трубе значительно увеличивает перепад давления, необходимый для прокачки смеси [Л. 24].

Перепад давления при прокачке жидкости зависит от различных факторов и может быть определен по приближенным формулам. Ниже приведен метод расчета согласно [Л. 25].

При ламинарном движении в круглой трубе перепад давления (Па) на единице длины будет равен:

$$dP/dx = 128\mu Q / (\pi D^4), \quad (3-98)$$

где μ — динамический коэффициент вязкости, кг/(м·с);

D — внутренний диаметр трубы, м;

Q — расход жидкости, м³/с.

При турбулентном движении перепад давления может быть рассчитан по уравнению

$$dP/dx = f 8\rho Q^2 / (\pi^2 D^5), \quad (3-99)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³;

f — коэффициент трения.

Для гладких труб коэффициент трения примерно равен:

$$\left. \begin{aligned} f &= 0,046 Re^{-0,2} \quad (\text{при } Re > 3 \cdot 10^4); \\ f &= 0,079 Re^{-0,25} \quad (\text{при } 5 \cdot 10^3 < Re < 10^4) \end{aligned} \right\}, \quad (3-100)$$

где Re — критерий Рейнольдса, который для круглой трубы равен $4\rho Q / (\pi\mu D)$.

Для шероховатой стенки трубы могут быть использованы графики, приведенные на рис. 3-11.

Соотношение l/Q должно быть выбрано так, чтобы конструкция кабеля могла выдержать получаемый перепад давления на длине l .

Наличие перепада давления вдоль линии приводит к появлению потерь на трение жидкости в трубе. Выделение тепла на единице длины жилы (Вт/м) составит:

$$P_x = Q dP/dx. \quad (3-101)$$

В табл. 3-10 приведены теплофизические свойства сжиженных газов.

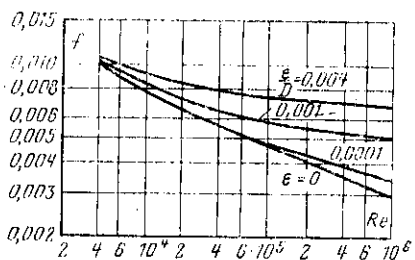


Рис. 3-11. Коэффициенты трения при полностью развитом турбулентном течении в гладких и шероховатых круглых трубах.

ε — шероховатость стенки трубы, мкм;
 D — диаметр трубы, мкм.

Таблица 3-10

Теплофизические свойства сжиженных газов
при атмосферном давлении

Характеристика	Газ					
	Метан	Аргон	Азот	Неон	Водород	Гелий
Температура кипения, К	111,7	87,3	77,4	27,1	20,4	4,2
Температура тройной точки, К	90,7	83,8	63,2	24,6	14,0	—
Плотность жидкости, кг/м ³	424	1392	804	1204	71	125
Плотность при температуре кипения газа, кг/м ³	1,8	5,7	5,0	12,0	1,2	15,5
Теплота испарения, Дж/г	510	162	197	88	458	21
Теплоемкость, Дж/(г·°С)	3,8	1,08	2	1,66	9,7	2,3
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,128	—	0,093	—	0,118	—
Вязкость, $\mu \cdot 10^6$ кг/(м·с)	7	24,8	17,2	—	1,3	0,3
Точка кипения при давлении $2 \cdot 10^5$ Па	121	—	84	29,5	23	—
Точка кипения при давлении $5 \cdot 10^5$ Па	135	—	95	34	27,3	2

Приведенные уравнения могут быть использованы также для расчета перепада давления при охлаждении кабеля маслом и водой. Коэффициент теплопередачи от жидкости к трубе может быть рассчитан по следующим уравнениям.

При турбулентном движении ($Re > 10^4$):

газы ($0,5 < Pr < 1,0$):

$$Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,6}; \quad (3-102)$$

вода и легкие жидкости ($1,0 < Pr < 20$)

$$Nu = 0,0155 Re^{0,83} Pr^{0,5}; \quad (3-103)$$

масла и другие вязкие жидкости ($Pr > 20$)

$$Nu = 0,0118 Re^{0,9} Pr^{0,3}, \quad (3-104)$$

где $Pr = \mu c / \lambda$ — критерий Прандтля.

При ламинарном движении $Nu = 4,364$. Коэффициент теплопередачи h можно вычислить из соотношения

$$h = Nu \lambda / D. \quad (3-105)$$

Расчет криогенных кабелей должен проводиться с учетом всех источников тепла в кабеле, которые подразделяются на две группы: а) источники, независимые от тока в кабеле, к которым относятся потери в электрической изоляции, потери от трения охлаждающей жидкости и теплоприток через теплоизоляцию; б) потери, пропорциональные току в жилах, которые учитываются как отношение суммы потерь во всех металлических элементах конструкции кабеля к потерям в жилах.

В сверхпроводящих кабелях заметные потери могут иметь вводы, поэтому такие кабели целесообразнее применять при передаче энергии на большое расстояние. При криогенных температурах глубина проникновения тока в гиперпроводниках невелика. Так, при 77 К глубина проникновения тока в медь и алюминий составляет около 3 мм, а при 20 К и ниже она становится меньше 1 мм. При этом жила должна быть выполнена в виде тонкостенной трубы или скручена из изолированных проволок с применением их транспонирования. При низком сопротивлении металлов резко возрастают потери в металлических экранах и оболочках. Конструкция кабеля должна быть рассчитана так, чтобы максимально снизить эти потери при переменном токе.

В криогенных кабелях токи очень велики, особенно при коротком замыкании, когда они достигают значений порядка 10^5 А. При этом электродинамические усилия могут быть очень велики и достигать 10^4 Н/м. При переменном напряжении элементы конструкций кабелей испытывают вибрацию. В связи с этим конструкция кабеля должна быть рассчитана на механическую прочность.

При охлаждении кабеля все элементы его конструкции заметно уменьшают свои размеры. Это создает дополнительные трудности при разработке кабелей, особенно это касается высоковольтных вводов.

При оценке экономической эффективности криогенных кабелей следует учитывать не только высокую стоимость рефрижераторов, но и их невысокий к. п. д., что приводит к повышенным эксплуатационным расходам. С увеличением сечения жил затраты растут медленнее, чем передаваемая мощность, и поэтому эффективность передачи по криогенным кабелям растет с увеличением мощности передачи. По предварительным оценкам при передаваемой мощности в несколько гигаватт и более криорезистивные и сверхпроводящие кабели могут ока-

заться экономичнее обычных кабелей. Однако при передаче энергии по сверхпроводящим кабелям необходимо разработать меры по обеспечению их высокой надежности. В целом проектирование линий передачи по криогенным кабелям представляет собой комплексную оптимизационную многовариантную задачу, решение которой позволит определить место данного вида электропередачи среди перспективных способов передачи больших количеств энергии.

3.9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КАБЕЛЯ

С увеличением температуры диэлектрические потери в изоляции возрастают примерно по экспоненциальной зависимости. Поэтому в кабелях на 110 кВ и выше диэлектрические потери не только ограничивают допустимый ток нагрузки, но могут привести к тепловому пробою. Тепловую устойчивость одножильного кабеля обычно определяют посредством диаграммы, представленной на рис. 3-12.

По оси абсцисс откладывается температура оболочки кабеля $T_{об}$, а по оси ординат — суммарные потери в жиле, изоляции и оболочках (кривая 1) и потери, отводимые от оболочки в окружающую среду с температурой T_0 (прямая 2). Последние выражаются формулой $P = (T_{об} - T_0)/S_0$, из которых следует, что $\operatorname{tg} \alpha = S_0$.

Точка a соответствует устойчивому тепловому режиму с нагреванием оболочки до температуры T_1 . Как видно из рис. 3-12, при случайном увеличении температуры оболочки-кабеля теплоотдача возрастает сильнее тепло-

выделения и температура оболочки возвращается в исходное состояние, а при случайном уменьшении температуры оболочки тепловыделение возрастает сильнее теплоотдачи и температура оболочки также возвращается в исходное состояние.

Точка b с нагреванием оболочки до температуры T_2 соответствует неустойчивому тепловому режиму.

Если прямая 2 касается кривой 1, то точка $в$ является

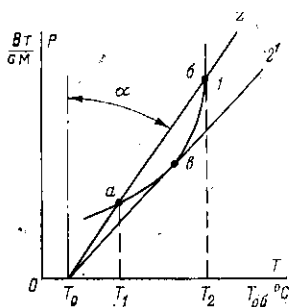


Рис. 3-12. Диаграмма тепловой неустойчивости кабеля.

точкой неустойчивого равновесия и такое расположение кривых будет критерием возможного перехода кабеля к тепловому пробую, который может наступить вследствие: 1) увеличения внешнего теплового сопротивления по сравнению с расчетным до величины, соответствующей тепловому пробую (увеличивается $\operatorname{tg} \alpha$); 2) увеличения температуры окружающей среды T_0 сравнительно с расчетной (прямая 2 смещается вправо); 3) увеличения тока нагрузки сравнительно с нормальным (кривая 1 смещается вверх).

Надежность кабеля в отношении теплового пробоя можно оценить, определяя предельные изменения перечисленных факторов.

При построении кривой тепловыделения должно быть учтено, что $\operatorname{tg} \delta$ изменяется при градировании и зависит от температуры и напряженности электрического поля.

Для проведения приближенного расчета изоляциис разделяют на достаточно тонкие слои, в пределах которых предполагают $\operatorname{tg} \delta$ постоянным и учитывают изменение его только при переходе от слоя к слою (для удобства расчета целесообразно выбирать радиусы слоев таким образом, чтобы емкости и тепловые сопротивления слоев были одинаковыми). Расчет ведут в следующем порядке.

Задаваясь температурой жилы и приложенным напряжением, находят выделяющееся тепло в первом слое, предполагая, что $\operatorname{tg} \delta$ определяется при температуре и напряженности поля на поверхности жилы. Диэлектрические потери ΔP_1 в первом слое вычисляются по формуле

$$\Delta P_1 = U_1^2 \omega C_1 \operatorname{tg} \delta_1, \quad (3-106)$$

где C_1 — емкость первого слоя;

U_1 — напряжение, приложенное к слою.

Перепад температуры ΔT_1 в первом слое с тепловым сопротивлением S_1 под влиянием потерь в жиле $P_{ж}$ и в диэлектрике ΔP_1 может быть вычислен по формуле

$$\Delta T_1 = P_{ж} S_1 + \frac{1}{2} \Delta P_1 S_1. \quad (3-107)$$

Температура на поверхности второго слоя

$$T_2 = T_{ж} - \Delta T_1.$$

Перепад температуры во втором слое

$$\Delta T_2 = (P_{\text{ж}} + \Delta P_1) S_2 + \frac{1}{2} \Delta P_2 S_2, \quad (3-108)$$

где ΔP_2 — тепловыделение во втором слое, равное $U_2^2 \omega C_2 \operatorname{tg} \delta_2$.

Значение $\operatorname{tg} \delta_2$ берут соответственно температуре и напряженности поля в начале второго слоя. Аналогично определяют и перепады температуры во всех слоях. Температура металлической оболочки $T_{\text{об}}$ определяется как разность температуры жилы и перепада температуры во всех слоях.

Задаваясь несколькими значениями температуры жилы (от номинальной и выше) при установленной нагрузке кабеля, вычисляют вышеуказанным способом соответствующие температуры оболочки и строят кривую тепловыделения в изоляции и в токопроводящей жиле в зависимости от температуры оболочки.

Температура окружающей среды должна быть рассчитана с учетом параллельно проложенных кабелей и других источников тепла, как это показано в § 3-5.

При прокладке кабелей, принадлежащих к одной линии, значение S_0 следует брать с учетом соседних кабелей. В случае кабеля МВДТ вместо температуры оболочки следует брать температуру экрана из медных лент, наложенных на изоляцию жилы, а вместо теплового сопротивления окружающей среды — сумму тепловых сопротивлений масла в трубопроводе, защитных покровов и окружающей среды, отнесенных к одной жиле.

3-10. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ КАБЕЛЯ

При изменении тока нагрузки или условий охлаждения кабеля его температура будет также изменяться во времени. Зависимость температуры жилы от времени будет состоять из суммы экспоненциальных членов, получаемых при решении уравнения (2-3). Весь процесс нагревания можно разделить на три стадии.

Первая стадия — переходный режим, при котором зависимость температуры от времени выражается суммой экспоненциальных функций.

Вторая стадия — регулярный режим. Эта стадия нагрева или охлаждения кабеля получается обычно через несколько минут после начала процесса. При этом экспоненты высших порядков становятся весьма малыми и

уравнение нагрева выражается простой экспоненциальной функцией

$$\vartheta = \vartheta_m (1 - e^{-\mu t}). \quad (3-109)$$

Третья стадия — стационарное состояние (установившийся режим), при котором температура во всех точках кабеля со временем не изменяется.

Переходный режим длится, как правило, всего несколько десятков секунд. Необходимость расчета этого режима может возникнуть при коротких замыканиях в линиях. Однако короткие замыкания весьма кратковременны и в большинстве случаев достаточно считать, что все выделяющееся тепло затрачивается на нагрев жилы, которая не охлаждается. В этом случае температура жилы вычисляется по приближенной формуле

$$\vartheta_{ж} \approx \frac{P_{ж}}{c_{ж} Q_{ж}} t, \quad (3-110)$$

где $c_{ж}$ — удельная объемная теплоемкость жилы;

$Q_{ж}$ — сечение жилы.

Во время работы линии нагрузка может периодически изменяться или могут иметь место кратковременные перегрузки. При этом необходимо знать закономерность нагрева и охлаждения в регулярном режиме.

3-11. НАГРЕВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ПРОВОДА, ПРОЛОЖЕННОГО В ВОЗДУХЕ

Если считать, что температура ϑ в процессе нагрева или охлаждения во всех точках провода или кабеля с тонким слоем изоляции на жиле одинакова, то эта температура вычисляется следующим образом.

Запишем уравнение теплового баланса для однородного провода или кабеля:

$$(1 + \alpha \vartheta) P_0 = c Q d\vartheta/dt + \vartheta/S_b, \quad (3-111)$$

где P_0 — потери в кабеле на единицу длины при температуре окружающей среды;

α — температурный коэффициент сопротивления при температуре окружающей среды;

c — объемная теплоемкость материала кабеля;

Q — сечение жилы кабеля.

Это значит, что часть тепла, выделяющегося в единицу времени, затрачивается на нагрев кабеля, а другая часть отводится в окружающую среду.

Разделение переменных приводит к уравнению

$$d\vartheta / \left(\vartheta - \frac{P_0 S_{\text{в}}}{1 - P_0 S_{\text{в}} \alpha} \right) = - \frac{1 - P_0 S_{\text{в}} \alpha}{cG} dt. \quad (3-112)$$

Интегрируя это уравнение и учитывая, что при $t=0$ $\vartheta=0$, получаем:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{макс}} (1 - e^{-t/\Theta_0}), \quad (3-113)$$

где $\vartheta_{\text{макс}} = P_0 S_{\text{в}} / (1 - P_0 S_{\text{в}} \alpha)$; $\Theta_0 = cQ S_{\text{в}} / (1 - P_0 S_{\text{в}} \alpha)$.

Температура $\vartheta_{\text{макс}}$ соответствует установившемуся режиму. В самом деле, в установившемся режиме справедливо соотношение

$$P_0 (1 + \vartheta_{\text{макс}} \alpha) S_{\text{в}} = \vartheta_{\text{макс}}.$$

Из этого следует соотношение для $\vartheta_{\text{макс}}$ [см. (3-113)].

Полученные соотношения могут быть применены к нагреву кабеля с жилой большого сечения и тонким слоем изоляции, так как в этом случае количество тепла, содержащееся в изолирующем слое, будет незначительно по сравнению с теплом, затраченным на нагревание жилы. Кроме того, тепловое сопротивление тонкого слоя изоляции мало по сравнению с тепловым сопротивлением окружающей среды, следовательно, падение температуры на нем будет невелико.

При выключении нагрузки потери в кабеле становятся равными нулю, при этом левая часть (3-111) также равна нулю. Решение этого уравнения примет вид:

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-t/\Theta_0},$$

где ϑ_0 — температура жилы перед отключением кабеля;
 $\Theta_0 = cQ S_{\text{в}}.$

Постоянная времени Θ_0 в этом случае будет меньше, чем при включении кабеля с пропусканием неизменного тока нагрузки.

Для приближенных расчетов при изменении температуры кабеля в небольших пределах потери в кабеле можно принять постоянными и равными потерям при средней температуре жилы. В этом случае в левой части (3-111) $\vartheta = \text{const} = \vartheta_{\text{ср}}$. При решении получим уравнение вида (3-113), в котором $\vartheta_{\text{макс}} \approx P_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{ср}}) S_{\text{в}}$ и $\Theta_0 = cQ S_{\text{в}}.$

3-12. НАГРЕВАНИЕ КАБЕЛЯ С ИЗОЛЯЦИОННЫМ СЛОЕМ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

В кабелях с изоляцией большой толщины скорость нагрева различных мест кабеля будет неодинаковой. В регулярном режиме температура в кабеле может быть выражена уравнением

$$\vartheta = \vartheta_{\text{макс}}(1 - e^{-\mu t}), \quad (3-114)$$

где $\vartheta_{\text{макс}}$ — максимальная температура в какой-либо точке кабеля,

$$\vartheta_{\text{макс}} = P_{\text{ж}} \left(S_{\text{в}} + \frac{c_{\text{из}}}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \right), \quad (3-115)$$

здесь $P_{\text{ж}}$ — потери в жиле в установившемся режиме.

Уравнение теплового баланса для кабеля, проложенного в воздухе, может быть представлено в следующем виде:

$$P_0(1 + \alpha \vartheta_{\text{ж}}) = C_{\text{ж}} \frac{d\vartheta_{\text{ж}}}{dt} + \int_{r_0}^R 2\pi r c_{\text{из}} \frac{d\vartheta}{dt} dr + C_{\text{об}} \frac{d\vartheta_{\text{об}}}{dt} + \frac{\vartheta_{\text{об}}}{S_{\text{в}}}, \quad (3-116)$$

где $C_{\text{ж}} = c_{\text{ж}} Q_{\text{ж}}$, $C_{\text{из}} = c_{\text{из}} Q_{\text{из}}$ и $C_{\text{об}} = c_{\text{об}} Q_{\text{об}}$ — теплоемкости жилы и оболочки;

$c_{\text{ж}}$, $c_{\text{из}}$, $c_{\text{об}}$, $Q_{\text{ж}}$, $Q_{\text{из}}$, $Q_{\text{об}}$ — соответственно удельные объемные теплоемкости и сечения жилы, изоляции и оболочки.

Подставив соотношения, которые следуют из (3-114) и (3-115),

$$\frac{\vartheta_{\text{макс}}}{\vartheta_{\text{ж.макс}}} = \left(S_0 + \frac{c_{\text{из}}}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \right) / (S_{\text{в}} + S_{\text{из}}); \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\vartheta_{\text{макс}}}{\vartheta_{\text{ж.макс}}} \frac{\partial \vartheta_{\text{ж}}}{\partial t}, \quad (3-117)$$

где $\vartheta_{\text{ж.макс}}$ — температура жилы в установившемся режиме;

$\vartheta_{\text{ж}}$ — температура жилы,

в уравнение теплового баланса (3-111) и произведя интегрирование, получим дифференциальное уравнение:

$$P_0(1 + \alpha \vartheta_{\text{ж}}) = C d\vartheta_{\text{ж}}/dt + \vartheta_{\text{ж}}/(S_{\text{в}} + S_{\text{из}}), \quad (3-118)$$

где

$$C = C_{\text{ж}} + C_{\text{из}} k_{\text{из}} + C_{\text{об}} k_{\text{об}}; \quad C_{\text{из}} = c_{\text{из}} Q_{\text{из}};$$

$$k_{\text{из}} = \frac{S_{\text{в}} + c_{\text{из}}/(4\pi)}{S_{\text{в}} + S_{\text{из}}} - \frac{S_{\text{из}}}{S_{\text{из}} + S_{\text{в}}} \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2};$$

$$k_{\text{об}} = S_{\text{в}}/(S_{\text{в}} + S_{\text{из}}).$$

Решение (3-118) принципиально не отличается от решения (3-112), т. е.

$$\vartheta_{\text{ж}} = \vartheta_{\text{ж.макс}} (1 - e^{-\mu t}), \quad (3-119)$$

где

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{ж.макс}} &= P_0 (S_{\text{в}} + S_{\text{из}}) / [1 - P_0 \alpha (S_{\text{в}} + S_{\text{из}})]; \\ \mu &= [1 - P_0 \alpha (S_{\text{в}} + S_{\text{из}})] / [C (S_{\text{в}} + S_{\text{из}})]. \end{aligned}$$

Это решение является приближенным, так как здесь не учитываются влияния переходного режима, зависимость $S_{\text{в}}$ от температуры оболочки и выделение тепла в диэлектрике. Однако оно пригодно для практических расчетов кабелей напряжением до 35 кВ включительно.

Пример 3-2. Определить постоянную времени нагрева для кабеля, проложенного в воздухе, размеры которого приведены в примере 3-1 (без защитных покровов).

Значение $\Theta_0 = 1/\mu$, а μ вычисляется по (3-119). Для решения примера предварительно необходимо определить эффективную теплоемкость кабеля C .

Значение $S_{\text{из}} = 0,526^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}$ уже было вычислено в примере 3-1. При прокладке в воздухе тепловое сопротивление $S_{\text{в}}$ вычисляем по (3-66). Значение $S_{\text{в}}$ мало зависит от перепада температур $\vartheta_{\text{п}}$, поэтому для расчета примем средний перепад $\vartheta_{\text{п}} = 25^\circ\text{C}$. При этом можно использовать (3-53):

$$h = 4,5 \sqrt{\vartheta_{\text{п}}/d} = 4,5 \sqrt{25/10,5} = 5,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Коэффициент черноты поверхности $\epsilon_{\text{п}}$ окисленного свинца примем равным 0,5. Температура окружающей среды $\vartheta_0 = 298 \text{ К}$, тогда

$$\begin{aligned} S_{\text{в}} &= \frac{1}{\pi d (h + \epsilon_{\text{п}} c_0 \Theta)} = \\ &= \frac{1}{\pi \cdot 0,105 [5,6 + 0,5 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 298^3 (4 + 0,25/298)]} = 0,336^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}. \end{aligned}$$

Вычислим коэффициенты $k_{\text{из}}$ и $k_{\text{об}}$ по (3-118):

$$k_{\text{из}} = \frac{33,6 + 450/(4 \cdot 3,14)}{33,6 + 52,6} - \frac{52,6}{33,6 + 52,6} \cdot \frac{2,4^2}{5,0^2 - 2,4^2} = 0,743;$$

$$k_{\text{об}} = 33,6/(33,6 + 52,6) = 0,388.$$

Вычисляем полные теплоемкости жилы, изоляции и оболочки, используя данные табл. 3-2:

$$C_{\text{ж}} = c_{\text{ж}} Q_{\text{ж}} = 3,35 \cdot 1250 = 41,9 \cdot 10^2 \text{ Дж/(м} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$\begin{aligned} C_{\text{из}} &= c_{\text{из}} Q_{\text{из}} = c_{\text{из}} \pi (R^2 - r_0^2) = 1,72 \cdot 3,14 (5,0^2 - 2,4^2) \cdot 10^2 = \\ &= 103,5 \cdot 10^2 \text{ Дж/(м} \cdot ^\circ\text{C)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{об}} &= c_{\text{об}} Q_{\text{об}} = c_{\text{об}} \pi D_{\text{об}} \Delta_{\text{об}} = 1,57 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,25 \cdot 10^2 = \\ &= 12,4 \cdot 10^2 \text{ Дж/(м} \cdot ^\circ\text{C)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= C_{\text{ж}} + k_{\text{из}} C_{\text{из}} + k_{\text{об}} C_{\text{об}} = (41,9 + 0,743 \cdot 103,5 + \\ &+ 0,388 \cdot 12,4) \cdot 10^2 = 124 \cdot 10^2 \text{ Дж/(м} \cdot ^\circ\text{C)}. \end{aligned}$$

Вычислим потери в жиле, предполагая, что ток равен 1100 А:
 $P_0 = R_{ж0} I^2 = 13,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1100^2 = 16,4$ Вт/м (сопротивление жилы берется при 20 °С).

Определим постоянную времени нагрева:

$$\theta_0 = \frac{C (S_{\text{ж}} + S_{\text{из}})}{1 - P_0 \alpha (S_{\text{ж}} + S_{\text{из}})} =$$

$$= \frac{124 (33,6 + 52,6)}{1 - 0,164 \cdot 0,004 (33,6 + 52,6)} = 11\,300 \text{ с.}$$

Вычисление постоянной времени произведено без учета потерь в диэлектрике. Однако погрешность в данном случае будет невелика.

3-13. НАГРЕВАНИЕ КАБЕЛЯ, ПРОЛОЖЕННОГО В ЗЕМЛЕ

При прокладке в земле изменение температуры кабеля иногда продолжается в течение нескольких недель после включения кабеля под нагрузку. Если время, прошедшее после начала нагрева, невелико, то можно применять приближенные методы расчета, основанные на предположении, что масса грунта еще не успевает нагреться, т. е. температура оболочки равна температуре поверхности грунта.

Если это время достаточно велико, то скорость нагрева кабеля определяется в основном тепловой инерцией грунта, а теплоемкость кабеля в этом случае будет играть несущественную роль. При этом разность температуры жилы и оболочки быстро достигает почти установившегося значения:

$$t_{\text{ж}} \approx (P_{\text{ж}} + P_{\text{из}}/2) S_{\text{из}}. \quad (3-120)$$

Температура грунта на расстоянии r от оси кабеля может быть вычислена по формуле, полученной решением уравнения (2-3) при постоянной мощности потерь в жиле:

$$\vartheta = \frac{(1 + y_0 \alpha) P_{\text{ж}} + P_{\text{из}}}{2\pi\lambda} G(t), \quad (3-121)$$

где λ — теплопроводность грунта;

$G(t)$ — геометрический коэффициент в неустановившемся режиме, равный:

$$G(t) = \ln l + \frac{1}{2} \varphi(y_1) - \frac{1}{2} \varphi(y_2) \quad (3-122)$$

($y_1 = r^2/(4at)$; $y_2 = l^2 y_1$; $a = \lambda/c$ — коэффициент теплопроводности грунта и c — его теплоемкость; $l = r'_{\text{жн}}/r_{\text{жн}}$ (см. рис. 3-5) — отношение расстояния от искомой точ-

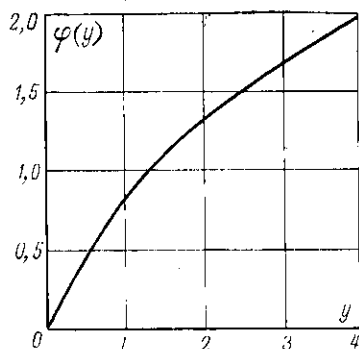


Рис. 3-13. К расчету нагревания кабеля, проложенного в земле.

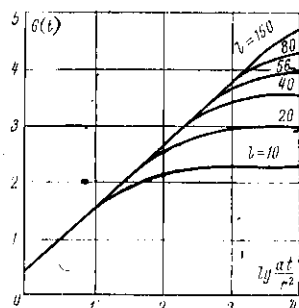


Рис. 3-14. Температура в грунте в зависимости от критерия Фурье $Fo = at/r^2$.

ки до оси зеркального отображения кабеля к расстоянию до оси реального кабеля).

При $y < 0,1$

$$\varphi(y) = y - y^2/4, \quad (3-123)$$

а при $y > 4$

$$\varphi(y) = \ln y + C, \quad (3-124)$$

где $C = 0,5772$ — постоянная Эйлера.

В пределах $y = 0,1 \div 4$ значение функции выбирается по графику рис. 3-13.

Очевидно, что при вычислении температуры оболочки кабеля в (3-122) необходимо подставлять значение радиуса кабеля $r = R$. В этом случае $l = 2L/R = 4L/D_n$ [см. (3-39)].

Таким образом, скорость нагрева кабеля может быть выражена в зависимости от критерия Фурье $Fo = at/r^2$ (рис. 3-14).

Пример 3-3. Кабель с наружным радиусом $R = 25$ мм проложен в земле на глубине $L = 700$ мм. Найти температуру на оболочке кабеля через 1 ч после включения его под нагрузку, если потери в кабеле соответствуют $P = 50$ Вт/м.

По табл. 3-2 выбираем для грунта $\rho = 1800$ кг/м³, $c = 0,83 \times 10^3$ Дж/(кг·°C) и тепловое сопротивление грунта $\sigma_1 = 1,2$ °C·м/Вт [$\lambda = 0,83$ Вт/(м·°C)].

Находим $a = \lambda / c\rho = 0,556 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Для наружной поверхности кабеля $l = 2L/R$. Тогда

$$y_1 = R^2 / (4at) = 0,025^2 / (4 \cdot 0,556 \cdot 10^{-6} \cdot 3600) = 0,0781; \quad y_2 = y_1 l^2 = 245$$

Находим функцию $\varphi(y_1)$ по (3-123);

$$\varphi(y_1) = 0,0781 - 0,0781^2/4 = 0,0766,$$

а функцию $\varphi(y_2)$ по (3-124):

$$\varphi(y_2) = \ln 245 + 0,5772 = 6,075;$$

$\ln 2L/R = 4,01$. При подстановке всех значений в (3-123) получим $G(t) = 1,01$.

Таким образом, окончательно по (3-121) получим:

$$\theta_{0,6} = 0,5/2\pi \cdot 120 \cdot 1,01 = 9,63^\circ\text{C}.$$

Значение $G(t)$ можно также найти по кривым рис. 3-14.

3-14. РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВАНИЯ КАБЕЛЕЙ МЕТОДОМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ

Рассмотренные методы расчета нагревания кабелей пригодны лишь для простых конструкций, постоянных значений тока или потерь в жиле и при достаточно большом времени после начала процесса нагревания (регулярный режим). Точное решение уравнения теплопроводности в частных производных в большинстве случаев принципиально возможно, но это решение оказывается чрезвычайно громоздким и может быть практически реализовано только с помощью вычислительных машин. Однако уже при постановке задачи обычно вводится ряд допущений. Так, например, предполагается, что тепловые характеристики материалов и коэффициент теплопередачи не зависят от температуры. Конструктивные размеры кабеля также имеют определенные отклонения. В связи с этим для практических расчетов можно рекомендовать сравнительно простой приближенный метод сосредоточенных емкостей, который будет проиллюстрирован на примере одножильного кабеля с метал-

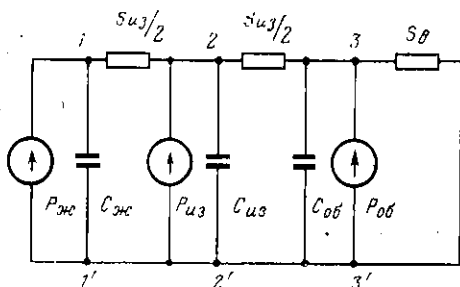


Рис. 3-15. Схема замещения кабеля для расчета нестационарного режима нагревания.

лической оболочкой без защитных покровов, проложенного в воздухе.

Предположим, что вся теплоемкость изоляции сосредоточена на окружности, радиус которой равен среднегеометрическому радиусу изоляции $r_{\text{ср}} = \sqrt{Rr_0}$.

Тогда схему замещения тепловых процессов можно составить аналогично цепи для электрических процессов (рис. 3-15). В этой схеме тепловые сопротивления аналогичны электрическим сопротивлениям, источники тепла (потери) аналогичны источникам тока (ток фиксирован, внутреннее сопротивление источника бесконечно велико) и полные теплоемкости элементов конструкции кабеля аналогичны электрическим емкостям.

Для каждого элемента конструкции может быть составлено дифференциальное уравнение теплового баланса. Так, для жилы количество выделяемого в ней тепла $P_{\text{ж}}$ будет равно количеству тепла, необходимого для нагревания жилы в единицу времени $C_{\text{ж}} d\vartheta_{\text{ж}}/dt$, плюс количество тепла, поступающего от жилы к среднему радиусу изоляции:

$$P_{\text{ж}} = C_{\text{ж}} \frac{d\vartheta_{\text{ж}}}{dt} + 2 \frac{\vartheta_{\text{ж}} - \vartheta_{\text{из}}}{S_{\text{из}}}. \quad (3-125)$$

Аналогично могут быть составлены уравнения для изоляции (для точек 2—2') и для оболочки (точки 3—3'):

$$P_{\text{из}} = C_{\text{из}} \frac{d\vartheta_{\text{из}}}{dt} + 2 \frac{\vartheta_{\text{из}} - \vartheta_{\text{ж}}}{S_{\text{из}}} + 2 \frac{\vartheta_{\text{из}} - \vartheta_{\text{об}}}{S_{\text{из}}}; \quad (3-126)$$

$$P_{\text{об}} = C_{\text{об}} \frac{d\vartheta_{\text{об}}}{dt} + 2 \frac{\vartheta_{\text{об}} - \vartheta_{\text{из}}}{S_{\text{из}}} + \frac{\vartheta_{\text{об}}}{S_{\text{в}}}. \quad (3-127)$$

Система трех дифференциальных уравнений (3-125) — (3-127) с тремя неизвестными $\vartheta_{\text{ж}}$, $\vartheta_{\text{из}}$, $\vartheta_{\text{об}}$ может быть решена либо обычным путем приведения к уравнению третьего порядка с одним неизвестным, например $\vartheta_{\text{ж}}$, либо операторным методом. Для решения необходимо задать начальные условия, т. е. $\vartheta_{\text{ж.н}}$, $\vartheta_{\text{из.н}}$ и $\vartheta_{\text{об.н}}$ в начале процесса нагревания или охлаждения. В данном случае решение будет состоять из суммы трех экспоненциальных членов.

Большая точность может быть достигнута, если разделить изоляцию на несколько слоев и внутри каждого слоя сосредоточить его теплоемкость на соответствующем среднем радиусе. В этом случае количество уравне-

ний в системе соответственно возрастет. В более сложных конструкциях кабелей каждый элемент конструкции можно представить в виде сосредоточенных теплоемкостей, которые соединены между собой тепловыми сопротивлениями в соответствии с геометрической конструкцией кабеля. Решение таких задач удобно проводить с помощью АВМ.

Если нагрузка непрерывно изменяется во времени, то в уравнения (3-125) — (3-127) необходимо подставлять значения $P_{ж}$, $P_{из}$, $P_{об}$ в виде заданных функций времени. Если известна закономерность изменения температуры от времени при постоянной мощности потерь в виде $\vartheta_{ж} = P_{ж}f(t)$, то при переменном параметре $P_{ж}$ температуру можно найти, используя интеграл Дюамеля:

$$\vartheta_{ж} = P_{ж0}f(t) + \int_0^t \frac{dP_{ж}}{dx} f(t-x) dx, \quad (3-128)$$

где $P_{ж0}$ — потери в жиле в начале процесса ($t=0$);

x — переменное время интегрирования;

t — момент времени, для которого ведется расчет температуры.

Решение для нестационарного процесса в общем виде получается громоздким и неудобным для практических расчетов и анализа. В то же время при практической работе кабеля нагрузка в нем изменяется периодически каждые сутки. Именно для периодического изменения нагрузки и представляет интерес решение нестационарного процесса. Периодическая функция для потерь в кабеле может быть разложена на гармонические составляющие в виде ряда Фурье. Тогда для каждой из гармонических составляющих ряда Фурье схема рис. 3-15 может быть решена аналогично цепи переменного тока с применением комплексных величин. Так, если $P_{ж} = P_{м}(1 - \sin \omega t)$ (здесь $\omega = 2\pi/T$, T — период колебаний потерь), а $P_{из} = \text{const}$, то температура жилы будет складываться из постоянной температуры от потерь в изоляции, постоянной температуры от потерь $P_{м}$ в жиле и периодической функции от потерь в жиле $P_{м} \sin \omega t$. Потери в оболочке выразим через потери в жиле $P_{об} = y_{об}P_{ж}$. Для постоянных составляющих потерь температуру можно вычислить по обычному уравнению для стационарного процесса (3-49). При вычислении переменной составляющей температуры можно воспользоваться, например, ме-

тодом узловых потенциалов. Для узлов 1—3 и 1'—3' (рис. 3-15) сумма тепловых потоков равна нулю, откуда следует:

$$P_m = j\omega C_{ж} \vartheta_{ж} + 2 \frac{\vartheta_{ж} - \vartheta_{из}}{S_{из}}; \quad (3-129)$$

$$0 = j\omega C_{из} \vartheta_{из} + 2 \frac{\vartheta_{из} - \vartheta_{ж}}{S_{из}} + 2 \frac{\vartheta_{из} - \vartheta_{об}}{S_{из}}; \quad (3-130)$$

$$P_m y_{об} = j\omega C_{об} \vartheta_{об} + 2 \frac{\vartheta_{об} - \vartheta_{из}}{S_{из}} + \frac{\vartheta_{об}}{S_a}. \quad (3-131)$$

Эта система уравнений аналогична системе (3-125)—(3-127), в которой вместо производной подставлены значения $j\omega\vartheta$. Из системы (3-129)—(3-131) вычислим $\vartheta_{ж}$. Затем от комплексных величин $\vartheta_{ж}$ перейдем к периодической функции для мгновенных значений и сложим с постоянной составляющей температуры. Если будет несколько гармонических составляющих потерь с кратными частотами, то необходимо сложить мгновенные значения температуры для всех составляющих (с учетом фаз) и найти наибольшее значение температуры. С увеличением частоты амплитуда колебаний температуры будет быстро затухать.

Таким образом, для схем с сосредоточенными теплоемкостями можно применять детально разработанные методы теоретических основ электротехники.

Наибольшая допустимая нагрузка при периодическом ее изменении превышает нагрузку, рассчитанную при стационарном режиме. Проверка допустимости заданного режима нагрузки состоит в том, чтобы наибольшее мгновенное значение температуры не превышало допустимой температуры для рассматриваемого кабеля.

В технологии кабельного производства большое значение имеет расчет нагревания изолированной жилы в процессе непрерывной вулканизации и расчет охлаждения изолированной жилы в воде после наложения пластмассовой изоляции. Если изоляция имеет больший объем по сравнению с жилой, то используется метод расчета нагревания однородного цилиндра [Л. 26]. Если жила имеет больший объем, то можно рассчитать нестационарный режим методом сосредоточенных теплоемкостей. В этом случае вследствие отсутствия металлической оболочки в схеме рис. 3-14 будут отсутствовать теплоемкость и потери в оболочке. Тогда система урав-

нений будет состоять из (3-125) и (3-126), в которых $P_{ж}$, $P_{из}$ и $P_{об}$ будут равны нулю.

Из (3-125) найдем $\vartheta_{из}$ и подставим в (3-126). Получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{C_{из}C_{ж}S_{из}}{2} \frac{d^2\vartheta_{ж}}{dt^2} + \left(C_{из} + 2C_{ж} \frac{S_{из} + S_{в}}{S_{из} + 2S_{в}} \right) \frac{d\vartheta_{ж}}{dt} + \frac{2\vartheta_{ж}}{S_{из} + 2S_{в}} = 0. \quad (3-132)$$

Решение этого уравнения состоит из двух экспонент:

$$\vartheta_{ж} = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t}, \quad (3-133)$$

где α_1 и α_2 — корни характеристического уравнения,

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{C_{ж}C_{из}S_{из}} \left(C_{из} + 2C_{ж} \frac{S_{из} + S_{в}}{S_{из} + 2S_{в}} \pm \sqrt{\left(C_{из} + 2C_{ж} \frac{S_{из} + S_{в}}{S_{из} + 2S_{в}} \right)^2 - 4C_{из}C_{ж} \frac{S_{из}}{S_{из} + 2S_{в}}} \right). \quad (3-134)$$

Для определения произвольных коэффициентов A_1 и A_2 необходимо знать начальные ($t=0$) значения $\vartheta_{ж,н}$ и $\vartheta_{из,н}$. Тогда из (3-125) ($P_{ж}=0$) найдем

$$\frac{d\vartheta_{ж}}{dt} \Big|_n = -2 \frac{\vartheta_{ж,н} - \vartheta_{из,н}}{C_{ж}S_{из}}.$$

Продифференцировав (3-133) при $t=0$, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= \vartheta_{ж,н}; \\ \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 &= 2 \frac{\vartheta_{ж,н} - \vartheta_{из,н}}{C_{ж}S_{из}}, \end{aligned} \quad (3-135)$$

из которой находим A_1 и A_2 . Подставив их в (3-133), получим:

$$\begin{aligned} \vartheta_{ж} = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} & \left[\left(\vartheta_{ж,н} \alpha_2 + 2 \frac{\vartheta_{ж,н} - \vartheta_{из,н}}{C_{ж}S_{из}} \right) e^{\alpha_1 t} - \right. \\ & \left. - \left(\vartheta_{ж,н} \alpha_1 + 2 \frac{\vartheta_{ж,н} - \vartheta_{из,н}}{C_{ж}S_{из}} \right) e^{\alpha_2 t} \right]. \end{aligned} \quad (3-136)$$

Приведенная методика может быть использована также для приближенных технологических расчетов.

При охлаждении в воде значение $S_{в}$ определяется как тепловое сопротивление теплопередачи от поверхно-

сти кабеля к воде. При вулканизации в насыщенном паре S_v практически равно нулю и выражение (3-134) упрощается, при этом под θ понимается разность между температурой в рассматриваемой точке кабеля и температурой пара T_0 . Тогда температура жилы, например, будет равна $T_{ж} = T_0 - \theta_{ж}$.

Глава четвертая

ТЕОРИЯ И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СКРУТКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУКЦИЯХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

В зависимости от условий монтажа и эксплуатации силовых кабелей и проводов медные и алюминиевые жилы изготавливаются различной гибкости. В связи с этим токопроводящие жилы могут быть однопроволочными (ограниченных сечений) или скрученными из нескольких проволок, а по форме сечения — круглыми, секторными и сегментными.

Медные жилы кабелей и проводов с пластмассовой и резиновой изоляцией по степени гибкости в соответствии с ГОСТ 1956-70 изготавливаются следующих четырех типов:

Тип I — жилы нормальной гибкости для неподвижной прокладки. Эти жилы изготавливаются в диапазоне сечения 0,03 — 625 мм². Жилы сечением до 10 мм² выполняются однопроволочными, а жилы большего сечения — многопроволочными.

Тип II — гибкие жилы для условий, когда требуется повышенная гибкость при монтаже, а также для переносных проводов и кабелей, работающих при больших радиусах изгиба. Эти жилы изготавливаются сечением 0,05—500 мм² из проволок диаметром 0,10—0,97 мм.

Тип III — жилы повышенной гибкости для переносных кабелей, проводов и шнуров, работающих при малых радиусах изгиба. Эти жилы сечением 0,03—400 мм² скручиваются из проволок диаметром 0,08—0,68 мм.

Тип IV — особо гибкие жилы, которые изготавливаются сечением 0,03—150 мм² из проволок диаметром 0,05—0,37 мм.

Конструкции всех этих жил приведены в ГОСТ 1956-70.

Алюминиевые жилы для проводов и кабелей с пластмассовой и резиновой изоляцией в соответствии с ГОСТ 12137-66 изготавливаются трех типов.

Алюминиевые жилы типа I сечением 1,0—625 мм² до сечений 35 мм² включительно изготавливаются однопроволочными, а остальные скручиваются из проволок диаметром 1,04—2,51 мм. Алюминиевые жилы типа II изготавливаются только многопроволочными и скручиваются из проволок диаметром 0,52—0,97 мм, а жилы типа III — из проволок диаметром 0,52—0,68 мм.

В кабелях с пропитанной бумажной изоляцией (ГОСТ 18410-73) допускается применение медных однопроволочных секторных жил сечением до 50 мм². Алюминиевые однопроволочные секторные жилы в этих кабелях применяются до сечения 240 мм² включительно. Жилы всех остальных сечений делаются многопроволочными и скручиваются по технологии, основы которой изложены ниже.

4-2. ПРОСТАЯ ПРАВИЛЬНАЯ СКРУТКА ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ

При правильной скрутке поверх одной или нескольких скрученных центральных проволок накладывается несколько повивов из проволок того же диаметра. Обычно жилы скручиваются с одной и несколько реже — с тремя, четырьмя и пятью центральными проволоками. Конструкция с двумя центральными проволоками не применяется ввиду ее малой устойчивости.

Общее количество проволок в этих скрученных жилах определяется следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= 3n(n-1) + 1; & S_3 &= 3n^2; \\ S_4 &= n(3n+1); & S_5 &= n(3n+2), \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

где n — число повивов, причем одна или несколько центральных проволок считаются за первый повив.

При изготовлении токопроводящих жил обычно стремятся получить возможно больший коэффициент заполнения. Последний для круглых жил нетрудно определить следующим образом. Наружный диаметр скрученных жил на основании элементарных геометрических соотношений равен:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= (2n-1)d; & D_3 &= (2n+0,15)d; \\ D_4 &= (2n+0,41)d; & D_5 &= (2n+0,7)d, \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

где d — диаметр скручиваемых проволок. Из формул (4-1) и (4-2) нетрудно определить коэффициенты заполнения:

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= \frac{[3n(n-1)+1] \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi}{4} (2n-1)^2 d^2} = \frac{3}{4} \frac{(n^2 - n + 0,33)}{(n^2 - n + 0,25)}; \\ \eta_2 &= \frac{3n^2 \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi}{4} (2n+0,15)^2 d^2} = \frac{3}{4} \frac{n^2}{(n^2 + 0,15n + 0,006)}; \\ \eta_3 &= \frac{n(3n+1) \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi}{4} (2n+0,41)^2 d^2} = \frac{3}{4} \left(\frac{n^2 + 0,33n}{n^2 + 0,41 + 0,0428} \right); \\ \eta_4 &= \frac{n(3n+2) \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi}{4} (2n+0,7)^2 d^2} = \frac{3}{4} \frac{n^2 + 0,67n}{(n^2 + 0,7n + 0,1225)}. \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

Из анализа этих формул, в которых не учитываются небольшие отклонения сечения отдельных проволок от круглого, нетрудно заключить, что для конструкций с одной центральной проволокой η всегда больше 0,75 и приближается к этому значению с увеличением числа повивов n . В остальных конструкциях $\eta < 0,75$ и также приближается к этому значению с увеличением n .

При скрутке жил очень большое значение имеет шаг скрутки, т. е. расстояние по длине скручиваемой жилы, которое соответствует одному полному обороту вокруг нее отдельной проволоки. На практике шаг скрутки обычно выражают коэффициентом m , равным отношению длины шага скрутки к наружному диаметру данного повива D_n , т. е.



$$m = h/D_n.$$

Рис. 4-1. Сечение проволоки плоскостью, перпендикулярной оси скрученной жилы.

Значение m для внутреннего повива жил типа I должно быть не более 35 и для наружного — не более 18, а у жил типов II, III и IV — соответственно не более 25 и 16.

При скрутке круглых жил кабелей с пропитанной бумажной изоляцией коэффициент m для внутренних повивов принимают равным до 24 и для наружных — в пределах 12—16.

Количество проволок, которое может уложиться в том или ином повиве, определяется длиной окружности, проходящей через центры этих проволок. Пусть диаметр этой окружности n -го повива будет D_n , в этом случае $L_n = \pi D_n$. Длина этой же окружности для $(n+1)$ -го повива будет $L_{n+1} = \pi(D_n + 2d)$, т. е. она больше предыдущей на $6,28d$; поэтому в каждом повиве число проволок увеличивается на 6. Здесь мы не учитывали, что каждая проволока в повиве представляет собой винтовую линию и ее сечение плоскостью, перпендикулярной оси жилы, будет иметь вид, приведенный на рис. 4-1. При принятых в кабельной технике шагах скрутки отклонение этого сечения (по форме) от эллипса незначительно, поэтому в дальнейшем принимаем такие сечения за эллипс.

Из рис. 4-2 видно, что большая ось эллипса d' зависит от угла скрутки α , а именно:

$$d' = d / \sin \alpha = d \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha} \approx d \left(1 + \frac{1}{2} \operatorname{ctg}^2 \alpha \right) = (1 + k) d. \quad (4-4)$$

Отсюда разность между d' и d равна:

$$k = \frac{1}{2} \operatorname{ctg}^2 \alpha = 1 / (2 \operatorname{tg}^2 \alpha). \quad (4-5)$$

При очень малых шагах скрутки k значительно увеличивается, поэтому число проволок от повива к повиву может возрастать не на 6, а на меньшее количество (при условии, что повивы скручиваются в разные стороны). Установим минимальный шаг скрутки, при котором число проволок от повива к повиву будет увеличиваться на 6. Соотношение между количеством проволок в двух соседних повивах S_n и S_{n+1} (с учетом k) будет выражаться так:

$$S_{n+1} = S_n + 2\pi / (1 + k).$$

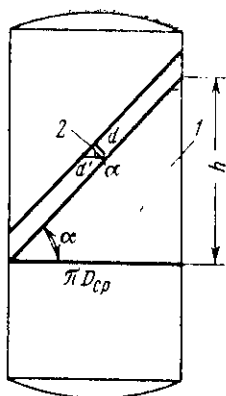


Рис. 4-2. Положение отдельной проволоки в повиве.

При предельном (минимальном) шаге скрутки

$$2\pi/(1+k)=6, \text{ откуда } k=0,047.$$

Из рис. 4-3 следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = mD/\pi D = m/\pi \text{ и } k = 1/(2 \operatorname{tg}^2 \alpha) = \pi^2/(2m^2). \quad (4-6)$$

Подставив в последнее выражение значение k , соответствующее минимальному шагу скрутки, получим:

$$m = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\pi^2}{0,047}} \approx 10. \quad (4-7)$$

При изготовлении токопроводящих жил иногда применяется скрутка из проволок различных диаметров. В этом случае число проволок в повиве определяется из уравнения

$$n = \pi(D+d)/d(1+k),$$

где D — наружный диаметр предыдущего повива;

d — диаметр накладываемой проволоки;

k определяется из (4-5) или (4-6).

Если сделать развертку скрученной проволоки, то она изобразится гипотенузой l_1 прямоугольного треугольника (рис. 4-3), большой катет которого равен длине шага, а меньший — длине окружности, проведенной по центрам проволок данного повива, т. е.

$$l_1 = \sqrt{\pi^2 D_{\text{ср}}^2 + m^2 D_{\text{ср}}^2}.$$

Так как $h = mD_{\text{ср}}$, то

$$l_1 = mD_{\text{ср}} \sqrt{1 + \pi^2/m^2} \approx h \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2}\right).$$

Отсюда укрутка (приращение длины)

$$\Delta l = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2}. \quad (4-8)$$

Таким образом, укрутка равна k . Формулу (4-8) можно также написать на основании подобия треугольников 1 и 2 (рис. 4-2). На практике коэффициент m , как указывалось выше, часто принимают как отношение шага скрутки к наружному диаметру $D_{\text{н}}$.

Определение укрутки с помощью (4-8) может здесь привести к значи-

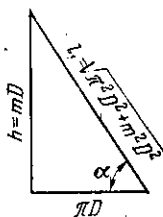


Рис. 4-3. Развертка одного шага проволоки.

тельными погрешностям. В этом случае необходимо пользоваться следующими соотношениями:

$$l_1 = \sqrt{\pi^2 D_{\text{сп}}^2 + m^2 D_{\text{н}}^2} = m D_{\text{н}} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 D_{\text{сп}}^2}{m^2 D_{\text{н}}^2}} \approx \\ \approx m D_{\text{н}} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2} \left(\frac{D_{\text{н}} - d}{D_{\text{н}}} \right)^2 \right].$$

В этом случае укрутка равна:

$$\Delta l = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2} \left(1 - \frac{d}{D_{\text{н}}} \right)^2. \quad (4-9)$$

В частности, для семипроволочных жил, для которых $D_{\text{н}} = 3d$,

$$\Delta l = \frac{2}{9} \frac{\pi^2}{m^2}. \quad (4-10)$$

Сравнивая (4-10) с (4-8), видим, что разница весьма значительна. С увеличением числа повивов эта разница заметно уменьшается, но все же она должна учитываться при расчете массы и расхода металла.

4-3. ДЕФОРМАЦИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПРОВОЛОК ПРИ СКРУТКЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ

Существует два способа скрутки жил: а) без открутки и б) с откруткой скручиваемых проволок. При скрутке без открутки катушки жестко закрепляются на крутильной машине и могут вращаться только вокруг своей оси для размотки проволоки. В этом случае при каждом обороте машины проволоки закручиваются на угол 360° ,

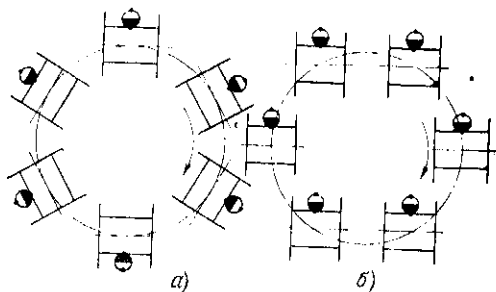


Рис. 4-4. Схемы скрутки жилы.

а — скрутка без открутки; б — скрутка с откруткой.

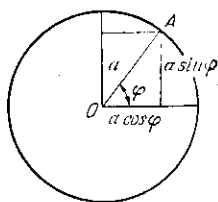


Рис. 4-5. Схема образования винтовой линии.

при этом проволоки подвергаются деформациям, которые происходят в упругопластической зоне. Наличие упругой деформации проволок приводит к деформации повивов, выпучиванию отдельных проволок и т. п. Особо значительные деформации при такой скрутке происходят при применении твердых (неотожженных) проволок при изготовлении проводов для воздушных линий электропередачи.

Для устранения этих деформаций применяется второй способ скрутки — с откруткой. Здесь при каждом обороте крутильной машины катушки с проволокой получают вращение на угол 360° в противоположную сторону. В этом случае каждая катушка все время сохраняет положение, параллельное начальному (рис. 4-4).

При правильной скрутке круглых жил оси отдельных проволок располагаются вокруг сердечника по цилиндрической винтовой линии. Образование такой линии определяется следующим условием: какая-либо точка A движется с постоянной угловой скоростью по окружности (рис. 4-5), а сама окружность, будучи нормальной к оси цилиндра, поступательно перемещается вдоль оси этого цилиндра со скоростью v . Эти условия имеют место при правильной скрутке круглых жил.

В общем виде уравнения винтовой линии имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= a \cos \varphi; \\ y &= a \sin \varphi; \\ z &= vt. \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

В этих уравнениях z является осью цилиндра, причем движение точки A происходит в положительном направлении этой оси. Пусть за время t точка A повернулась на некоторый угол φ . Когда точка A повернется на угол 2π , она в то же время пройдет полную длину шага винтовой линии вдоль цилиндра, поэтому уравнения (4-11) можно переписать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x &= a \cos \varphi; \\ y &= a \sin \varphi; \\ z &= \frac{h}{2\pi} \varphi = b\varphi, \end{aligned} \right\} \quad (4-12)$$

где $a = (D + d)/2 = D'/2$;

D — диаметр сердечника;

d — диаметр скручиваемой проволоки.

Цилиндрическая винтовая линия является пространственной кривой, т. е. она имеет кривизну и кручение.

Кривизна характеризует степень отклонения кривой линии в какой-либо точке от соответствующей соприкасающейся с ней плоскостью. Таким образом, степень кручения можно характеризовать углом, который на двух смежных участках образуют соприкасающиеся плоскости. Напомним, что соприкасающейся плоскостью называется такая плоскость, которая проходит через касательную и главную нормаль кривой в данной точке.

Цилиндрическая винтовая линия представляет собой единственную пространственную кривую, у которой кривизна и кручение (следовательно, и радиусы ρ_1 и ρ_2) по всей длине постоянны.

Кручение проволоки на единицу длины винтовой линии определяется уравнением

$$T = 1/\rho_2 = \frac{b}{(a^2 + b^2)} \quad (4-13)$$

или

$$T = \frac{h/2\pi}{a^2 + (h/2\pi)^2} = \frac{2\pi h}{(2\pi a)^2 + h^2}. \quad (4-14)$$

Так как $h = 2\pi a \operatorname{tg} \alpha$, то

$$T = \frac{(2\pi)^2 a \operatorname{tg} \alpha}{(2\pi a)^2 + h^2} = \frac{(2\pi a)^2 \operatorname{tg} \alpha}{[(2\pi a)^2 + h^2] a},$$

а так как

$$2\pi a / \sqrt{(2\pi a)^2 + h^2} = \cos \alpha,$$

то

$$T = \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha / a = \sin 2\alpha / (2a) = \sin 2\alpha / D'. \quad (4-15)$$

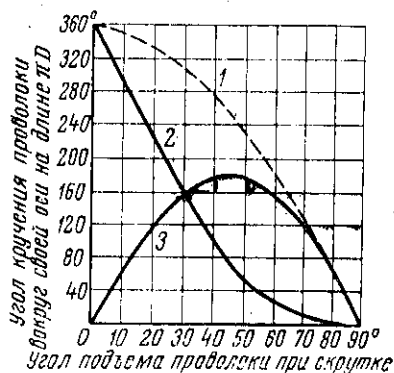


Рис. 4-6. Зависимость кручения от угла подъема винтовой линии.

1 — кручение от одной открутки; 2 — скрутка с откруткой; 3 — скрутка без открутки.

Таким образом, кручение на единицу длины винтовой линии зависит от угла подъема винтовой линии, причем максимум кручения получается при $\alpha = 45^\circ$ (рис. 4-6).

Особый интерес представляет кручение проволоки за полный оборот или на длине одного витка винтовой линии S :

$$S = 2\pi \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Кручение на этой длине составляет:

$$T' = \frac{b}{(a^2 + b^2)} 2\pi \sqrt{a^2 + b^2} = \frac{2\pi b}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (4-16)$$

Но так как $2\pi b = h$, то

$$T' = \frac{h}{\sqrt{a^2 + \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2}} = \frac{2\pi h}{\sqrt{(2\pi a)^2 + h^2}}. \quad (4-17)$$

Учитывая, что $h / \sqrt{(2\pi a)^2 + h^2} = \sin \alpha$, получаем кручение на длине одного витка:

$$T' = 2\pi \sin \alpha. \quad (4-18)$$

Разделив последнее уравнение на 2π , получим кручение проволоки в оборотах на один виток (шаг) винтовой линии или за время полного оборота фонаря крутильной машины:

$$T' = \sin \alpha. \quad (4-19)$$

Следует иметь в виду, что кручение T имеет размерность см^{-1} . В (4-19) оно безразмерно только потому, что для наглядности выразили кручение в оборотах на длине одного витка винтовой линии. Это уравнение показывает, что при скрутке без открутки закручивание проволоки на угол 360° на длине одного шага будет происходить только при

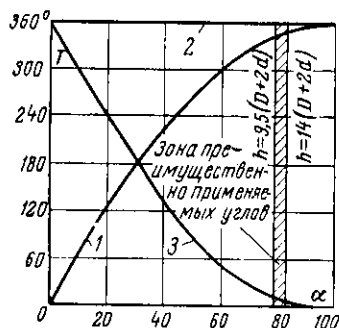


Рис. 4-7. Зависимость кручения на длине одного шага от угла подъема винтовой линии.

1 — скрутка без открутки; 2 — кручение от одной открутки; 3 — остаточное кручение при скрутке в откруткой.

очень большой его длине ($\sin \alpha = 1$), а максимальное кручение на единице длины, как указывалось выше, имеет место при $\alpha = 45^\circ$.

Скрутка круглых жил происходит обычно с шагом не менее 10—14 диаметров скрученной жилы. Поэтому практически с каждым оборотом крутильного фонаря закрутка проволоки будет составлять почти полный оборот. Это наглядно показано на рис. 4-7, на котором приведена зависимость кручения на одну длину винтовой линии от угла подъема α .

При принудительной открутке происходит закрутка проволоки в сторону, обратную кручению проволоки при скрутке жилы. Кручение от открутки на единицу длины составляет:

$$T_1 = 2\pi / \sqrt{(2\pi a)^2 + h^2}. \quad (4-20)$$

Так как

$$2\pi a / \sqrt{(2\pi a)^2 + h^2} = \cos \alpha,$$

то

$$T_1 = \cos \alpha / a = 2 \cos \alpha / D'. \quad (4-21)$$

Остаточное кручение проволоки при скрутке с откруткой будет равно:

$$T_0 = T_1 - T = 2 \cos \alpha / D' - \sin 2\alpha / D',$$

или в градусах

$$T_0 = \frac{180}{\pi D'} (2 \cos \alpha - \sin 2\alpha). \quad (4-22)$$

Если остаточное кручение брать в оборотах на длине одного шага винтовой линии, то получаем:

$$T_0 = T_1 - T = 1 - \sin \alpha. \quad (4-23)$$

На рис. 4-7 показаны кручения на длине одного шага винтовой линии при скрутке без открутки и с откруткой в зависимости от угла подъема винтовой линии α . Таким образом, при принятых шагах скрутки токопроводящих жил и скрутки изолированных жил в кабель можно считать, что при скрутке с откруткой остаточное кручение совершенно незначительно. Однако при очень малых углах α кручение при скрутке с откруткой может быть даже большим, чем без открутки. Угол α для этого случая определить нетрудно. Рассматриваемому случаю соответствует уравнение

$$\sin 2\alpha / D' = (2 \cos \alpha - \sin 2\alpha) / D'.$$

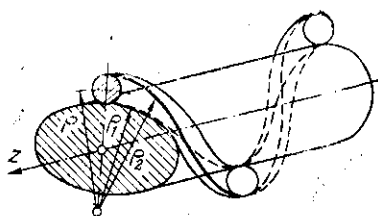


Рис. 4-8. Положение проволоки в жиле при скрутке без открутки.

Решив это уравнение, получим, что угол $\alpha = 30^\circ$, что и соответствует кривым, приведенным на рис. 4-6. Таким образом, применение открутки на угол 360° за один оборот крутильного устройства становится нецелесообразным только при углах подъема α менее 30° , что

может иметь место, например, при скрутке специальных шнуров. В этом случае целесообразна частичная открутка, т. е. открутка на угол 360° за несколько оборотов крутильного устройства.

До сих пор мы рассматривали кручение по винтовой линии. Переходя к процессам, происходящим в проволоках, имеющих определенный диаметр, следует иметь в виду, что при скрутке без открутки проволока ложится на сердечник всегда одной и той же образующей, так как она не имеет другого кручения, кроме кручения по винтовой линии (рис. 4-8). Ось проволоки, как указывалось выше, изгибается по дуге с радиусом

$$\rho_1 = (D + d) / 2 \cos^2 \alpha.$$

Внутренние слои проволоки, прилегающие непосредственно к предыдущему повиву, изгибаются по дуге с радиусом

$$\rho_{1\text{вп}} = D / 2 \cos^2 \alpha,$$

а наружные слои — по дуге с радиусом

$$\rho_{1\text{нар}} = (D + 2d) / 2 \cos^2 \alpha.$$

Таким образом, при скрутке без открутки наружные слои проволоки будут удлиняться, а внутренние — сжиматься, т. е. каждая проволока по всей длине помимо деформации кручения получит деформацию чистого изгиба. Эти деформации у твердых медных проволок происходят обычно в упругопластичной зоне и являются основной причиной указанных выше нарушений целостности повивов.

Деформация кручения происходит в каждом слое сечения проволоки, причем уравнения, характеризующие кручение, приведенные выше, нужно рассматривать как средние для всего сечения, так как они соответствуют кручению оси проволоки. При скрутке без открутки кру-

чение наружных слоев несколько меньше и определяется уравнением

$$T = \sin 2\alpha / (D' + d).$$

Наоборот, кручение внутренних слоев больше и определяется уравнением

$$T = \sin 2\alpha (D' - d).$$

Кручение всех слоев при скрутке без открутки направлено в одну сторону. Если скрутка производится с откруткой, то при принятых в практике больших шагах скрутки все проволоки движутся по винтовой линии поступательно без вращения. В процессе открутки каждая точка сечения проволоки совершает движение по окружности одного и того же радиуса (рис. 4-9). Из рис. 4-9 видим, что при открутке проволока ложится на сердечник не одной и той же образующей, а различными, постепенно сменяющимися местами своей поверхности.

Так как все винтовые линии при скрутке с откруткой при практически принятых шагах в различных местах сечения проволоки остаются одинаковыми, ни один элементарный участок проволоки не получает ни сжатия, ни удлинения. Изогнутая форма проволоки в виде винтовой линии получается за счет деформации сдвига, причем точка приложения сдвигающей силы, действующей на проволоку, все время вращается вокруг оси проволоки и в то же время непрерывно перемещается по ее длине. Схема такой деформации проволок приведена на рис. 4-10.

Из рассмотренного можно сделать следующие выводы:

1. Кручение проволок при скрутке с откруткой и без нее зависит от угла подъема винтовой линии α .
2. При скрутке без открутки максимальное кручение на единицу длины проволоки будет при $\alpha = 45^\circ$ и на длине одного шага винтовой линии тем больше, чем больше шаг скрутки. При обычных шагах скрутки закрутка проволоки близка к одному обороту (360°) при каждом обороте крутильной части машины.

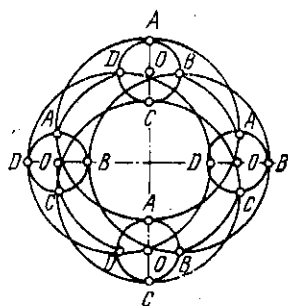


Рис. 4-9. Положение проволок в жиле при скрутке с откруткой.

3. При скрутке без открутки с очень малым шагом скрутки ($\alpha \leq 30^\circ$, $m \leq 1,8$) деформация кручения меньше, чем при скрутке с откруткой. В этом случае целесообразно применение крутильных машин без открутки или с частичной откруткой.

4. При скрутке без открутки помимо кручения каждая проволока подвергается деформации изгиба. При скрутке с откруткой при принятых на практике шагах скрутки кручение проволок совершенно незначительно. Кроме того, в этом случае отсутствует деформация изгиба, а изогнутая форма проволок получается за счет деформации сдвига.

5. Устройство для открутки можно заменить деформацией сдвига в проволоках перед их скруткой с помощью роликов, вращающихся вокруг оси движущихся проволок и производящих деформацию сдвига так, как это показано на рис. 4-10.

4-4. УПЛОТНЕННЫЕ КРУГЛЫЕ ЖИЛЫ

Коэффициент заполнения круглых неуплотненных жил колеблется в пределах 71—76%. Повышение этого коэффициента достигается уплотнением жил с помощью специальных вальцов.

При применении уплотненных жил достигается уменьшение на 5—9% расхода изоляционных материалов и на 7—9% свинца или алюминия. Кроме того, получается более гладкая поверхность жил и в связи с этим некоторое повышение электрической прочности изоляции, меньшее перемещение пропиточного состава по жилам и т. п.

При уплотнении токопроводящие жилы становятся несколько более твердыми, т. е. частично нагартовываются. Однако снижение электрической проводимости медных жил при этом составляет не более 0,6—0,8%, а алюминиевых — еще меньше, поэтому нагартовка не может служить препятствием для применения уплотненных жил.

Уплотнение круглых двухповивных жил иногда производится по верхнему повиву в двух парах последовательно расположенных вальцов с горизонтальными и вертикальными осями (рис. 4-11). В первой паре вальцов круглое сечение жилы сжимается до эллипса, малая ось которого равна диаметру уплотненной жилы, во второй паре вальцов жила уплотняется до строго круглой фор-

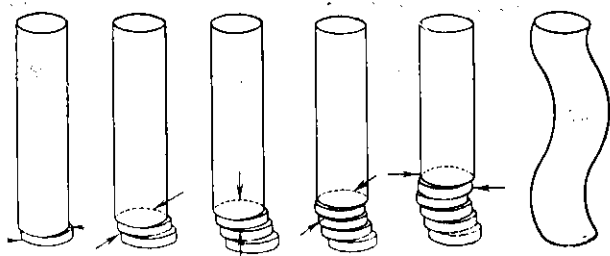


Рис. 4-10. Схема деформации отдельных проволок при скрутке с откруткой.

мы. Экспериментально установлены следующие оптимальные размеры (мм) уплотняющих вальцов:

$$\left. \begin{aligned} M &= D_2 + n\Delta + 0,5; \\ H &= (D - 0,2)/2; \\ R &= M/2, \end{aligned} \right\} \quad (4-24)$$

где D_2 и D — диаметры неуплотненной и уплотненной жил; Δ — положительный допуск на проволоку. Слагаемое $n\Delta$ предусмотрено для исключения попадания отдельных проволок между уплотняющими вальцами и появления в связи с этим прирезов и заусенцев, когда все проволоки верхнего повива будут иметь положительный допуск Δ . При таком методе уплотнения коэффициент заполнения повышается до 0,82—0,84. Дальнейшее повышение при этом методе уплотнения приводит к значительной нагартовке металла и увеличению жесткости жил.

Увеличение η до 0,92—0,93 возможно при уплотнении скручиваемой жилы по каждому повиву. В этом случае последующие повивы накладываются на уже уплотненную часть жилы. Поэтому, если укладывать то же число проволок, что и при нормальной скрутке неуплотненных жил, то диаметр проволок с каждым повивом приходится уменьшать, что повышает гибкость уплотненных жил. При уплотнении каждого повива дополнительно несколько уплотняются внутренние повивы, уже уплотненные ранее. Поэтому эти повивы вначале следует уплотнять в несколько меньшей степени в зависимости от количества дополнительно накладываемых повивов.

При уплотнении проволоки подвергаются значительной вытяжке, которая при одном уплотнении по верхне-

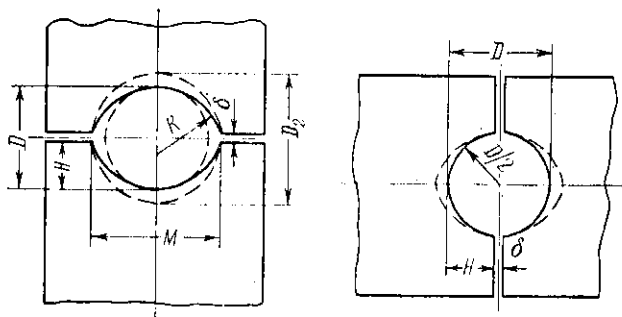


Рис. 4-11. Вальцы для уплотнения круглых жил по верхнему повиву.

му повиву составляет примерно 4—5%, а при уплотнении по каждому повиву может быть около 20% и более, что должно учитываться при определении диаметра скручиваемых проволок.

Для получения высоких коэффициентов заполнения необходимо применять уплотняющие вальцы более совершенных и прочных конструкций полузакрытого или закрытого типа.

4-5. СПЛОШНЫЕ СЕКТОРНЫЕ ЖИЛЫ

Сплошные секторные медные и в особенности алюминиевые (преимущественно прессованные для повышения гибкости) жилы находят широкое применение. При использовании таких жил существенно важно, чтобы по скрутке изолированных жил кабель имел строго круглую форму. Для этого необходимо, чтобы радиус дуги сектора жилы R был равен радиусу кабеля по скрутке изолированных жил $R_{ск}$ за вычетом толщины изоляции жилы $\delta_{ж}$, т. е.

$$R = R_{ск} - \delta_{ж}.$$

Для уменьшения пространств между жилами радиус закруглений ребер должен быть минимальным, но таким, чтобы не повреждалась изоляция. Для сечений 25 и 35 мм² он обычно принимается равным 1,0 и 1,2 мм.

Основные размеры сплошной секторной жилы могут быть получены из рассмотрения геометрических фигур, на которые разбит сектор (рис. 4-12):

$$a = (b - 2r) / 2 = (R - r) \sin \gamma;$$

$$\gamma = \arcsin \frac{a}{R - r} = \beta - \arcsin \frac{r + \delta_{ж}}{R - r}.$$

При предварительных расчетах радиус дуги сектора можно принять равным:

$$R = \sqrt{1,01 \cdot 0,97 S_n} + \delta_{ж} = \sqrt{0,98 S_n} + \delta_{ж}. \quad (4-25)$$

В (4-25) коэффициент 1,01 учитывает вытяжку однопроволочных жил при изолировании, а коэффициент 0,97 пока применяется в связи с фактическим уменьшением сечений против номинальных.

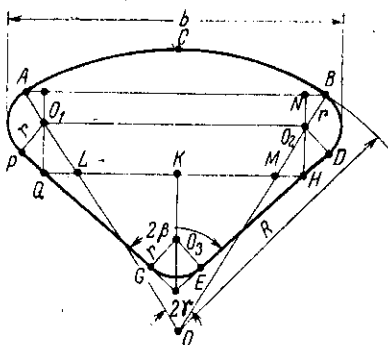


Рис. 4-12. Сплошная секторная жила.

4.6. УПЛОТНЕННЫЕ СЕКТОРНЫЕ ЖИЛЫ

В СССР все кабели с поясной изоляцией и сечением жил 25 мм² и более выпускаются только со сплошными или уплотненными секторными многопроволочными жилами. Эти жилы имеют те же преимущества, что и круглые уплотненные жилы.

Для уплотнения применяются три вида скрутки:

Для сечений 25—70 мм² жила состоит из 6 параллельных проволок и одного повива из 12 проволок того же диаметра.

Жилы сечением 95 и 120 мм² состоят из скрученной семипроволочной заготовки, двух продольных проволок и одного повива из 15 проволок того же диаметра. Для сечений 150—240 мм² применяется такая же конструк-

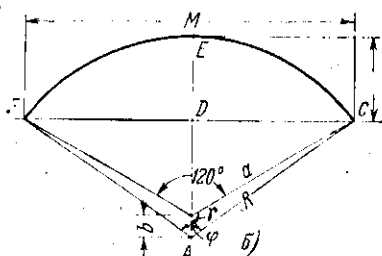
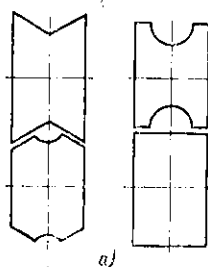


Рис. 4-13. Схема устройства секторных и сегментных уплотняющих валцов (а) и профиль валцов для уплотнения секторных жил (б).

ция, как и для сечений 95 и 120 мм², но с двумя повивами, причем все проволоки имеют одинаковый диаметр.

Уплотнение секторных и сегментных жил часто производят одной парой вальцов, принципиальное устройство и профиль которых приведены на рис. 4-13. Примерный расчет профиля и калибровки этих вальцов производится следующим образом.

Сечение вальцов в свету

$$S_b = S_k \eta_1 / \eta,$$

где $\eta_1 = 0,97$;

η — заданный коэффициент уплотнения жилы.

Сторона сектора вальцов a (мм) приближенно определяется по формуле

$$a \approx \sqrt{S_b}. \quad (4-26)$$

Далее

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{a^2 + b^2 + ab}; \\ H &= R - a/2 - (1,8 - 2,0); \\ M &= 1,73a - 0,2. \end{aligned} \right\} \quad (4-27)$$

В этих формулах параметр b принимается равным 1,6—1,8 мм в зависимости от толщины изоляции жилы. Кроме того, учитывается небольшой (около 0,2 мм) зазор между вальцами.

Формулы (4-27) являются приближенными. Поэтому необходимо производить проверку полученного фактического сечения и сравнивать его с заданным значением, а также проверять получившееся значение η , которое должно быть в пределах 0,83—0,86. В случае отклонения необходимо изменить значение a и вновь произвести расчет. При проверке величина S_b определяется по формуле

$$S_b = \frac{\pi R^2 \varphi}{360} - \frac{\sqrt{3}}{2} ab = \frac{\pi R^2 \varphi}{360} - 0,865 ab,$$

где

$$\varphi = 2 \arcsin \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{a}{R} = 2 \arcsin \left(0,865 \frac{a}{R} \right).$$

Как и при уплотнении круглых жил, при определении диаметра скручиваемых проволок должна учитываться их вытяжка. В связи с этим сечение проволок при указанном методе уплотнения для жил сечением 25—95 мм² должно увеличиваться на 5%, а для больших сечений — на 3,5—4,0%.

Пример 4-1. Рассчитать профиль секторных вальцов для уплотнения по верхнему повиву жилы сечением 120 мм^2 при $\eta=0,84$:

$$S_n = 0,97 \cdot 120 / 0,84 = 138,5 \text{ мм}^2;$$

$$a = \sqrt{138,5} \approx 11,75 \text{ мм}; R = 12,55 \text{ мм}; H = 5,0 \text{ мм}; M = 20,1 \text{ мм}.$$

Проверка расчета:

$$\varphi = 109,63^\circ; S_n = 135,8 \text{ мм}^2; \eta = 0,97 \cdot 120 / 135,8 = 0,857.$$

Чтобы кабель после скрутки изолированных жил имел строго круглую форму, секторные жилы и уплотняющие вальцы для кабелей на различные рабочие напряжения должны иметь различные радиусы своих дуг R , зависящие от толщины изоляции жилы, хотя это значительно увеличивает и осложняет калибровое хозяйство на заводе.

При уплотнении жил одной парой вальцов коэффициент заполнения трудно получить выше $0,85—0,86$, так как при повышении обжимающего усилия наблюдается значительная деформация проволок наружного повива. Поэтому обычно $\eta = 0,82 \div 0,84$.

Повышения коэффициента заполнения до $0,93—0,94$ можно достигнуть уплотнением по каждому повиву, причем уплотнение внутренних повивов может производиться одной парой горизонтальных вальцов закрытого или полузакрытого типа (рис. 4-14), а наружные повивы должны уплотняться горизонтальными и вертикальными вальцами, с помощью которых секторной жиле придается окончательная форма и устраняются дефекты на ребрах (рис. 4-15).

Уплотняющие вальцы обычно не имеют принудительного вращения. Увеличение коэффициента заполнения связано со значительным повышением усилий при уплотнении повивов, что легче может быть достигнуто путем

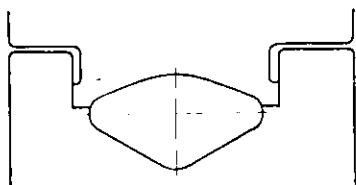


Рис. 4-14. Конструкция основных (горизонтальных) уплотняющих вальцов.

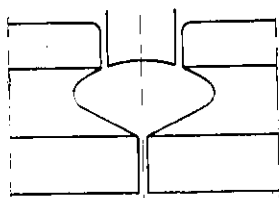


Рис. 4-15. Конструкция боковых (вертикальных) уплотняющих вальцов.

принудительного вращения уплотняющих вальцов. При этом необходимо наличие устройства, которое синхронизировало бы частоту вращения уплотняющих вальцов с линейной скоростью скручиваемой жилы.

4-7. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Конструкция токопроводящих жил маслонаполненных кабелей низкого и среднего давлений приведена на рис. 4-16. По одной из существующих конструкций внутренний повив жилы сечением 270 мм^2 состоит из 12 Z-образных проволок, а наружный — из 15 сегментных проволок. Все проволоки луженые, что повышает стабильность масла при эксплуатации кабелей. Для облегчения движения масла сквозь жилу в толщу изоляции на внутренних гранях Z-образных проволок делаются насечки (рис. 4-16). Жилы сечением 350 и 400 мм^2 отличаются от описанной конструкции размерами сегментных проволок и наличием второго повива из этих проволок.

Токопроводящие жилы с применением Z-образных проволок имеют повышенную жесткость. Кроме того, изготовление этих проволок с насечками связано с технологическими трудностями, повышающими их стоимость. Поэтому в зарубежной практике широкое применение находят токопроводящие жилы, у которых внутренний канал для масла создается с помощью винтовой спирали

из нержавеющей стали, поверх которой накладываются повивы из луженых круглых или трапециевидальных медных проволок. Такие жилы имеют повышенную гибкость и проще в изготовлении.

В кабелях высокого давления (в стальных трубах) у нас применяются медные жилы сечением от 120 до 700 мм^2 , которые скручиваются правильной скруткой. Например, жилы сечением 550 мм^2 скручиваются по

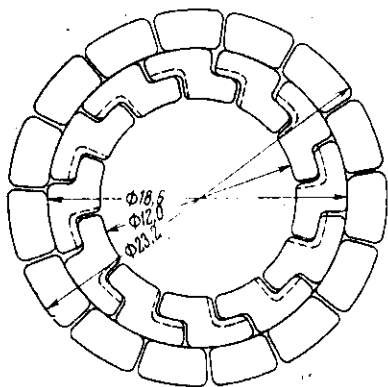


Рис. 4-16. Конструкция токопроводящей жилы маслонаполненного кабеля сечением 270 мм^2 .

системе $91 \times 2,78$ мм или $127 \times 2,35$ мм, жилы сечением 700 мм^2 — $127 \times 2,64$ мм.

Особенностью этих конструкций является значительное уменьшение коэффициента скрутки от внутренних повивов к наружным (примерно с $m \approx 23$ до $m \approx 12$), которое необходимо для исключения деформаций жилы при изгибах.

4-8. СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ КРУТИЛЬНЫХ МАШИН

А. Клетьевые крутильные машины

В связи с широким применением сплошных алюминиевых секторных жил сечением до 240 — 300 мм^2 , изготавливаемых для повышения их гибкости частично из прессованного алюминия, количество крутильных машин в цехах силовых кабелей принципиально должно несколько сокращаться. В других кабельных производствах они продолжают применяться по-прежнему в значительных количествах. Принципиально их можно разделить на следующие основные типы: а) клетьевые (фонарные); б) быстроходные (сигары) и в) дисковые (жесткорамные) машины.

Крутильные машины первого типа бывают двух-, трех- и четырехклетьевыми. Соседние клетки вращаются в разные стороны, причем меньшие клетки вращаются быстрее, чем остальные, так как внутренние повивы скручиваются с меньшей длиной шага, чем наружные.

На рис. 4-17 приведена примерная кинематическая схема таких машин, которые еще применяются на наших заводах. Клетти приводятся во вращение с помощью ряда шестерен, из которых одна пара ($z_{к1}$, $z_{к2}$) является сменной, а остальные постоянными. Таким образом,

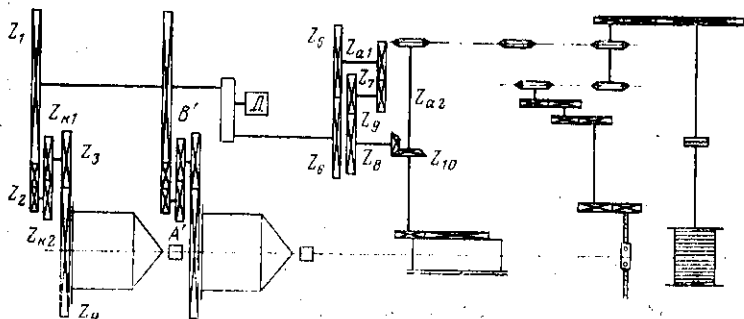


Рис. 4-17. Кинематическая схема клетевой крутильной машины.

между частотой вращения коренного вала n_1 и клетки n_k имеется следующая зависимость:

$$n_k = A z_{k1} / z_{k2},$$

где A — постоянная, в которую входит и n_1 .

Аналогичным образом определяется и частота вращения тягового колеса n_a :

$$n_a = B_0 \frac{z_{a1}}{z_{a2}},$$

где B_0 — постоянная величина;

z_{a1} , z_{a2} — число зубьев сменных шестерен.

Если D — диаметр тягового колеса, то линейная скорость скрученной жилы v может быть примерно определена с помощью следующего уравнения:

$$v = \pi D n_a = \pi D B_0 z_{a1} / z_{a2} = B z_{a1} / z_{a2}.$$

Шаг скрутки

$$h = \frac{v}{n_k} = \frac{B z_{a1} / z_{a2}}{A z_{k1} / z_{k2}} = M \frac{z_{a1} z_{k2}}{z_{a2} z_{k1}}. \quad (4-28)$$

В этом уравнении $M = B/A$ — также постоянная величина.

Уменьшения набора сменных шестерен можно достигнуть применением обеих пар сменных шестерен одинакового модуля, т. е.

$$z_{a1} + z_{a2} = z_{k1} + z_{k2} = z.$$

Если наибольшее передаточное число i и наименьшее $1/i$, шаг скрутки на соответствующей клетки может быть в пределах

$$Mi^2 - M/i^2.$$

Обычно клетьевые крутильные машины имеют первые клетки на 6 катушек, вторые — на 12, третьи — на 18 и т. д. Существуют машины, у которых число катушек достигает 30—36. Такие машины необходимы для скрутки неизолированных многопроволочных проводов, а также жил высоковольтных кабелей больших сечений. Кроме того, такие клетки применяются для наложения проволочной брони.

Клетьевые крутильные машины обычно снабжаются механизмами для открутки, действующими на принципе шарнирного параллелограмма (рис. 4-18). При враще-

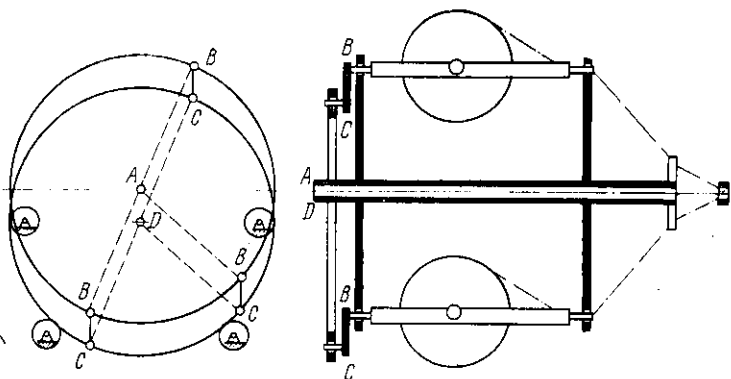


Рис. 4-18. Схема устройства открутки на принципе шарнирного параллелограмма.

нии звеньев AB и CD шатун BC все время движется поступательно. Так же поступательно будут двигаться и люльки с проволокой, если их жестко соединить с шатуном BC . Конструктивно система шарнирных параллелограммов осуществляется с помощью эксцентрических колес, помещаемых за крутильной клетью. С помощью таких откручивающих устройств за каждый оборот открутка производится на угол 360° .

Существует другой способ открутки — с помощью планетарной системы шестерен, который обычно применяется на машинах общей скрутки, а за рубежом, например во Франции, ФРГ и других странах, — и на клетьевых крутильных машинах. Обычно планетарную систему образуют центральное шестеренное колесо z_5 (рис. 4-19) и малое шестеренное колесо z_6 , которое при скрутке с откруткой жестко связано с соответствующей люлькой. Колесо z_5 вращается вместе с клетью, но с несколько большей скоростью. Благодаря этому шестеренное колесо z_6 не только вращается вместе с крутильной частью машины, но и поворачивается вокруг своей оси в сторону, противоположную направлению вращения люлек. Чтобы за один оборот крутильной машины колесо z_6 сделало один

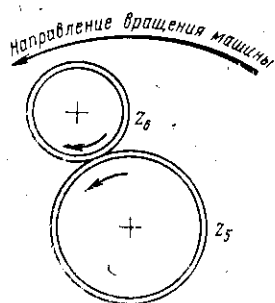


Рис. 4-19. Открутка с помощью планетарной системы шестерен.

оборот вокруг своей оси, необходимо, чтобы имело место следующее соотношение:

$$\omega_5/\omega_{кр} = (z_5 + z_6)/z_5, \quad (4-29)$$

где ω_5 и $\omega_{кр}$ — угловые скорости шестерни z_5 и крутильной части машины;

z_5 и z_6 — числа зубьев на соответствующих шестернях.

Планетарная система допускает частичную открутку, т. е. открутку на 360° за несколько (n) оборотов крутильной части машины. В этом случае должно быть выполнено соотношение

$$\omega_5/\omega_{кр} = (z_5 + z_6/n)/z_5. \quad (4-30)$$

Спроектированные в бывшем ЦПКБ КО клетьевые крутильные машины имеют 3—4 клетки и диаметр фланца катушек с проволокой 200—500 мм. Максимальная частота вращения первой клетки 105—180 об/мин, второй 84—123 об/мин, третьей 65—99 об/мин и т. д.

Интересны клетьевые крутильные машины завода им. Эрнста Тельмана (ГДР) марки МКРД. Эти машины должны изготавливаться с тремя клетями для катушек с диаметром фланца 400 и 500 мм. Эти машины отличаются повышенными рабочими скоростями (максимальная частота вращения клетки на 6 катушек может достигать 200, на 12 катушек — 140 и на 18 катушек — 120 об/мин). На том же заводе предусматривается изготовление клетьевых машин для катушек с фланцем диаметром 630 мм.

Б. Быстроходные крутильные машины

Основной частью быстроходных крутильных машин является ротор сигарообразного типа, внутри которого в шариковых подшипниках находятся люльки с установленными в них катушками с проволокой.

В зависимости от диаметра и числа скручиваемых проволок за рубежом такие машины изготавливаются для отдающих катушек или барабанов с диаметром фланцев от 100 до 1000 мм (масса медной проволоки примерно от 2,5 до 1800 кг).

Наиболее распространенными являются машины с числом катушек 6, 12 и 18. Отдельные конструкции предусматривают установку большего количества отдающих катушек.

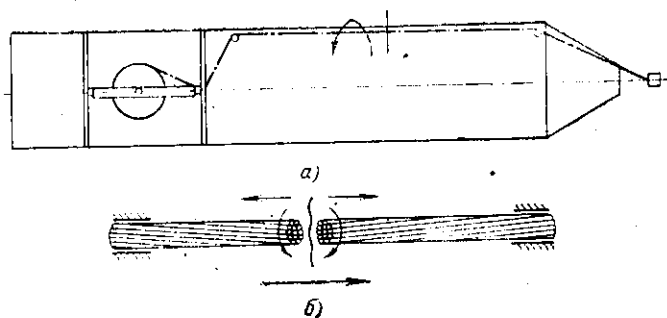


Рис. 4-20. Схема прохождения проволоки на машине сигарного типа.

Люльки устраиваются таким образом, что центр тяжести их находится ниже геометрической оси ротора, что исключает вращение катушек вместе с ротором. На рис. 4-20,а показана схема движения проволоки при скрутке. Если мысленно скручиваемую проволоку в каком-либо произвольном месте разрезать, то при вращении машины на участке от отдающей катушки до этого места проволока будет закручиваться в одном направлении, а на другом участке — в противоположном, и поэтому никакого кручения не будет (рис. 4-20,б).

Роторы преимущественно изготавливаются в виде стальной трубы с окнами для установки катушек. Диаметр роторов обычно значительно меньше диаметра клеток, что и позволяет вращать их с значительно повышенными скоростями. Так, частота вращения ротора у машин, предназначенных для скрутки проволок диаметром до 0,4 мм, может достигать 4000 об/мин (машины японской фирмы «Миясаки»). При скрутке проволок диаметром 2,1—4,0 мм частота вращения машин этой фирмы может быть в пределах 700—400 об/мин. Разработанные в ЦПКБ КО такие машины марки СКС 6-200-Э предназначаются для скрутки семи медных проволок диаметром 0,2—0,8 мм или алюминиевых диаметром 0,2—1,25 мм и могут иметь частоту вращения ротора 200—2000 об/мин. Диаметр фланца катушек у этой машины 200 мм.

Другая машина марки СКС 6-400-Э спроектирована для скрутки семи медных проволок диаметром 1,28—2,97 мм или алюминиевых диаметром 1,65—3,00 мм. Эта машина имеет безосевое приемное устройство с индиви-

дуальным электроприводом, диаметр фланца отдающих катушек 400 мм и частота вращения ротора 550—1150 об/мин.

Длинные стальные роторы имеют значительную массу, что ограничивает их частоту вращения. Кроме того, у них наблюдается ускоренный износ опорных подшипников. Поэтому вместо цельнометаллических роторов применяются цилиндрические элементы, соединяемые с помощью болтов и резиновых прокладок. В этом случае нагрузка на опорные ролики и подшипники распределяется по длине машины равномерно. Для облегчения заправки и применения простой автоматики для остановки машины при обрыве или сходе отдельных проволок иногда предусматривается наружная (вне ротора) проводка проволок.

Особенностью быстроходных крутильных машин венгерского завода ДИГЕП является безопорная конструкция ротора, который состоит из ряда эластично соединенных секций, смонтированных в специальных люнетах, в которые из отверстий, расположенных по окружности вокруг ротора, подается сжатый воздух, образующий «воздушную подушку». Такая конструкция ротора обеспечивает бесшумную работу машины при частоте вращения ротора 1100—3200 об/мин.

В. Жесткорамные крутильные машины

Мягкую медную проволоку, а также алюминиевую проволоку можно скручивать без открутки. В связи с этим все большее применение находят так называемые жесткорамные крутильные машины без откручивающих устройств. Такие машины конструктивно более просты и допускают значительно большие частоты вращения, чем обычные клетьевые машины с откручивающими устройствами.

Особенностью устройства этих машин современных конструкций является расположение катушек возможно ближе к оси вращения машины, что позволяет увеличить массу проволоки на катушках. В связи с этим, а также в связи с увеличением диаметра фланца катушек возрастает длина этих машин.

На наших кабельных заводах начинают эксплуатироваться жесткорамные крутильные машины марки МКД, изготавливаемые заводом им. Эрнста Тельмана (ГДР).

Эти машины могут иметь клетки на 6, 12, 18, 24, 30 и 36 катушек, диаметр фланца которых равен 500 мм. Частота вращения меньшей клетки (на 6 катушек) может быть в пределах 320—350 об/мин, т. е. она почти в 2 раза больше, чем у машин с откручивающими устройствами.

Для облегчения установки катушек с проволокой и приемных барабанов в машине предусматриваются специальные устройства и прочие приспособления для механизации различных операций во время работы машины.

В ЦПКБ КО разработаны конструкции таких машин для скрутки секторных жил сечением 25—120 мм² (марка КД 2-500-Э) и для сечений 120—400 мм² (марка КД 3-500-Э). В первой машине предусмотрены крутильные устройства на 6, 12 и 18 катушек и во второй — на 6, 12, 18 и 24 катушки с диаметром фланца 500 мм. Различные крутильные клетки могут вращаться с частотой 72—202 об/мин. В связи с большой массой проволоки на катушках и повышенной частотой вращения последних многие фирмы (например, фирма «Крупп», ФРГ, «Кортиновис», Италия) заключают вращающиеся клетки в металлические кожуха, что повышает безопасность работы на этих машинах в указанных условиях. Итальянская фирма «Технион» предлагает жесткорамные крутильные машины, в которых отдающие барабаны с проволокой имеют диаметр фланца 600—700 мм и помещаются под углом 120° (три по окружности) внутри массивного стального цилиндра, который вращается вместе с отдающими барабанами с проволокой с частотой до 350 об/мин. Достоинством этой машины является дополнительное магазинное устройство, с помощью которого барабаны с проволокой автоматически устанавливаются на крутильном устройстве.

4-9. АВТОМАТИЗАЦИЯ И МЕХАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СКРУТКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ

На некоторых пока эксплуатируемых крутильных машинах катушки с проволокой устанавливаются в люльках на съемных осях. Смена катушек в этом случае требует значительного времени, так как она связана с необходимостью вынимать и повторно устанавливать ось в новой катушке. В современных конструкциях крутильных машин предусматривается установка катушек

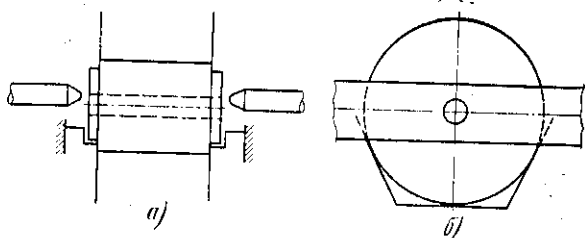


Рис. 4-21. Схема механизированной установки катушек с проволокой.

на двух выдвижных цилиндрических опорах (пинолях). Катушки с проволокой устанавливаются на особых стойках (рис. 4-21, а) или в коробах (рис. 4-21, б), а надвигающиеся пиноли с коническими концами несколько поднимают катушку и закрепляют ее в установленном месте.

Пиноли широко применяются в приемных устройствах вместо осевых приемников, что значительно упрощает смену приемных барабанов. На рис. 4-22 показана механизированная установка катушек с проволокой на крутильной машине. С помощью небольших подъемников с гидравлическим приводом катушка с проволокой поступает в направляющий желоб и устанавливается на крутильном устройстве. Закрепление катушек производится автоматически с помощью пинолей или специального упора.

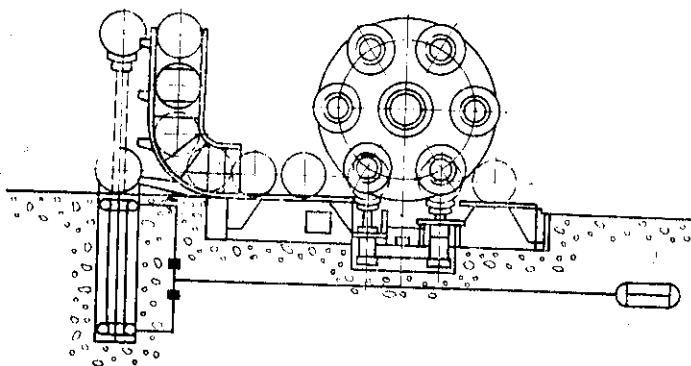


Рис. 4-22. Схема механизированной установки катушек с проволокой на крутильной машине конструкции завода имени Эрнста Тельмана.

Большое значение имеет автоматическая остановка быстроходных крутильных машин в случае обрыва или схода проволоки с катушки. На рис. 4-23 дана схема автомата, разработанного в ЦПКБ КО, в котором датчиками являются изогнутые медные шины 2, расположенные внутри ротора 1 у каждой катушки. Напряжение к шинам подводится при помощи щеток 5 через контактное кольцо 6. В случае обрыва или схода проволоки конец ее под действием центробежной силы отбрасывается и соприкасается с шиной, замыкая электрическую цепь для остановки машины.

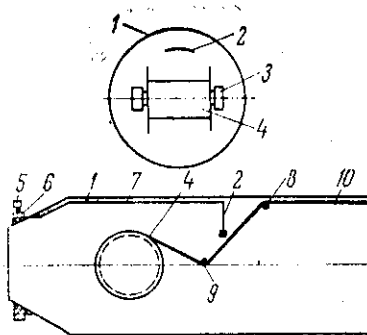


Рис. 4-23. Схема автомата для остановки быстроходной сигарообразной крутильной машины.

1 — ротор сигары; 2 — контактная медная шина; 3 — люлька; 4 — отдающая катушка; 5 — щетки; 6 — контактное кольцо; 7 — подвод напряжения от кольца к шине; 8 — направляющий ролик; 9 — полая цапфа люльки; 10 — проволока.

Тот же принцип можно использовать, устанавливая автоматическое устройство перед калибром, в котором происходит скрутка проволок (рис. 4-24, а). Здесь конец оборвавшейся проволоки 1 прижимается к контактному кольцу и замыкает цепь питания реле РП, останавливающего машину.

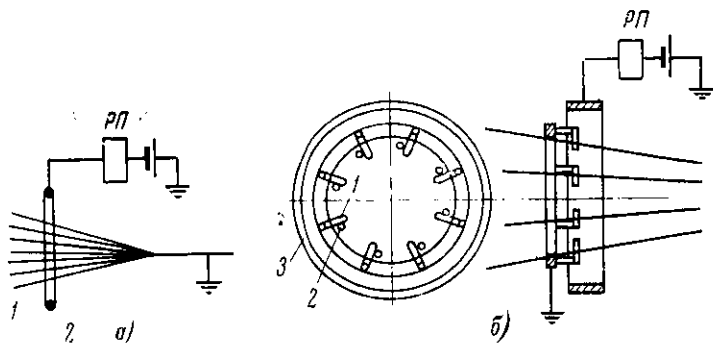


Рис. 4-24. Схемы автомата для остановки крутильной машины при обрыве или сходе проволоки.

а — с контактными кольцами; б — с контактными флажками.

Если скручиваются изолированные жилы, применяются автоматы с контактным флажком (рис. 4-24,б). В рабочем состоянии флажок 1 удерживается скручиваемой проволокой 2 в определенном положении, а при обрыве проволоки он отбрасывается центробежной силой и касается контактного кольца 3, обеспечивая останов машины.

Глава пятая

ТЕОРИЯ И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОЛИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

5.1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗОЛИРОВАНИЯ

БУМАЖНЫМИ ЛЕНТАМИ КАБЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 1—35 кВ

Бумажную изоляцию на токопроводящие жилы или скрученный кабель накладывают в виде обмотки лентами. Различают три разных метода обмотки: встык, с перекрытием и с зазором. Основным методом является обмотка с зазором 1—2 мм, так как при обмотке встык при изгибах витки, расположенные на внутренней стороне, стремятся выпучиваться, а на наружной стороне расходиться.

На рис. 5-1 приведена развертка одного витка ленты, наложенной с перекрытием. Пусть d — диаметр жилы, на которую накладывается данный слой изоляции; h — шаг обмотки; b — ширина ленты; e — размер перекрытия по оси изолируемой жилы; α — угол обмотки.

Из подобия треугольника ABC и ADE следует (наложение бумажной ленты с перекрытием):

$$b/(h + e) = \pi d / \sqrt{h^2 + \pi^2 d^2}. \quad (5-1)$$

Для обмотки с зазором (5-1) имеет вид:

$$b/(h - e) = \pi d / \sqrt{h^2 + \pi^2 d^2}. \quad (5-2)$$

В (5-1) и (5-2) не учитывается толщина ленты Δ , при учете последней имеем:

$$b/(h \pm e) = \pi (d + \Delta) / \sqrt{h^2 + \pi^2 (d + \Delta)^2}.$$

Так как $\Delta \ll d$, этой поправкой можно пренебречь. Из уравнений (5-1) и (5-2) следует:

$$b = \pi d (h \pm e) / \sqrt{h^2 + \pi^2 d^2}. \quad (5-3)$$

Если длину перекрытия e выразим в долях шага h ($e = kh$), то имеем:

$$b = \pi d h (1 \pm k) / \sqrt{h^2 + \pi^2 d^2}. \quad (5-4)$$

Из треугольника ADE имеем: $\cos \alpha = b / (h \pm e)$, следовательно,

$$b = (h \pm e) \cos \alpha = h (1 \pm k) \cos \alpha. \quad (5-5)$$

Из рис. 5-1 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha = h / \pi d \text{ или } h = \pi d \operatorname{tg} \alpha. \quad (5-6)$$

Из (5-5) и (5-6) получаем:

$$b = \pi d (1 \pm k) \sin \alpha. \quad (5-7)$$

Таким образом, ширина бумажной ленты увеличивается с ростом диаметра d и угла наложения бумажных лент α .

Уравнение (5-4) можно переписать следующим образом:

$$\frac{b}{1 \pm k} = \frac{\pi d h}{\sqrt{h^2 + \pi^2 d^2}}, \text{ или } \frac{1 \pm k}{b} = \sqrt{\frac{1}{\pi^2 d^2} + \frac{1}{h^2}}. \quad (5-8)$$

Если обозначить $1/\pi d = x$ и $1/h = y$, то (5-8) станет уравнением окружности:

$$[(1 \pm k)/b]^2 = x^2 + y^2. \quad (5-9)$$

На основании (5-9) в масштабе можно построить зависимость шага обмотки от диаметра намотки и угла наложения бумажных лент (рис. 5-2, а). Кривые на рис. 5-2 есть части окружностей, радиусы которых соответствуют:

$$(1 \pm k)/b = 1/b'.$$

Чем меньше b' , тем больше радиус. Для простоты отсчета на рис. 5-2 по оси абсцисс отложены значения d (а не πd).

Угол наложения бумажной изоляции α связан с h и d уравнением (5-6). С помощью (5-6) на диаграмме рис. 5-2 построены прямые линии для различных углов α .

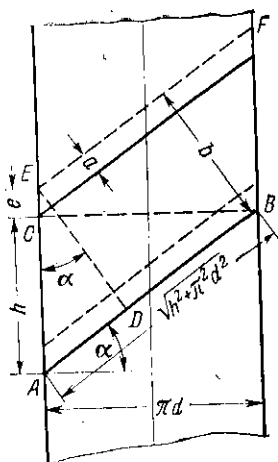


Рис. 5-1. Развертка на плоскость одного витка ленты, наложенной с перекрытием.

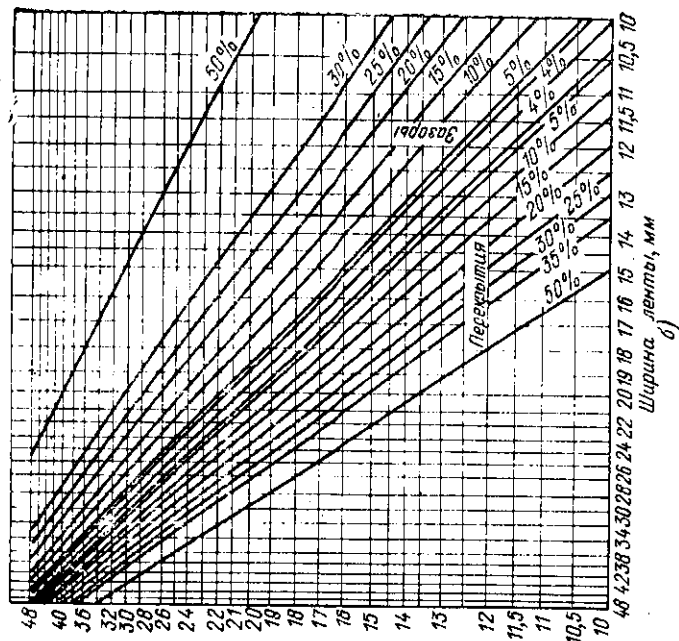
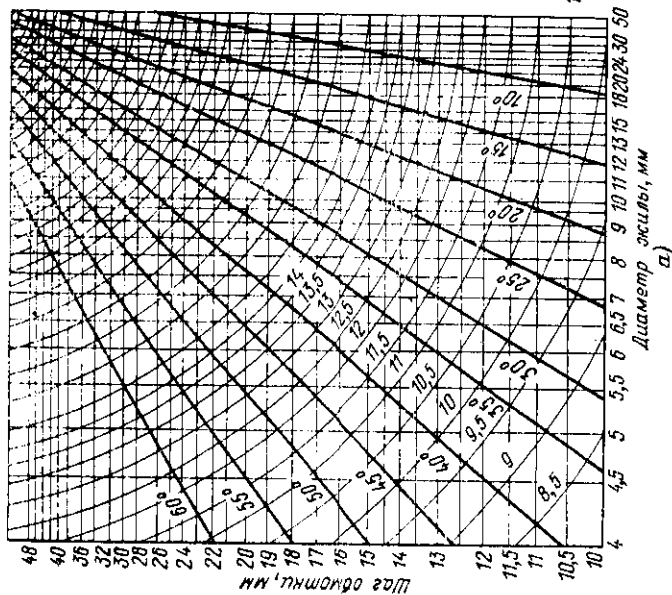


Рис. 5-2. Зависимость ширины бумажной ленты от диаметра жилы.

Из приведенного выше соотношения следует:

$$b = b'(1 \pm k).$$

На основании последнего уравнения на рис. 5-2, б дана зависимость b от b' при различных условиях наложения бумажной изоляции.

Ниже даны примеры определения ширины бумажной ленты для жил (кабелей) диаметром 10 и 12 мм.

Пример 5-1. Задано: $d=10$ мм; $\alpha=25^\circ$; $k=10\%$. Определить ширину ленты b .

В левой части диаграммы находим: $h=14,7$ мм и $b'=13,3$ мм. Зная b' и k , в правой части диаграммы получаем:

$$b=11,8 \approx 12 \text{ мм.}$$

Пример 5-2. Задано: $d=12$ мм; $\alpha=25^\circ$; $k=10\%$. Определить ширину ленты b .

В левой части диаграммы находим: $h=17,5$ мм и $b'=16$ мм. Из правой части диаграммы получаем:

$$b=14 \text{ мм.}$$

Приведенная на рис. 5-2 диаграмма с известным приближением может быть применена и для секторных жил. В этом случае вместо d необходимо взять частное от деления периметра сектора на π .

При изолировании секторных жил давление бумажных лент по периметру будет вначале неравномерным. В этом можно убедиться следующим образом.

Рассмотрим элементарную площадку на бумажной ленте (рис. 5-3). Здесь ρ — радиус кривизны этой площадки; пусть ΔP — давление ленты этой площадки на жилу или на нижележащий бумажный слой (P — давление на единицу поверхности жилы или бумажного слоя); ΔN — растягивающее усилие на каждой грани Δt_1 ; $\Delta \alpha$ — угол, соответствующий элементарной площадке.

Таким образом, мы имеем:

$$\Delta P = P \Delta t_1 \Delta t_2 \text{ и } \Delta N = \Delta t_1 \sigma,$$

где σ — натяжение на единицу длины бумажной ленты по грани Δt_1 .

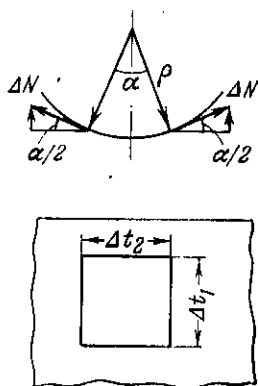


Рис. 5-3. Усилия, действующие на элементарную площадку бумажной ленты.

Запишем уравнение равновесия элементарной площадки:

$$2\Delta N \sin \frac{\Delta\alpha}{2} - \Delta P = 0.$$

Так как угол $\Delta\alpha$ очень мал, то $\sin \frac{\Delta\alpha}{2} \approx \frac{\Delta\alpha}{2}$ и, следовательно, $\Delta N \Delta\alpha - \Delta P = 0$, или $\Delta P = \Delta N \Delta\alpha$, откуда $\Delta t_1 \sigma \Delta\alpha = P \Delta t_1 \Delta t_2$.

Разделив обе части уравнения на $\Delta t_1 / \Delta t_2$, и при условии $\Delta\alpha = \Delta t_2 / \rho$, получим:

$$P = \sigma / \rho = \text{const} / \rho. \quad (5-10)$$

Таким образом, давление будет тем больше, чем меньше ρ . Следовательно, в момент наложения изоляции на секторную жилу наибольшее давление будет на ребрах жилы. Через некоторое время после наложения изоляции неравномерность давления значительно уменьшится, однако, несомненно, что малые радиусы закруглений на ребрах секторных жил будут обуславливать неравномерную плотность наложенной бумажной изоляции.

При изолировании круглых или секторных жил кабелей 1—10 кВ ширина бумажной ленты колеблется в зависимости от диаметра намотки в пределах 6—28 мм, угол наложения лент α — до 35°. Для кабелей 20—35 кВ угол α обычно принимают в пределах 15—20°, и в связи с этим ширина бумажных лент колеблется от 12 до 22 мм.

Для поясной изоляции применяют более широкие бумажные ленты, так как скрученные кабели имеют значительно больший диаметр и не подвергаются таким изгибам, какие могут быть на приемных устройствах при изолировании отдельных жил.

При наложении жилой и поясной изоляции необходимо следить за тем, чтобы не совпадали зазоры, т. е. чтобы одна или несколько кромок лент на протяжении не менее одного витка не были расположены так, чтобы расстояние между кромками соседних слоев достигало не более 1 мм. Такие совпадения ухудшают электроизоляционные свойства бумажной изоляции, в частности снижают ее электрическую прочность. Поэтому ГОСТ 18410-73 для кабелей на 6—35 кВ ограничивает количество таких совпадений.

5.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СКРУТКИ МНОГОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

Скрутка изолированных жил производится со значительно большим шагом, чем скрутка отдельных проволок в жилу. В связи с этим влияние скрутки на увеличение диаметра кабеля совершенно незначительно и им можно пренебречь. Скрутка кабелей на всех наших заводах производится в одном (левом) направлении, так как иначе при монтаже кабелей могут иметь место вывертывание муфт и некоторое раскручивание кабеля. Кабели с круглыми жилами скручиваются с откруткой; кабели с секторными жилами с откруткой скручивать нельзя, так как в этом случае сектор будет переворачиваться и кабелю нельзя будет придать круглую форму.

Возможны два способа скрутки изолированных секторных жил в кабель: вzakрутку и враскрутку. При скрутке вzakрутку направление скрутки изолированных жил совпадает с направлением скрутки наружного повива токопроводящей жилы; при скрутке враскрутку эти направления противоположны.

И в том и в другом случае изменяется длина проволок соответствующих повивов, приходящаяся на определенную длину кабеля, а также длина кривой U , проведенной по центрам проволок наружного повива. Элементарным расчетом нетрудно установить, что при скрутке вzakрутку изменение длины кривой линии U равно:

$$\Delta U = U/(a+1) \text{ или } \Delta U/U = 100/(a+1) \%. \quad (5-11)$$

Для скрутки враскрутку соответственно

$$\Delta U = U/(a-1) \text{ или } \Delta U/U = 100/(a-1) \%. \quad (5-12)$$

В этих уравнениях a — число шагов скрутки верхнего повива проволок в жиле, приходящихся на один шаг скрутки кабеля. Из (5-11) и (5-12) видно, что ΔU при скрутке вzakрутку несколько меньше, чем при другом способе скрутки кабеля. Очевидно также, что с увеличением a величина ΔU уменьшается и, наоборот, изменение длины проволок увеличивается.

На практике при скрутке секторных жил в кабель происходят изменения длины отдельных проволок и периметра жилы и, если эти изменения получаются значительными (при больших сечениях секторных токопроводящих жил), это существенно отражается на состоянии бумажной изоляции.

В повивах кабельной бумаги описанные явления будут более ослабленными, так как шаг обмотки невелик, и поэтому смещения бумажных лент будут незначительными, что нетрудно показать следующим образом.

Пусть ширина бумажной ленты равна b и угол обмотки α (рис. 5-4). Вдоль жилы каждая бумажная лента будет иметь длину

$$b_1 = b / \cos \alpha.$$

При скрутке кабеля каждая жила на длине шага скрутки L повернется на угол 360° . Угол элемента секторной жилы γ на длине b_1

$$\gamma = 360b_1/L.$$

Смещение бумажной ленты s будет зависеть от радиуса кручения r и угла γ (рис. 5-4), т. е.

$$s = r \operatorname{tg} \gamma = r \operatorname{tg} \left(\frac{360b_1}{L} \right) = r \operatorname{tg} \left(\frac{360b}{L \cos \alpha} \right). \quad (5-13)$$

Таким образом, деформация бумажных лент будет тем меньше, чем больше шаг скрутки кабеля L и чем меньше r , b и α . В кабелях с поясной изоляцией значение s обычно не превышает 0,4—0,5 мм.

При скрутке секторных кабелей с большим сечением токопроводящих жил (начиная с 95—120 мм²) в жильной изоляции образуются вмятины и морщины. Образование их происходит преимущественно в средних слоях бумажной изоляции, так как ленты наружных витков сжаты с малым усилием и могут более или менее свободно перемещаться. Внутренние витки сильно

сжаты вышележащими слоями и, кроме того, у них радиус кручения r меньше, чем у средних и наружных витков.

Экспериментами установлено, что для некоторого уменьшения вмятин и морщин целесообразно скрутку изолированных жил в кабель производить внакрутку, внутреннюю половину жильной изоляции накладывать

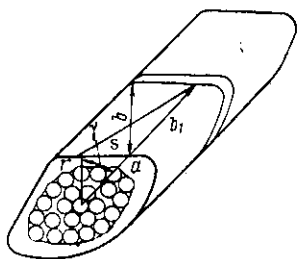


Рис. 5-4. Смещение бумажных лент при общей скрутке.

также внакрутку и наружную — враскрутку. В этом случае внутренние слои будут сильно сжаты, что в некоторой степени будет препятствовать сдвигу бумажных лент и образованию морщин, а в наружных слоях плотность изоляции несколько уменьшится, что будет облегчать перемещение бумажных лент без образования морщин и вмятин.

Более надежным средством устранения этих дефектов является наложение бумажной изоляции на предварительно подкрученную токопроводящую жилу, причем шаг подкрутки должен быть точно равен шагу скрутки изолированных жил в кабель. В этом случае скрутка производится с откруткой, поэтому никакой деформации бумажной изоляции не происходит. Предварительная подкрутка токопроводящих жил обычно осуществляется на крутильно-изолирующих машинах, причем подкручивающее устройство обычно объединяется в один узел вместе с уплотняющими вальцами.

Некоторого уменьшения количества морщин и вмятин можно достигнуть подсушкой изолированных жил непосредственно перед скруткой их в кабель. При подсушке временно несколько уменьшаются толщина бумажных лент и коэффициент трения между ними и, кроме того, повышается жесткость бумажных лент и сопротивляемость их образованию вмятин и морщин.

5.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОЛИРОВАНИЯ ЖИЛ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А. Выбор угла наложения бумажных лент

При изолировании жил кабелей 110—500 кВ толщина изоляции достигает 25—30 мм, а диаметр изолированной жилы 80—100 мм. Из приведенного выше анализа следует, что давление бумажных лент (а следовательно, и трение между ними) значительно уменьшается с увеличением диаметра, и поэтому облегчается возможность некоторого смещения витков вдоль изолированной жилы. Исследованиями установлено, что при углах изолирования, меньших $6-7^\circ$, в этом случае нельзя добиться устойчивого положения бумажных лент, поэтому зазоры между лентами могут достигать ± 5 мм, что совершенно недопустимо. Повышенная стабильность положения бумажных лент при больших углах α объясняется тем, что в этом случае увеличивается сопротивляемость лент

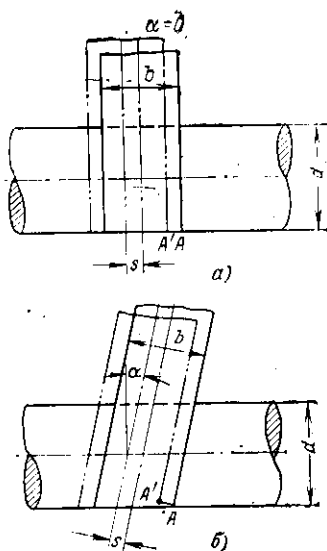


Рис. 5-5. Влияние угла изолирования на устойчивость положения ленты.

n — частота вращения обмотчика, об/мин.

Если все обмотчики будут иметь одинаковую частоту вращения n , т. е. все ленты будут накладываться с одним и тем же шагом h , угол α с увеличением d будет уменьшаться и при изолировании кабелей на 220—500 кВ может снизиться с 12—17° (у жилы) до 4—6° (у наружных слоев). Поэтому головки изолировочных машин в этом случае должны вращаться с различными скоростями (в пределах от $n_{\text{макс}}$ до $n_{\text{макс}}/3$).

Б. Кондиционирование окружающего воздуха при наложении изоляции

Электроизоляционные свойства кабелей высокого напряжения зависят от плотности наложенной изоляции. Повышение плотности обмотки может быть достигнуто при пониженной влажности окружающего воздуха во время обмотки. Известно, что при сушке бумажных лент временно уменьшаются толщина и длина лент вследствие их усадки. Уменьшение толщины бумажных лент, естественно, снижает плотность изоляции и позволяет

смещению вдоль оси кабеля, в чем нетрудно убедиться из рассмотрения рис. 5-5,б. При малых углах α бумажная лента может перемещаться без заметных деформаций (рис. 5-5,а); при значительных углах α бумажная лента при перемещении должна вминаться в кабель (см. перемещение точки A). Поэтому при изолировании кабелей высокого напряжения и диаметре намотки 30—100 мм рекомендуется применение бумажных лент шириной 16—36 мм и $\alpha = 7 \div 15^\circ$.

Угол α определяется шагом изолирования и диаметром намотки: $\text{tg } \alpha = h/\pi d$, шаг изолирования $h = v/n$, где v — скорость движения изолируемого кабеля, м/мин;

дополнительно наложить некоторое количество лент. Уменьшение длины бумажных лент должно повышать плотность изоляции, но оно очень невелико и мало сказывается на изменении плотности изоляции. Так, если бумажная изоляция накладывалась при относительной влажности воздуха 70%, то после вакуумной сушки толщина бумажных лент уменьшится примерно на 10%, а длина лент всего на 0,4%, т. е. уменьшение плотности изоляции в этом случае будет равно примерно $p = 10 - 0,4 = 9,6\%$.

На практике, если изолирование производить при относительной влажности воздуха 30% вместо 70%; снижение плотности бумажной изоляции в этом случае будет составлять примерно 5,1%, в результате чего, например, при изолировании кабелей на 220 кВ можно, не изменяя толщины изоляции, увеличить число бумажных лент от 153 до 161.

Осушить воздух можно с помощью компрессоров (пропустив сжатый воздух через холодильник). В этом случае можно получить воздух с относительной влажностью около 12% и добавлять его в нужном количестве в помещение изолировочных машин.

В. Деформации изоляции кабелей высокого напряжения при изгибах

При изгибе кабелей высокого напряжения в зоне, подвергающейся растяжению, образуются местные неплотности вследствие расхождения бумажных лент, а в зоне, подвергающейся сжатию — морщины. Поэтому при укладке в корзину кабель изгибается не точно по окружности, а образует как бы некоторый многоугольник вследствие небольших изломов (рис. 5-6). Эти небольшие изломы образуются тогда, когда в каком-либо сечении изоляции имеется несколько больше зазоров, чем в соседних участках. В местах излома радиус изгиба уменьшается и увеличиваются усилия, которые стремят-

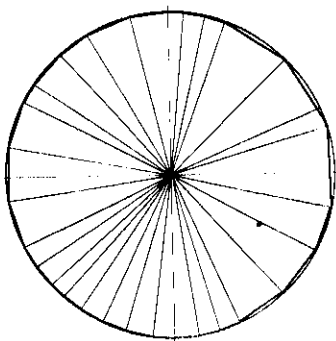


Рис. 5-6. Изломы изоляции кабеля высокого напряжения при укладке в корзину.

ся сдвинуть витки в сторону. Сдвинуты будут те участки наружных лент, которые близки к местам излома, причем сдвиг будет происходить в ту сторону, где находится большая часть ленты. Такие сдвиги могут быть у нескольких лент, что вызывает увеличение зазоров и образование местных неплотностей изоляции.

Морщины образуются в зоне изоляции, подвергаемой сжатию, когда кабель изгибается по радиусу, меньшему некоторого предельного (критического) значения. Стойкость бумажной изоляции против образования морщин будет тем большей, чем плотнее наложена изоляция и чем равномернее натяжение бумажных лент. Бумаги большей толщины более устойчивы против образования морщин, чем ленты из тонкой бумаги. Критический радиус увеличивается с ростом диаметра изолированного кабеля.

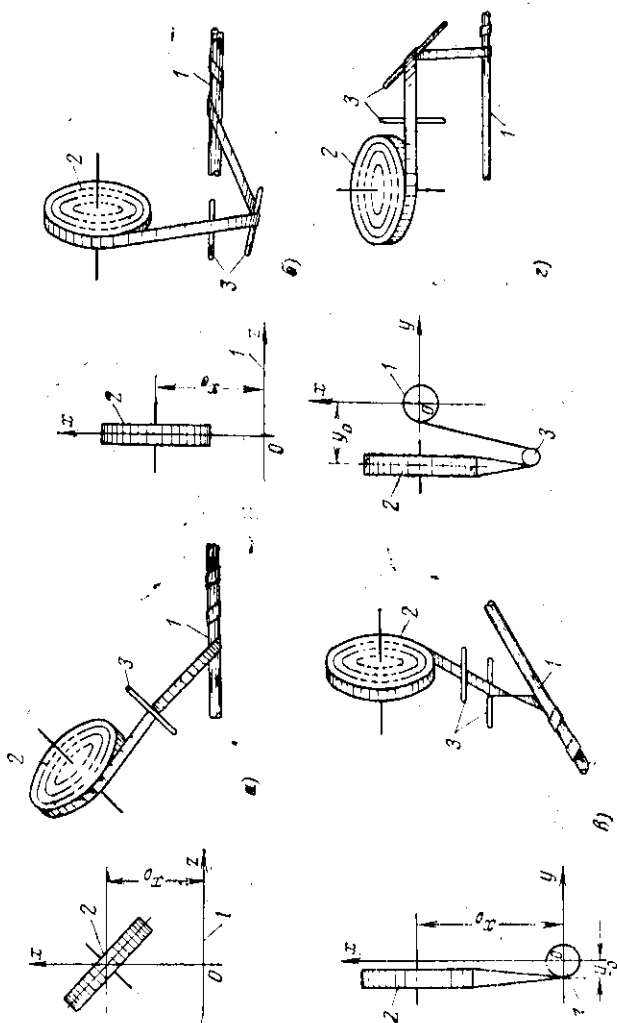
5.4. КОНСТРУКЦИИ БУМАГООБМОТЧИКОВ ИЗОЛИРОВОЧНЫХ МАШИН

Обмотчики являются важнейшей частью изолировочных машин, так как устройство их существенно влияет на качество наложения бумажной (ленточной) изоляции. Существует несколько типов обмотчиков, которые прежде всего различаются по расположению ролика с лентой относительно оси изолируемой жилы, а также расстоянием оси обмотчика от оси изолируемой жилы. Если ось ролика совпадает с осью жилы, обмотчик называется центровым (центральный). Такие обмотчики могут применяться при изолировании жил силовых кабелей малых сечений. Основным преимуществом их является кинематическая уравновешенность, благодаря чему эти обмотчики могут работать при больших частотах вращения (до 800—1000 об/мин и более). Однако эти обмотчики требуют наличия запасных роликов, так как иначе неизбежно разрезание жилы каждый раз после размотки ролика.

Остальные (эксцентричные) обмотчики можно разделить на четыре основные группы: простые (наклонные), плоские, тангенциальные и полутангенциальные. Все они схематически показаны на рис. 5-7. В простом обмотчике плоскость ролика расположена под некоторым углом к оси изолируемой жилы (рис. 5-7,а). Если лента с роликов у этих обмотчиков поступает сразу на изолируемую жилу, то с размоткой ролика и уменьшением его

Рис. 5-7. Принци-
пиальные схемы
устройства эксцен-
тричных обмотчи-
ков.

а — простой обмот-
чик; б — плоский;
в — тангенциальный;
г — полутангенциаль-
ный; 1 — обмоты-
ваемая жила; 2 —
полюс с лентой; 3 —
направляющие паль-
цы.



диаметра положение ленты на изолируемой жиле будет изменяться, что может приводить к совпадениям зазоров. Поэтому у обмотчиков такого типа обычно устраиваются направляющие пальцы (рис. 5-7,а), при наличии которых изменение диаметра ролика не отражается существенно на положении ленты в повиве.

В плоском обмотчике (рис. 5-7,б) ось ролика с лентой параллельна оси изолируемой жилы, отсюда эти обмотчики и получили свое наименование. Нужное направление ленты здесь обеспечивается также с помощью направляющих пальцев. Обычно такие обмотчики изготавливаются для двух бумажных роликов, располагаемых на одной оси. Эти обмотчики обладают достаточно хорошими эксплуатационными свойствами, могут вращаться с частотой 330—350 об/мин и в сравнении с другими обмотчиками занимают значительно меньше места по длине изолировочной машины. Такие обмотчики можно применять для обмотки токопроводящих жил кабелей средних и крупных сечений напряжением 1—10 кВ. Принципиальная схема тангенциального обмотчика приведена на рис. 5-7,в. У этих обмотчиков средняя линия сходящей с бумажного ролика ленты является касательной к поверхности изолируемого кабеля. Такое положение ленты способствует равномерному натяжению обеих ее кромок при повороте ее на угол 90° (рис. 5-7,в).

Полутангенциальный обмотчик отличается от тангенциального тем, что средняя плоскость ролика не является касательной к поверхности изолируемой жилы, что позволяет более компактно расположить ролик с лентой и работать при повышенных оборотах обмотчиков (в новых конструкциях до 500 об/мин и более).

При изолировании бумажные ленты должны накладываться на жилу с возможно большим и равномерным натяжением по длине и ширине ленты. Для создания необходимого натяжения лент в старых конструкциях обмотчиков обычно применяются пластинчатые тормоза, которые располагаются по обеим сторонам ролика. Торможение осуществляется за счет трения боковых поверхностей ролика и тормозных пластин.

Пусть M_1 — момент, создаваемый тормозным устройством с одной стороны бумажного ролика; P — давление тормозного устройства; $r_{\text{вн}}$ — радиус внутреннего отверстия бумажного ролика; R_p и $r_{\text{пл}}$ — наружные диаметры бумажного ролика и тормозных пластин; μ — коэффи-

циент трения между тормозной пластиной и роликом. При трении между бумажным роликом и тормозными пластинами (пренебрегая трением в оси ролика) и при условии, что $R_p > r_{пл}$,

$$M_1 = \mu P (r_{пл} + r_{вн}) / 2.$$

Полный момент, создаваемый тормозным устройством с двух сторон,

$$M = \mu P (r_{пл} + r_{вн}). \quad (5-14)$$

Натяжение ленты

$$F = M / R_p.$$

Таким образом, при одном и том же тормозном моменте при $R_p > r_{пл}$ натяжение ленты с уменьшением ролика будет увеличиваться до тех пор, пока R_p не станет равным $r_{пл}$. Когда $R_p < r_{пл}$, уравнение (5-14) примет вид:

$$M = \mu P (R_p + r_{вн}) = \mu P R_p + a, \quad (5-15)$$

где $a = \mu P r_{вн}$. В этом случае с уменьшением R_p первый член уравнения (5-15) будет уменьшаться и если $r_{вн}$ взять малым, заметного увеличения натяжения ленты при размотке ролика не будет, пока R_p не станет очень малым.

В современных конструкциях обмотчиков, в особенности для изолирования кабелей повышенных и высоких напряжений, применяются для поддержания постоянного натяжения бумажных лент автоматические пружинные устройства. На рис. 5-8 приведена схема автомата для регулирования натяжения бумажных лент, которая применяется на изолировочных машинах французской фирмы «Пуртье». Бумажная лента проходит через два свободно вращающихся ролика 1, расположенных на планке 2. Натяжение бумажной ленты создается с помощью пружины (рис. 5-8), причем при увеличении натяжения бумажной ленты планка 2 поворачивается против часовой стрелки, воздействует на рычаг 3, сектор 4 и тормозную ленту 5, ослабляя таким образом торможение бумажного ролика. Предварительная настройка автомата производится с помощью винта 6. Для остановки машины при обрыве бумажной ленты на оси 7 имеется свободно вращающийся флажок 8 с пальцем 9. В рабочем состоянии флажок 5 находится в положении, показанном на рис. 5-8. В случае обрыва бумажной ленты флажок

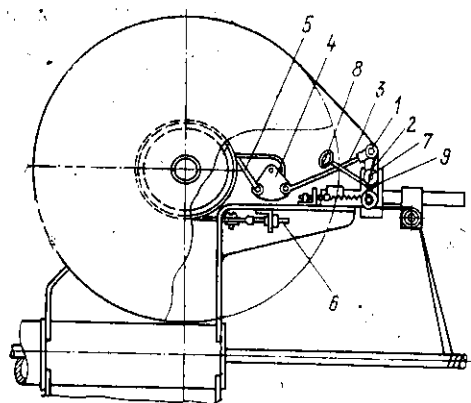


Рис. 5-8. Автомат для регулирования натяжения и контроля обрыва бумажных лент.

изменяет свое положение и замыкает контакт реле, останавливающего машину.

Завод имени Эрнста Тельмана разработал автомат, который с помощью скользящего по бумажному ролику конца кронштейна регулирует натяжение ленты только при уменьшении диаметра бумажного ролика.

В более поздних конструкциях применен принцип, аналогичный описанному выше. В последнее время на кабельных заводах начинают внедряться обмотчики и на восьми бумажных роликах с пружинными тормозными устройствами, разработанные в ВНИИ КП и ЦПКБ КО.

5-5. ИЗОЛИРОВОЧНЫЕ МАШИНЫ

Изолировочные машины можно разделить на машины фонарного типа и головочные. Для изолирования токопроводящих жил малых сечений ($2,5—10 \text{ мм}^2$), а также при изготовлении контрольных кабелей, обмоточных проводов с бумажной изоляцией и т. п. применяются машины вертикального типа. В современных конструкциях этих машин предусматривается применение центровых обмотчиков, которые при изолировании жил малых сечений (обмотка жил кабелей связи телефонной бумагой) и при хорошей балансировке обмотчиков могут работать при скоростях до 2800—3200 об/мин.

Для изолирования токопроводящих жил силовых кабелей средних и крупных сечений применяются изолировочные машины горизонтального типа. Фонарные машины относятся к старым конструкциям. Каждый фонарь

состоит обычно из двух массивных металлических дисков, скрепленных круглыми стальными штангами, на которых крепятся простые или полутангенциальные обмотчики (от 8 до 18 на каждом фонаре). Эти машины работают с частотой вращения фонарей в пределах 250—350 об/мин.

Фонарные машины обычно соединяются с крутильными устройствами, что позволяет одновременно производить два процесса: скрутку и изолирование.

Новые изолировочные машины изготавливаются только головочного типа. У этих машин прежних конструкций восемь тангенциальных или полутангенциальных обмотчиков располагаются в головках открытого типа, вращающихся в разные стороны от коренного вала с помощью шестеренных передач. Современные головочные машины имеют головки закрытого типа, т. е. после заправки всех лент обмотчики закрываются цилиндрической или другой формы защитной металлической или пластмассовой оболочкой (рис. 5-9), что предохраняет

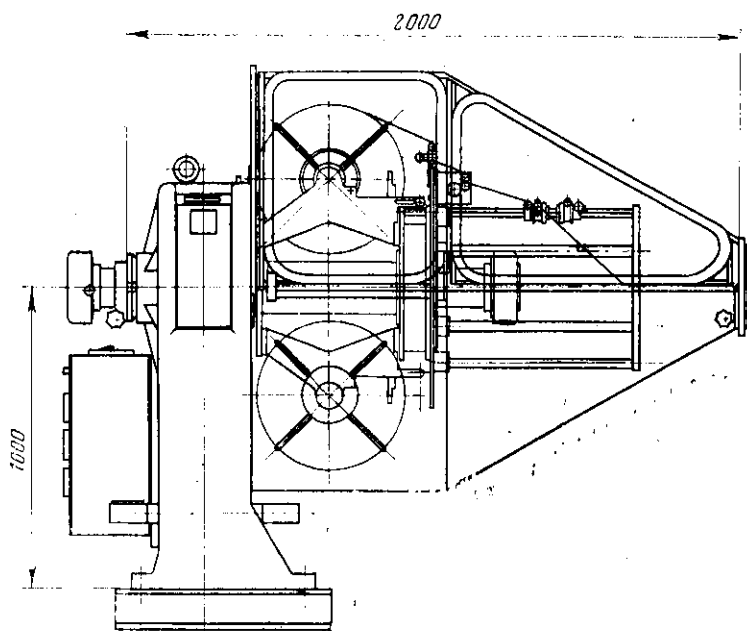


Рис. 5-9. Изолировочная головка в защитном пластмассовом корпусе.

обслуживающий персонал от травм и способствует значительному повышению частоты вращения обмотчиков. В качестве примера укажем на изолировочную машину отечественного производства марки ИЖ-32-Э, которая имеет четыре закрытые головки на восемь роликов каждая и предназначена для изолирования токопроводящих жил сечением 25—240 мм². Обмотчики этих машин допускают установку бумажных роликов диаметром 500 мм, причем равномерность натяжения бумажных лент поддерживается с помощью описанных выше пружинных автоматов. Шаг наложения бумажных лент может быть в пределах 12—60 мм при линейной скорости изолируемой жилы в пределах 10—30 м/мин.

Конструктивно близкими к этой машине являются эксплуатируемые на наших кабельных заводах изолировочные машины завода имени Эрнста Тельмана. Эти машины имеют головки на четыре—восемь обмотчиков закрытого типа. В обмотчиках предусматривается наличие двух пружин: одна для регулирования натяжения бумажных лент и вторая для настройки обмотчика на нужное натяжение лент. Диаметр бумажных роликов у этих машин также может быть до 500 мм и частота вращения до 500 об/мин.

В изолировочных машинах последних конструкций вместо тяговых шайб применяются гусеничные тяговые устройства с усилием тяжения порядка 5000 Н.

5-6. МАШИНЫ ДЛЯ СКРУТКИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ЖИЛ

Для скрутки изолированных жил в кабель и наложения поясной изоляции в основном применяются дисковые машины. Крутильная часть состоит из массивного вала, на котором укреплены большой (диаметр в зависимости от типа машины 2,5—4,0 м) и малый диски, опирающиеся на массивные вращающиеся ролики, расположенные в нижней части машины.

Между дисками помещаются массивные люльки, в которых устанавливаются заполненные изолированными жилами барабаны с диаметром щек 1200—2400 мм. Для открутки жил применяется планетарная система шестерен (рис. 5-10), которая показана вместе с крутильной частью машины. Для скрутки четырехжильных кабелей сзади крутильного устройства устанавливается дополнительная люлька (рис. 5-10). За крутильной частью рас-

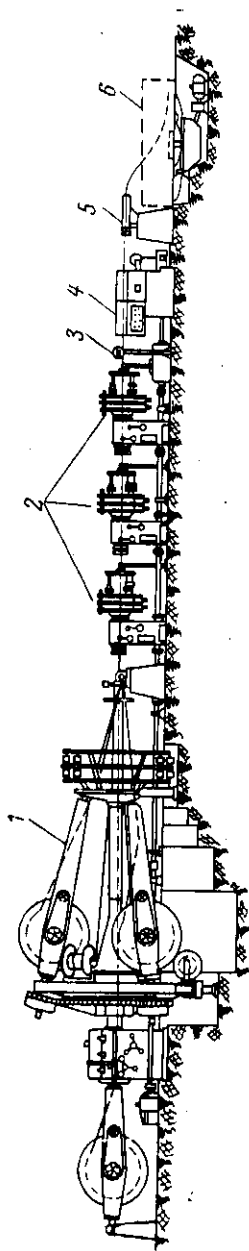


Рис. 5-10. Схема устройства машины для общей скрутки.

1 — крутильная часть; 2 — обмотчики; 3 — счетчик длины; 4 — ленточное тяговое устройство; 5 — укладчик; 6 — приемная корзина.

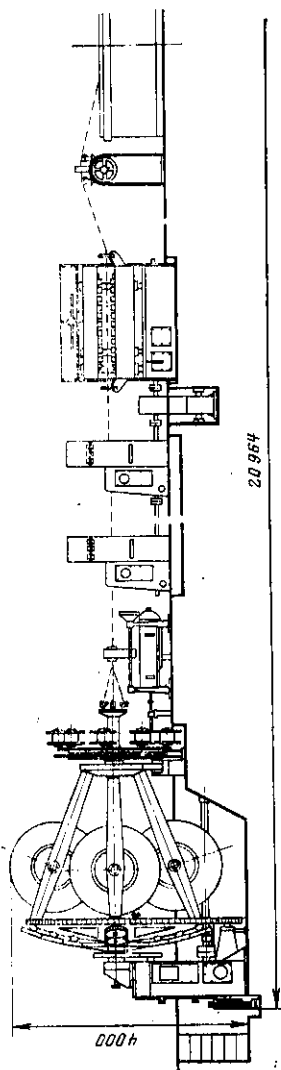


Рис. 5-11. Схема устройства современной машины общей скрутки.

положено устройство для установки бухт с бумажным корделем для заполнения междупазных пространств в кабеле. Далее последовательно устанавливаются три стальных или текстолитовых (при скрутке кабелей типа ОСБ) калибра, в которых происходит скрутка, а затем обжатие изолированных и скрученных вместе жил. В связи с этим первый разъемный калибр имеет внутренний диаметр примерно на 0,5 мм больший, чем диаметр кабеля по скрутке жил, а остальные калибры или равны этому по диаметру или меньше его на 0,5—1,5 мм. При скрутке оцинкованных жил размеры калибров должны быть не менее диаметра по скрутке.

Для уплотнения изоляции и уменьшения диаметра по скрутке рекомендуется капельная или стекающая тонкой струйкой смазка изолированных жил чистым минеральным маслом, которая должна прекращаться при остановке машины.

Для наложения поясной изоляции обычно применяются обмотчики плоского или полутангенциального типа. Прием изолированного кабеля производится в корзины, частота вращения которых должна изменяться в зависимости от радиуса укладки кабеля в значительных пределах, что можно осуществлять с помощью привода от электродвигателей постоянного тока.

Изменение шага скрутки кабелей в значительных пределах достигается применением многоступенчатой коробки скоростей. При скрутке предварительно подкрученных жил необходима очень точная и плавная регулировка шага скрутки, что обычно достигается с помощью дифференциальной передачи, дополняющей многоступенчатую коробку скоростей.

Если изолированные жилы скручиваются без предварительной подкрутки, то для облегчения процесса скрутки и предупреждения вывертывания секторных жил в калибрах конец каждой жилы перед заправкой в калибр подкручивается вручную (1,5—2,5 оборота в зависимости от сечения скручиваемых жил). В этом случае в течение всего процесса скрутки все жилы между отдающим барабаном и калибром будут находиться в подкрученном состоянии. Степень подкрутки существенно влияет на качество скрутки изолированных жил. Поэтому позади люлек в планетарном устройстве имеется специальное приспособление (червячная передача), с помощью которого каждую люльку можно поворачивать

в обе стороны и таким образом регулировать степень подкрутки.

В новейших конструкциях этих машин подкрутка изолированных жил и ее регулировка могут производиться автоматически. Кроме того, в этих машинах предусматривается безосевая установка отдающих барабанов с изолированной жилой с помощью выдвижных цилиндрических опор (пинолей), что позволяет механизировать установку и крепление этих барабанов. Наконец, в современных конструкциях машин для общей скрутки вместо тягового колеса со вспомогательной шайбой применяется гусеничная тяга (рис. 5-11) или устройство ленточного типа, в котором кабель протягивается с помощью двух натянутых лент, прижимаемых к кабелю массивными резиновыми роликами. Укладка кабеля в корзину в современных машинах осуществляется особым укладчиком с автоматическим или ручным управлением.

5-7. МАШИНЫ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАНИЯ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для высококачественного изолирования кабелей высокого напряжения бумажными лентами необходимо, чтобы изолировочные машины располагались в отдельных помещениях, в которых можно поддерживать высокую чистоту и определенную влажность воздуха. Тяговые устройства этих машин должны быть гусеничного типа и исключать изгибы при протягивании кабеля, а также при укладке его в корзину.

При изолировании кабелей высокого напряжения одновременно приходится накладывать до 400—500 лент. Поэтому в современных изолировочных машинах применяются обмотчики на 12, 16 и 20 лент с диаметром бумажных роликов 500—600 мм и больше. Обмотчики должны быть снабжены автоматическими (пружинными) устройствами для поддержания определенного и неизменного в процессе размотки ролика натяжения бумажных лент. Как указывалось, одной из современных конструкций является изолировочная машина фирмы «Пуртье». На этой машине одновременно можно накладывать до 500 лент (9 обмотчиков на 20 роликов и 20 обмотчиков на 16 роликов). Общая длина машины, включая гусеничное, приемное и отдающее устройства,

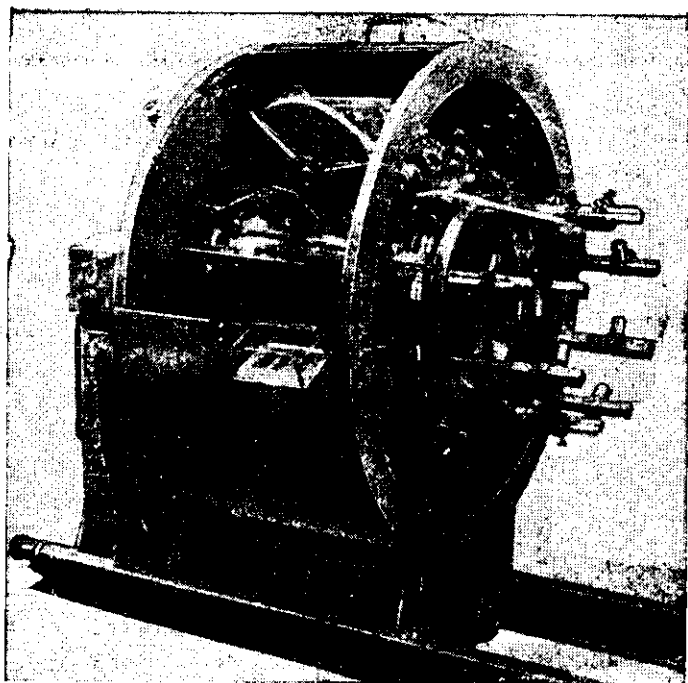


Рис. 5-12. Устройство изолировочной головки машины фирмы «Пуртье».

равна 78 м. Первые 9 обмотчиков предназначены для наложения тонкой кабельной бумаги с диаметром роликов до 400 мм, остальные 20 обмотчиков на 16 лент могут иметь диаметр ролика до 500 мм. Конструкция такого обмотчика (головки изолировочной машины) приведена на рис. 5-12. Устройство для поддержания постоянного натяжения бумажных лент описано выше. Укажем только, что с помощью сменных пружин у первых 9 обмотчиков натяжение ленты может быть в пределах 4—15 Н, а у остальных 8—40 Н.

Привод всех головок общий, но каждая головка имеет вариатор для плавной регулировки частоты вращения в пределах 100—300 об/мин, благодаря чему разные обмотчики могут иметь различные скорости.

На рис. 5-13 показано устройство обмотчика на 12 лент швейцарской фирмы «Майлефер». Этот обмот-

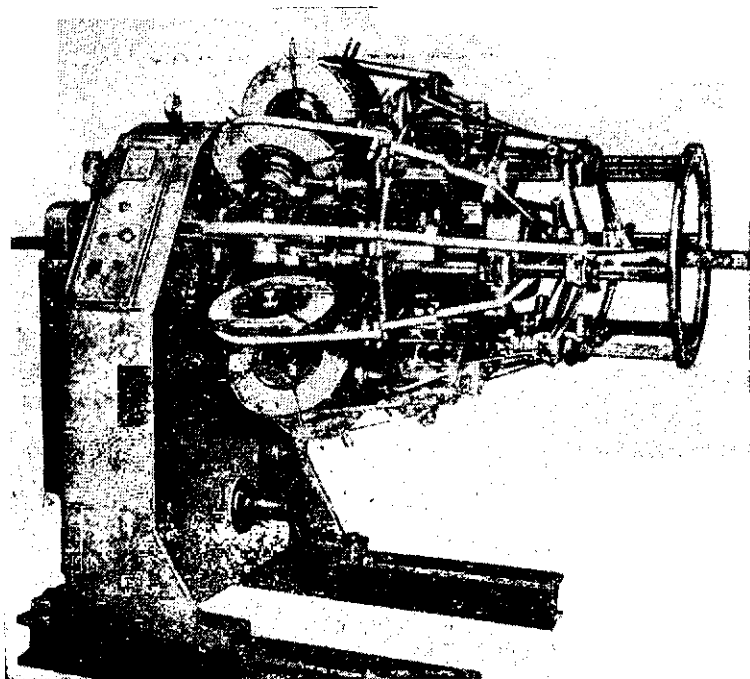


Рис. 5-13. Головка на 12 роликов фирмы «Майлефер» (Швейцария).

чик допускает частоту вращения до 800 об/мин при диаметре бумажных роликов до 500 мм. Ширина бумажных лент может быть в пределах 8—30 мм и максимальный диаметр изолируемого кабеля равен 120 мм. Все обмотчики снабжены автоматами, останавливающими машину при обрыве или сходе бумажной ленты. Натяжение бумажных лент поддерживается также автоматически с помощью пружинных устройств. Натяжение бумажных лент может быть установлено в пределах 5—20 Н.

Изолировочные машины фирмы «Крупп» (ФРГ), предназначенные для обмотки жил кабелей высокого напряжения, оборудованы обмотчиками (головками), в которых может быть установлено 8, 12 и 16 бумажных роликов с максимальным диаметром 500 мм. Эти обмотчики могут вращаться соответственно с частотой 500, 400 и 355 об/мин. Ширина бумажных лент у этих обмот-

чиков может быть в пределах 10—32 мм и максимальный диаметр изолируемого кабеля 80 мм. Постоянное натяжение бумажных лент может быть в пределах 5—30 Н.

Глава шестая

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ И ПРОПИТКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

6-1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОПИТОЧНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ СОСТАВЫ (МАССЫ)

Маслоканифольные составы. Пропитка бумажной изоляции высококачественными составами значительно повышает ее электрическую прочность (примерно с 3—5 до 40—80 МВ/м). От пропиточных составов помимо высоких электроизоляционных свойств требуется повышенная вязкость при температурах эксплуатации силовых кабелей (50—80 °С) и небольшая вязкость при температурах пропитки кабелей (105—120 °С), а также плавное изменение вязкости в зависимости от температуры и возможно малый температурный коэффициент расширения. За исключением последнего условия всем этим требованиям удовлетворяют маслоканифольные составы.

Для пропитки силовых кабелей на 1—10 кВ, а также контрольных кабелей у нас применяется маслоканифольный состав марки МП-1, а для пропитки кабелей на 20—35 кВ и сигнально-блокировочных кабелей — более вязкий состав марки МП-2.

Кинематическая вязкость состава МП-1 при 70 °С должна быть в пределах $(1,3 \div 1,5) \cdot 10^{-4}$ м²/с и состава МП-2 в пределах $(1,6 \div 1,8) \cdot 10^{-4}$ м²/с. (В системе СИ кинематическая вязкость имеет размерность м²/с, так что 1 м²/с = 10⁴ Ст.) Удельное объемное сопротивление этих составов при 100 °С должно быть не менее $5 \cdot 10^9$ Ом·м и электрическая прочность при 20 ± 5 °С не менее 150 МВ/м.

Наличие канифоли в пропиточных составах улучшает их адсорбционные характеристики и придает им способность поглощать водород.

В канифоли и маслоканифольных составах достаточно ярко выражены дипольные потери. На рис. 6-1 приведена примерная зависимость $\lg \delta$ маслоканифольного состава от температуры при различных частотах. Как и

следовало ожидать, с повышением частоты максимум $\operatorname{tg} \delta$ смещается в сторону более высоких температур.

В целях сокращения расхода канифоли при изготовлении пропиточных составов применяется вязкое пропиточное масло (брайтсток) марки П-28 (ГОСТ 6480-53) или смесь этого масла с другим вязким маслом МС-20 (ГОСТ 1013-49). Поэтому сейчас при изготовлении про-

питочных составов марки МП-1 требуется всего 14—15% канифоли и марки МП-2 32—36% (остальное — вязкое минеральное масло). Кроме того, в последние годы в целях удешевления пропиточных составов разработано и начало применяться новое вязкое масло марки КМ-25 (ТУ 38-1-145-67), которое загущается небольшим количеством низкомолекулярного полиэтилена марки ПБ-20. Это масло имеет пониженный $\operatorname{tg} \delta$ и устойчиво ведет себя при повышенных температурах в присутствии меди. Невысокая стоимость этого масла заметно снижает стоимость пропиточных составов при одновременном повышении их качества.

Маслоканифольные составы для пропитки силовых кабелей находят применение и за рубежом. В Чехословацкой Социалистической Республике отдельные заводы применяют составы с содержанием канифоли до 25%, в Англии пропиточные составы фирмы «Дуссек» содержат примерно 5% канифоли.

Основным недостатком существующих пропиточных составов является пониженная вязкость при рабочих температурах (около $2,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с при 55—60°С), в то время как пропитывающие составы фирмы «Дуссек» имеют в этом случае вязкость около $10 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Поэтому в самое последнее время в целях снижения расхода канифоли до 5—7% при одновременном повышении качества и вязкости пропитывающих составов разработаны новые пропиточные составы взамен составов марок МП-1 и МП-2, в которых в качестве загустителя применяется полиэтиленовый воск (ТУ П-204-68) или кабельная масса марки МКП-35 (ТУ 38-01-72).

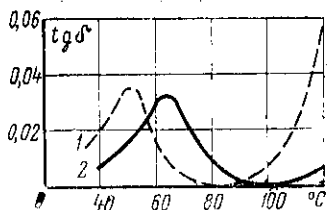


Рис. 6-1. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ масло-канифольного состава от температуры.

1 — при частоте 50 Гц; 2 — при частоте 1000 Гц.

Полиэтиленовый воск представляет собой термопластичный, твердый и эластичный при комнатной температуре материал белого цвета, с температурой каплепадения не ниже 100°C и содержанием золы не более 0,04%. Удельное объемное сопротивление при $20-25^{\circ}\text{C}$ должно быть не менее $1 \cdot 10^{12}$ Ом·м.

Кабельная масса марки МКП-35 представляет собой маслоканифольный состав, в который в качестве загустителя добавлено некоторое количество (около 15%) полиизобутилена. Вместо массы марки МП-1 во вновь разработанных пропиточных составах предусматривается добавка в качестве загустителя к маслу КМ-25 или П-28 полиэтиленового воска в количестве 3—5%; вместо состава МП-2 рекомендуется состав из указанного минерального масла и 20% кабельной массы МКП-35. Кроме того, в оба новых состава предусматривается добавка 5—7% канифоли марки К.

Помимо значительного снижения стоимости пропиточных составов и расхода дефицитной канифоли новые пропиточные составы должны обладать повышенными электроизоляционными и эксплуатационными характеристиками (некоторое снижение диэлектрических потерь, повышение вязкости и температуры каплепадения и т. п.).

Синтетические вязкие и нестекающие составы. Помимо вышеприведенных пропиточных составов с введением в качестве загустителей (для частичной замены канифоли) синтетических загустителей во ВНИИКП разработано синтетическое пропиточное кабельное масло «октол», которое получается путем совместной полимеризации нормальных бутиленов и изобутиленов. Это масло предназначается для пропитки силовых кабелей напряжением до 10 кВ включительно и по своей природе близко к вязким полиизобутиленовым составам. Примерные характеристики этого пропиточного масла следующие:

Плотность при 20°C , кг/м ³	850—870
Вязкость при 50°C , м ² /с	$(4,1 \div 4,6) \cdot 10^{-4}$
Вязкость при 100°C , м ² /с	$(0,45 \div 0,6) \cdot 10^{-4}$
Температура вспышки в открытом тигле, $^{\circ}\text{C}$	Не ниже 165°C
Температура застывания, $^{\circ}\text{C}$	Не выше -15°C
tg δ при 100°C , не более	0,006
Электрическая прочность, МВ/м, не ниже	12—15

Масло прозрачное, не содержит сульфатов, хлоридов и свободной серы и химически нейтрально. Температура

вспышки масла «октол» ниже, чем для маслоканифольных пропиточных составов (220—240°C). Кроме того, масло «Октол» имеет при 40—60°C несколько пониженную вязкость по сравнению с вышеуказанными маслоканифольными составами. Силовые кабели, пропитанные маслом «октол», по своим электроизоляционным свойствам практически не уступают обычным кабелям, пропитанным маслоканифольным составом.

Кабели для вертикальных прокладок с осушенной изоляцией обладают рядом существенных недостатков (повышенная толщина изоляции, прокладка по вертикали на ограниченном расстоянии, стекание части пропиточных составов в низко расположенные участки и т.п.). Поэтому для вертикальных прокладок применяются в основном кабели, пропитанные нестекающими составами. Широкое применение нестекающие составы находят в Англии, где для их изготовления часто применяется синтетический церезин, называемый там иногда микрокристаллическим воском. Кроме того, в состав масс помимо вязкого минерального масла там иногда вводятся полиизобутилен и канифоль, добавление которой повышает стабильность электроизоляционных характеристик этих пропиточных составов.

У нас для этих целей применяется состав марки НКМ-35, который состоит из 50% масла П-28, 30% низкомолекулярного полиэтилена, 15% церезина марки «80» и 5% канифоли. Этот состав имеет температуру каплепадения около 82°C, удельное объемное сопротивление при 80°C около $6,0 \cdot 10^{10}$ Ом·м и $\lg \delta = 0,025$.

Нестекающие составы английской фирмы «Дуссек» имеют еще лучшие электроизоляционные характеристики и температуру каплепадения не ниже 90°C. У нас также разработан новый нестекающий пропиточный состав, состоящий из 75% минерального масла КМ-25 или П-28, 20% полиэтиленового воска и 5—7% канифоли. Новый пропиточный состав имеет температуру каплепадения не ниже 85°C, обладает повышенными электроизоляционными свойствами и сохраняет все время вазелинообразное состояние, что существенно важно в процессе пропитки и наложения металлических оболочек на кабели. Кроме того, новый состав значительно дешевле состава НКМ-35.

Изоляционные масла для пропитки кабелей высокого напряжения. Для пропитки маслонаполненных кабелей,

муфт и намоточных изделий применяются высококачественные минеральные масла, изготавливаемые из нефтей определенных месторождений и прошедшие тщательную очистку и дегазацию.

Для пропитки кабелей в стальных трубах с маслом под давлением применяется дегазированное масло марки С-220д, которое на нефтеперегонных заводах предварительно подвергается тщательной перколяционной очистке. Такое очищенное масло (С-220) на кабельных заводах только дегазируется. Масло С-220 (ГОСТ 8463-57) изготавливается из масла МС-14 эмбенских нефтей и имеет значительно большую вязкость, чем масло, предназначенное для пропитки маслonaполненных кабелей низкого и среднего давления.

Масло С-220 в процессе эксплуатации склонно к некоторому газовыделению. Поэтому взамен его разработано изоляционное масло марки КВС-3, которое не имеет указанного недостатка и в то же время несколько дешевле масла С-220. Масло КВС-3 разработано на основе дистиллятов архегинской, жирновской и анастасьевской нефтей и имеет по сравнению с маслом С-220 несколько повышенное содержание ароматических углеводородов. Кроме того, в процессе изготовления для стабилизации его свойств и повышения склонности к газопоглощению к нему добавляется 0,2% ионола или до 3% нафталина. По данным фирмы «Дуссек» считается допустимым содержание ароматических углеводородов в пропиточных маслах средней вязкости до 25%.

Для пропитки маслonaполненных кабелей низкого и среднего давления применяется масло, которое получается из доссорской или анастасьевской нефти. Такое масло, которое требует очистки контактным методом, обозначается маркой МН-1 и перед контактной очисткой подвергается тщательной сушке. В качестве адсорбентов применяется гумбрин или зикеевская земля в количестве 3—10%. После тщательного перемешивания с предварительно высушенным адсорбентом производится в течение 1—3 суток отстой масла МН-1, причем в конце отстоя температура масла должна быть около 40°C. Более вязкое масло С-220 после контактной очистки отстаивается 4—6 суток при начальной температуре около 85 и конечной около 65°C.

После контактной очистки масло МН-1 подвергается тщательной фильтрации. Отфильтрованное масло

Таблица 6-1

Примерные начальные характеристики минеральных масел, применяемых для пропитки кабелей высокого напряжения

Показатели	Марки масел			
	МН-2	МН-3, МН-4	С-220	С-220д
Электрическая прочность при $20 \pm 10^\circ\text{C}$, не менее, МВ/м	18	18	20	20
$\text{tg } \delta$ при 100°C и напряженности электрического поля 1 МВ/м, не более	0,003	0,003	0,003	0,003
Содержание воздуха, в процентах от объема масла, не более	—	0,005	—	0,005
Вязкость при 20°C , не более, 10^{-4} м ² /с	37,3	37,3	800	800
Температура застывания, $^\circ\text{C}$, не выше	—45	—45	—35	—35

(МН-2), которое обычно хранится в соответствующих резервуарах под вакуумом, дополнительно подвергается глубокой дегазации. Примерные начальные характеристики дегазированного масла МН-3, а также масел С-220 и С-220д приведены в табл. 6-1.

Для пропитки кабелей низкого и среднего давления напряжением 220 кВ и выше начинают применять масло МН-4, которое изготавливается из маловязких масел, в свою очередь получаемых из нефти анастасьевского месторождения. В это масло при нормальной температуре вводится антиокислительная присадка — ионол в количестве 0,25%, после чего масло нагревается при тщательном перемешивании примерно до 130°C .

Ионол (2,6-дитретичный изобутил, 4-метилфенол) представляет собой порошок белого или светло-желтого цвета, который хорошо растворяется в масле, но совершенно нерастворим в воде. Исследования показали, что ионол весьма эффективно снижает окисление не только свежего масла, но и масел, бывших в эксплуатации, причем присадка ионولا не ухудшает электроизоляционных характеристик пропиточного масла. Следует только учитывать, что ионولا приходится брать в 6—20 раз больше, чем других антиокислительных присадок. Масло МН-4 с ионолом имеет низкую температуру застывания (минус $50\text{—}55^\circ\text{C}$), обладает повышенными электроизоляционными свойствами и стабильностью в эксплуатации.

За рубежом в качестве антиокислительных присадок рекомендуются пропионовая кислота, нафтиламин и пр. Одной из наиболее эффективных является также присадка в количестве 0,01—0,1% (оптимальное количество 0,04%) 8-гидрооксихинолина, применяемая в США. Эту присадку можно вводить в масло при изготовлении кабеля, а также в процессе его эксплуатации.

За рубежом (итальянская фирма «Пирелли», японская фирма «Сумитомо») для пропитки маслonaполненных кабелей с центральным каналом применяют синтетические масла на основе алкилбензолов, причем иногда эти масла используют в смеси с другими маслами. Алкилбензолы представляют собой ароматические углеводороды. Введение в бензольное кольцо алкильных групп C_nH_{2n+1} с определенным количеством атомов углерода дает возможность получить масла с нужными вязкостями в рабочем интервале температур.

В результате исследований в СССР разработано на этой основе маловязкое пропиточное масло марки МНК-2. До температуры минус 30°C это масло имеет сравнительно небольшую зависимость вязкости от температуры (рис. 6-2) и в этом отношении существенно превосходит масло МН-4. Новое масло устойчиво против окисления. На рис. 6-3 приведены результаты старения масел МНК-2 и МН-4 в открытых пробирках при 100°C в присутствии меди и свинца. Старение чистых ароматических углеводородов может сопровождаться выделением фенолов или продуктов их конденсации, которые

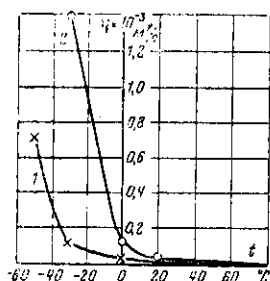


Рис. 6-2. Зависимость вязкости кабельных масел от температуры. 1 — масло марки МНК-2; 2 — масло марки МН-4.

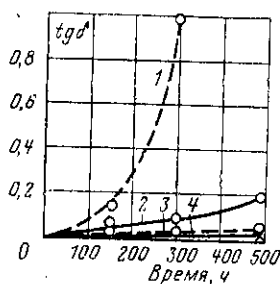


Рис. 6-3. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ кабельных масел от времени старения в присутствии металлов при 100°C.

1 — масло МН-4 со свинцом; 2 — масло МН-4 с медью; 3 — масло МНК-2 со свинцом; 4 — масло МНК-2 с медью.

в свою очередь являются активными антиокислителями. Дальнейшие исследования показали высокие электроизоляционные свойства нового синтетического масла, а также бумажной изоляции, пропитанной этим маслом. В сравнении с маслом МН-4 новое синтетическое масло обладает несколько лучшей газопоглощаемостью, что существенно важно для изоляции маслонаполненных кабелей. Наконец, благодаря пониженной вязкости масла МНК-2 появляется возможность увеличить длину отдельных секций кабельных линий, что в свою очередь может снизить количество стопорных муфт в подпитывающих устройствах.

6-2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ВРЕМЯ СУШКИ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Влагу, содержащуюся в капиллярно-пористых телах, к которым относится бумага, по ее энергии связи с материалом можно разделить на химически связанную, физико-химически связанную (сорбционную) и капиллярную. В процессе сушки необходимо удалить капиллярную и физико-химически связанную влагу.

Давление насыщенных паров P_n над свободной поверхностью воды возрастает с температурой по экспоненциальной закономерности:

$$P_n \approx Ae^{-U_0/RT},$$

где A — постоянный коэффициент;

R — универсальная газовая постоянная [$R = 8,3$ Дж/(г·моль·°C)];

U_0 — энергия, необходимая для испарения 1 г·моль воды при заданной температуре.

Для смачивающих жидкостей энергия связи молекул жидкости с твердой поверхностью больше, чем между молекулами самой жидкости. Поэтому, чтобы испарить адсорбированную жидкость, необходимо затратить дополнительную энергию ΔU , которая и представляет энергию связи влаги с бумагой. Давление насыщенных паров над бумагой равно:

$$P = P_n e^{-\Delta U/RT}. \quad (6-1)$$

Наибольшую энергию нужно затратить для удаления мономолекулярного слоя влаги. По мере роста толщины слоя влаги на твердой поверхности энергия связи ΔU

каждого последующего слоя уменьшается. Таким образом, чем меньше содержание влаги в бумаге, тем больше ее энергия связи и тем ниже давление насыщенных паров над поверхностью влаги. Удаление влаги из бумаги возможно только в том случае, если парциальное давление насыщенных паров в окружающей среде будет ниже давления насыщенных паров над бумагой. Абсолютное значение давления насыщенных паров над бумагой при 100°C составляет примерно 6—7 Па при содержании влаги около 0,1%.

Электроизоляционные свойства бумаги существенно снижаются даже при незначительном содержании влаги. Для получения возможно малого значения $\lg \delta$, что очень важно для высоковольтных кабелей, содержание влаги не должно превышать 0,1% (по отношению к массе сухой бумаги). Этого можно достигнуть только путем нагревания до $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$ и откачки паров влаги и воздуха до давления менее 10 Па.

Для кабелей на напряжение до 35 кВ допустимо содержание влаги до нескольких десятых процента, при этом остаточное давление при сушке можно увеличить примерно до 100—150 Па.

Если жидкость смачивает стенки капилляра, то она вытягивается в капилляр, что объясняет появление дополнительной энергии связи жидкости в капилляре. Относительное давление насыщенных паров над мениском в капилляре при комнатной температуре составляет примерно 0,7 при радиусе капилляра $3 \cdot 10^{-7}$ см, но уже при радиусе 10^{-8} см это давление составляет 0,9, т. е. близко к 1.

При длительной выдержке бумаги в атмосфере с постоянной влажностью влагосодержание в бумаге достигает равновесного значения, когда давление насыщенного пара над бумагой равно парциальному давлению пара в атмосфере.

Зависимость между влагосодержанием в бумаге w и относительная влажность атмосферы ϕ при комнатной температуре приведены на рис. 6-4.

При малой относительной влажности атмосферы в бумаге содержится главным образом сорбционная влага. Вплоть до значения $\phi=0,7$ влагой заполняются только самые микроскопические капилляры ($r < 3 \cdot 10^{-7}$ см). Обычно относительная влажность в помещениях не превышает 0,7. Поэтому при сушке влага перемещается по

капиллярам главным образом в виде пара.

При вакуумной сушке длина свободного пробега молекул пара значительно превышает диаметр капилляров в бумаге. Поэтому при движении молекул имеет значение их столкновение со стенками капилляра, а не между собой. Такое течение газа называется эффузией. В этом случае на движение влаги не оказывает влияние наличие примесей других газов.

Закономерность движения влаги в материале может быть записана в виде

$$i = -a_w \rho_0 \nabla w, \quad (6-2)$$

где i — количество влаги, перемещающееся внутри бумажной изоляции через единицу поверхности в единицу времени, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

a_w — коэффициент влагонепроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ_0 — плотность сухой бумаги, $\text{кг}/\text{м}^3$;

∇w — градиент влагосодержания, $1/\text{м}$.

Так как давление насыщенных паров возрастает экспоненциально с увеличением температуры, то аналогичным образом возрастают коэффициент влагонепроводности и скорость диффузии влаги от внутренних слоев изоляции к наружным.

При наличии в изоляции градиента температуры влага перемещается из более нагретых областей в более холодные. Это можно объяснить более высоким давлением пара над более нагретыми поверхностями в капиллярах. В этом случае (6-2) примет вид:

$$i = -a_w \rho_0 (\nabla w + \delta \nabla T), \quad (6-3)$$

где δ — коэффициент термовлагонепроводности, $1/^\circ\text{C}$.

Знак минус в (6-3) объясняется тем, что поток влаги направлен в сторону снижающейся влажности и температуры.

Процесс сушки изоляции можно разделить на две стадии. В первой стадии влажность в изоляции сни-

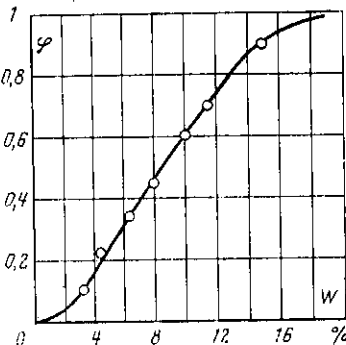


Рис. 6-4. Зависимость между влагосодержанием в бумаге W и относительной влажностью атмосферы ϕ .

жается с 8—6% примерно до 1%. При такой влажности энергия связи влаги невелика и применение вакуума не обязательно. Кроме того, при столь значительном изменении влагосодержания на испарение влаги необходимо затратить большое количество тепла.

Для нагревания жил и изоляции необходимо также интенсивно подводить тепло к кабелю. Это осуществляется пропусканием тока через жилы кабеля. После нагревания примерно до 100°C влагосодержание в бумаге снижается до 1% и необходимо во второй стадии сушки применить вакуум.

При вакуумной сушке (вторая стадия) изменение влагосодержания составляет менее 1% и уже не требуется интенсивного подвода тепла к изоляции. С уменьшением влагосодержания значительно уменьшается коэффициент влагопроводности α_v и скорость сушки постепенно замедляется. Для высоковольтных кабелей эта стадия сушки может продолжаться несколько суток, и конечный результат зависит от глубины вакуума в конце сушки.

6.3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОПИТКИ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В процессе пропитки масло-канифольный или ему подобный состав имеет сравнительно небольшую вязкость и проникает через мельчайшие каналы в глубь бумажной изоляции. Поэтому при изучении процесса пропитки применим ряд основных положений из теории фильтрации. Вследствие малого сечения капилляров и медленного проникновения пропиточного состава в бумажную изоляцию течение его в капиллярах будет ламинарным.

Если полный объем бумажной изоляции V_1 , объем целлюлозных волокон V_2 , то объем пор и каналов в бумажной изоляции

$$V_3 = V_1 - V_2.$$

Отношение $V_3/V_1 = m$ называется пористостью, причем

$$0 < m < 1.$$

Объем воздушных пустот в порах и каналах кабельной бумаги зависит от ее плотности. Бумага, применяемая для изолирования силовых кабелей напряжением 1—35 кВ, имеет плотность около 0,80. Для такой бумаги $m = 0,48$. Если же учесть объем винтовых зазоров между

витками лент, пористость наложенной бумажной изоляции в этом случае составит 0,52—0,53. В практических расчетах пористость можно считать равной 0,5.

Процесс пропитки силовых кабелей теоретически можно разбить на два периода. Первый период — проникновение пропиточного состава в бумажную изоляцию. Этот процесс происходит под действием силы

$$P = P_1 - P_2 + P_3, \quad (6-4)$$

где P_1 — давление над зеркалом пропиточного состава;

P_2 — остаточное давление в кабеле;

P_3 — давление, равновеликое силам адсорбции кабельной бумагой пропиточного состава.

Как только кончается пропитка бумажной изоляции, начинается второй период — заполнение пустот в токопроводящей жиле. Этот процесс происходит за счет прохождения состава сквозь бумажную изоляцию под действием силы $P_1 - P_2$.

Скорость пропитки определяется уравнением Дарси. В общем виде это уравнение имеет вид:

$$v = -k \operatorname{grad} P, \quad (6-5)$$

где v — вектор скорости;

k — коэффициент фильтрации.

Так как в нашем случае поток пропиточного состава направлен всюду радиально, (6-5) имеет вид:

$$v = -k dP/dr. \quad (6-6)$$

Таким образом, количество пропиточного состава, проникающего в изоляцию на единицу длины кабеля в единицу времени, можно выразить уравнением

$$q = -2\pi r k dP/dr. \quad (6-7)$$

Знак минус в последних уравнениях связан с тем, что состав перемещается в направлении, противоположном

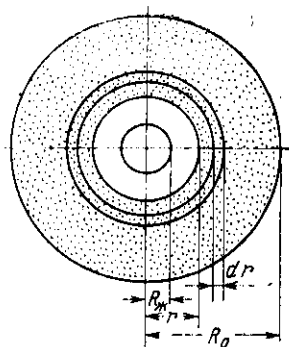


Рис. 6-5. Схема пропитки одножильного кабеля.

ном направлению возрастания радиуса. Из уравнения (6-7) имеем:

$$dP = -\frac{1}{2\pi k} q \frac{dr}{r}. \quad (6-8)$$

Выше указывалось, что на наружный слой изоляции действует давление $P_1 + P_3$, а на каком-либо радиусе r внутри изоляции (рис. 6-5), где проходит граница пропитанной и непропитанной изоляции, имеется еще давление P_2 . Пока допустим, что давление P_2 не изменяется. В этом случае

$$P_1 - P_2 + P_3 = - \int_r^{R_0} \frac{1}{2\pi k} q \frac{dr}{r} = -\frac{1}{2\pi k} q \ln \frac{R_0}{r}. \quad (6-9)$$

Отсюда

$$q = -2\pi k \frac{(P_1 - P_2 + P_3)}{\ln \frac{R_0}{r}}. \quad (6-10)$$

За время dt пропиточный состав переместится на расстояние dr и заполнит объем $m2\pi r dr = qdt$, тогда

$$-2\pi k \frac{P_1 - P_2 + P_3}{\ln (R_0/r)} dt = m2\pi r dr.$$

Отсюда скорость движения границы пропитки равна:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{k (P_1 - P_2 + P_3)}{mr \ln (R_0/r)}. \quad (6-11)$$

Время пропитки

$$dt = -\frac{mr \ln (R_0/r) dr}{k (P_1 - P_2 + P_3)}. \quad (6-12)$$

Полное время пропитки изоляции t можно определить из уравнения

$$\begin{aligned} \int_0^t dt &= -\frac{m}{k (P_1 - P_2 + P_3)} \int_{R_0}^{R_{\text{ж}}} r \ln \frac{R_0}{r} dr = \\ &= \frac{m}{k (P_1 - P_2 + P_3)} \int_{R_{\text{ж}}}^{R_0} r \ln \frac{R_0}{r} dr. \end{aligned}$$

Известно, что

$$\int x \ln x dx = \frac{x^2}{2} \left(\ln x - \frac{1}{2} \right),$$

поэтому

$$\begin{aligned} \int_{R_{ж}}^{R_0} r \ln \frac{R_0}{r} dr &= \ln R_0 \int_{R_{ж}}^{R_0} r dr - \int_{R_{ж}}^{R_0} r \ln r dr = \\ &= \left[+\frac{r^2}{2} \ln R_0 - \frac{r^2}{2} \ln r + \frac{r^2}{4} \right]_{R_{ж}}^{R_0} = \frac{R_0^2}{2} \ln R_0 - \frac{R_{ж}^2}{2} \ln R_0 - \\ &\quad - \frac{R_0^2}{2} \ln R_0 + \frac{R_{ж}^2}{2} \ln R_{ж} + \frac{R_0^2}{4} - \frac{R_{ж}^2}{4} = \frac{R_{ж}^2}{2} \times \\ &\quad \times \left[-\ln \frac{R_0}{R_{ж}} + \frac{1}{2} \left(\frac{R_0^2}{R_{ж}^2} - 1 \right) \right], \end{aligned}$$

откуда

$$t = \frac{m R_{ж}^2 \left[-\ln \frac{R_0}{R_{ж}} + \frac{1}{2} \left(\frac{R_0^2}{R_{ж}^2} - 1 \right) \right]}{2k(P_1 - P_2 + P_3)}. \quad (6-13)$$

В приведенном анализе процесса пропитки не учитывалось изменение давления внутри кабеля P_2 . Между тем в процессе пропитки изоляции почти весь содержащийся в ней воздух (если пренебречь небольшим количеством его, которое растворится в пропитывающем составе) будет сдавливаться и перемещаться в токопроводящей жиле, поэтому давление газовых включений будет повышаться.

Увеличение давления можно рассчитать, пользуясь законом Бойля — Мариотта:

$$P_{2н}/P_{2к} = q_n/q_k,$$

где $P_{2н}$ и q_n — давление и объем воздушных включений в начале; $P_{2к}$ и q_k — в конце периода пропитки.

Если η — коэффициент уплотнения токопроводящей жилы, то для одножильного кабеля

$$q_{к1} = (1 - \eta) \pi R_{ж}^2 \quad (6-14)$$

и

$$q_{в} = (1 - \eta) \pi R_{ж}^2 + m \pi (R_0^2 - R_{ж}^2), \quad (6-15)$$

отсюда

$$P_{2к} = P_{2н} \frac{(1 - \eta) \pi R_{ж}^2 + m \pi (R_0^2 - R_{ж}^2)}{(1 - \eta) \pi R_{ж}^2} =$$

$$= \left[1 + \frac{m}{1 - \eta} \left(\frac{R_0^2}{R_{ж}^2} - 1 \right) \right] P_{2н} = \beta P_{2н}. \quad (6-16)$$

Для кабелей 35 кВ с сечением неуплотненных токопроводящих жил 70—185 мм² коэффициент β колеблется в пределах 10—20. Если в процессе сушки изоляции остаточное давление достигает 100—150 Па, максимальное давление в воздушных включениях токопроводящей жилы может быть в пределах 1000—2000 Па, т. е. менее 2—3% атмосферного давления, и поэтому им можно пренебречь. В случае уплотненных круглых жил максимальное давление воздушных включений будет тем больше, чем выше коэффициент уплотнения. При существующих у нас методах уплотнения круглых жил ($\eta = 0,82 \div 0,83$) максимальное давление не должно превышать 3—4% атмосферного давления. Кабели 1—10 кВ, как указывалось выше, сушатся при менее глубоком вакууме. Однако объем бумажной изоляции у этих кабелей значительно меньше, чем у рассмотренных выше кабелей 35 кВ, а объем газовых включений в токопроводящих жилах многожильных кабелей соответственно выше, чем у одножильных кабелей. Поэтому повышение остаточного давления будет в указанных пределах.

Второй период процесса пропитки — заполнение пустотных пространств в токопроводящей жиле — будет происходить за счет разницы давлений над зеркалом пропиточного состава P_1 и в жиле P_2 . Изменение объема пропиточного состава в единице длины токопроводящей жилы будет характеризоваться уравнением

$$\frac{dq_m}{dt} = \frac{2\pi k}{\ln(R_0/R_{ж})} (P_1 - P_{ж}). \quad (6-17)$$

В отличие от ранее приведенных соображений давление $P_{ж}$ здесь будет изменяться в значительных пределах.

Кроме того, если кабель пропитывается дегазированным составом, то при повышении давления часть воздуха, заключенного в токопроводящей жиле, будет растворяться в этом составе. Поэтому мы рассмотрим процесс проникновения состава в токопроводящую жилу с учетом обоих указанных явлений. Обозначим: $P_{ж0}$ —

давление воздуха в жиле в начальный момент проникновения в нее пропиточного состава; $q_{ж0}$ — полный объем пустот в жиле; $P_{ж}$ — давление воздуха в жиле в рассматриваемый момент времени; $q_{ж}$ — объем состава, натекшего в жилу; α — коэффициент растворимости воздуха в пропиточном составе; V — объем воздуха, растворенного в пропиточном составе.

Объем воздуха, оставшегося в токопроводящей жиле,

$$q_v = q_{ж0} - q_{ж}.$$

На основании закона Бойля — Мариотта можно написать:

$$P_{ж0} q_{ж0} = (q_v + V) P_{ж},$$

где

$$V = \alpha q_{ж}$$

или

$$P_{ж0} q_{ж0} = (q_v + \alpha q_{ж}) P_{ж} = [q_{ж0} - q_{ж}(1 - \alpha)] P_{ж},$$

откуда

$$P_{ж} = \frac{P_{ж0} q_{ж0}}{q_{ж0} - q_{ж}(1 - \alpha)}. \quad (6-18)$$

Так выражается зависимость давления воздуха в жиле $P_{ж}$ от объема состава, натекшего в жилу.

Из (6-17) и (6-18) имеем:

$$\frac{dq_{ж}}{dt} = \frac{2\pi k}{\ln(R_0/R_{ж})} \left[P_1 - \frac{q_{ж0} P_{ж0}}{q_{ж0} - q_{ж}(1 - \alpha)} \right] \quad (6-19)$$

или

$$\int \frac{dq_{ж}}{P_1 - \frac{q_{ж0} P_{ж0}}{q_{ж0} - q_{ж}(1 - \alpha)}} + C = \frac{2\pi k}{\ln \frac{R_0}{R_{ж}}} \int dt.$$

Примем

$$P_1 - \frac{q_{ж0} P_{ж0}}{q_{ж0} - q_{ж}(1 - \alpha)} = z,$$

тогда

$$\frac{1}{P_1 - z} = \frac{q_{ж0}}{q_{ж0} P_{ж0}} - \frac{q_{ж}(1 - \alpha)}{q_{ж0} P_{ж0}}$$

или

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{P_1 - z} \right) = \frac{d}{dq_{ж}} \left(\frac{q_{ж0}}{q_{ж0} P_{ж0}} - \frac{q_{ж}(1 - \alpha)}{q_{ж0} P_{ж0}} \right)$$

и

$$\frac{1}{(P_1 - z)^2} dz = \frac{-(1 - \alpha)}{q_{ж0} P_{ж0}} dq_{ж}.$$

Из (6-19) следует, что

$$dq_{ж} = \frac{2\pi k}{\ln(R_0/R_m)} z dt,$$

откуда

$$\frac{-q_{ж0}P_{ж0}}{1-\alpha} \int \frac{dz}{(P_1-z)^2 z} + C = \frac{2\pi k}{\ln(R_0/R_m)} t.$$

Интегрируя последнее уравнение, получаем:

$$\frac{-q_{ж0}P_{ж0}}{1-\alpha} \left[\frac{1}{P_1(P_1-z)} - \frac{1}{P_1^2} \ln \frac{P_1-z}{z} \right] + C = \frac{2\pi k}{\ln \frac{R_0}{R_m}} t. \quad (6-20)$$

Подставляя в последнее уравнение значение z , получаем:

$$\frac{-q_{ж0} - q_{ж}(1-\alpha)}{P_1(1-\alpha)} + \frac{P_{ж0}q_{ж0}}{P_1^2(1-\alpha)} \ln \frac{q_{ж0}P_{ж0}}{q_{ж0}(P_1 - P_{ж0}) - P_1q_{ж}(1-\alpha)} + C = \frac{2\pi kt}{\ln(R_0/R_m)}.$$

Для определения постоянной интегрирования используем граничное условие ($t=0$, $q_{ж}=0$).

В этом случае

$$\frac{-q_{ж0}}{P_1(1-\alpha)} + \frac{P_{ж0}q_{ж0}}{P_1^2(1-\alpha)} \ln \frac{P_{ж0}}{(P_1 - P_{ж0})} = -C.$$

Подставляя значение постоянной интегрирования в предыдущее уравнение, имеем:

$$t = \frac{\ln(R_0/R_m)}{2\pi k} \left[\frac{q_{ж}}{P_1} - \frac{q_{ж0}P_{ж0}}{P_1^2(1-\alpha)} \ln \left(1 - \frac{P_1(1-\alpha)}{(P_1 - P_{ж0})} \frac{q_{ж}}{q_{ж0}} \right) \right].$$

Так как $P_{ж0} = \beta P_2$, то последнее уравнение можно переписать следующим образом:

$$t = \frac{\ln(R_0/R_m)}{2\pi k} \left[\frac{q_{ж}}{P_1} - \frac{\beta}{1-\alpha} \frac{q_{ж0}P_2}{P_1^2} \ln \left(1 - \frac{(1-\alpha)P_1}{(P_1 - \beta P_2)} \frac{q_{ж}}{q_{ж0}} \right) \right].$$

Время, в течение которого заполняются все пустоты, можно определить, если в последнем уравнении принять

$$q_{ж} = q_{ж0}.$$

В этом случае имеем:

$$t = \frac{\ln(R_0/R_{ж})}{2\pi k} \frac{q_{ж0}}{P_1} \left[1 - \frac{\beta}{1-\alpha} \frac{P_2}{P_1} \ln \left(1 - \frac{P_1(1-\alpha)}{P_1 - \beta P_2} \right) \right]. \quad (6-21)$$

Полное время, необходимое для пропитки кабеля, будет состояться из времени, необходимого для пропитки бумажной изоляции, и времени на заполнение пустот в токопроводящей жиле.

Для того чтобы теоретически подсчитать это время, необходимо экспериментальным путем определить коэффициент фильтрации k .

Если в (6-21) величина, стоящая под знаком логарифма, равна нулю, тогда время протекания пропиточного состава в жилу безгранично велико.

В самом деле, если

$$\ln \left[1 - \frac{(1-\alpha) P_1}{P_1 - \beta P_2} \frac{q_{ж}}{q_{ж0}} \right] \rightarrow -\infty,$$

то $t \rightarrow \infty$.

Последнему условию должно удовлетворять равенство

$$\frac{(1-\alpha) P_1}{P_1 - \beta P_2} \frac{q_{ж}}{q_{ж0}} = 1. \quad (6-22)$$

Максимальный объем пустот, который в этом случае может быть заполнен, равен:

$$q_{ж.макс} = q_{ж0} \frac{P_1 - \beta P_2}{(1-\alpha) P_1}. \quad (6-23)$$

Заполнение будет полным, если

$$\frac{P_1 - \beta P_2}{(1-\alpha) P_1} \geq 1.$$

Отсюда максимально допустимое остаточное давление в вакуум-котле равно:

$$P_{2макс} = \frac{\alpha}{\beta} P_1. \quad (6-24)$$

Таким образом, если остаточное давление в вакуум-котле будет выше этого значения, при сдавливании пропиточным составом остатков воздуха могут образоваться такие большие давления в воздушных включениях, что, несмотря на растворение частиц воздуха в пропиточном составе, дальнейшее проникновение состава в жилу станет невозможным. В частности, для выпускаемых сече-

ний кабелей 35 кВ $\beta=20 \div 10$ и, следовательно, при $\alpha=0,216$ и $P_1=0,1$ МПа, $P_{2\text{макс}}$ будет равно 1000—2500 Па. На практике всегда возможны такие случаи, когда пропиточный состав через каналы и зазоры между слоями лент проникает в токоподводящую жилу ранее, чем будет пропитана вся бумажная изоляция. В этом случае внутри пропитанной изоляции могут иметь место воздушные включения. Этим объясняется одна из основных причин применения возможно более глубокого вакуума при сушке и пропитке изоляции высоковольтных кабелей.

Исследования показали, что коэффициент фильтрации k у бумажных листов в зависимости от плотности

Таблица 6-2

Примерные режимы сушки и пропитки силовых кабелей напряжением 1—35 кВ

Наименование процесса	Продолжительность сушки, ч (не менее), для кабелей напряжением, кВ				
	1	6	10	20	35
Нагрев током и паром под вакуумом до температуры 120—130 °С	До достижения заданной температуры			—	—
Нагрев током и паром при атмосферном давлении до температуры 120—130 °С	—	—	—	До достижения заданной температуры	
Сушка при остаточном давлении не более:					
5,35 кПа	1	—	—	—	—
2,70 кПа	—	3	—	—	—
1,30 кПа	—	—	4	—	—
Сушка под вакуумом	—	—	—	21	30
В том числе при остаточном давлении не более 270 Па	—	—	—	13	20
Пропитка под вакуумом (включая время впуска состава) при остаточном давлении не более:					
5,35 кПа	1	—	—	—	—
2,70 кПа	—	2	—	—	—
1,30 кПа	—	—	3	—	—
Пропитка под вакуумом (включая время впуска массы) при остаточном давлении не более 270 Па	—	—	—	5	5
Пропитка под атмосферным давлением	1	2	3	—	—
Пропитка под избыточным давлением не менее 0,15 МПа	—	—	—	7	8
Пропитка при атмосферном давлении	—	—	—	10	12

бумаги колеблется в пределах 0,75—1,40 (в среднем около 0,90), а у наложенной на жилу бумажной изоляции он в среднем равен 2,25.

Эксперименты и практика подтвердили правильность приведенных теоретических соображений, которые учтены в действующих технологических инструкциях и, в частности, в табл. 6-2. При вакууме (остаточное давление 100—1500 Па за 5—10 ч пропитывается примерно 5—12 слоев бумаги за счет адсорбционных сил P_3). Пропитка под вакуумом, которая предусматривается заводскими производственными конструкциями (см. табл. 6-2), имеет своей целью устранение пены и дополнительную дегазацию пропиточного состава, находящегося в котле и принимающего в себя некоторое количество воздуха при контакте с бумажной изоляцией.

Процесс пропитки протекает тем быстрее, чем выше давление P_1 и чем меньше вязкость пропиточного состава.

Ускорение процесса пропитки и более полное заполнение пространств в токопроводящей жиле может быть достигнуто, если процесс пропитки производить под повышенным давлением 0,15—0,25 МПа. Лучше всего давление создавать самим же пропитывающим составом, так как создание давления сжатым воздухом или азотом связано с повышенным их растворением в пропиточном составе.

6-4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ СУШКИ И ПРОПИТКИ КАБЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 1—35 кВ

Для ускорения технологического процесса кабели предварительно сушатся в корзинах постоянным током. Применение переменного тока крайне затруднительно, так как кабель в корзине представляет очень большое индуктивное сопротивление; кроме того, в этом случае возникают значительные магнитные потери в стали корзины, котлов и т. п.

Нагрев кабеля током при существующем у нас вакуумном оборудовании целесообразно производить под атмосферным давлением, так как в этом случае благодаря повышенной теплопроводности воздуха (по сравнению с вакуумом) происходит дополнительный обогрев кабеля от стенок котла, что приводит к повышению скорости и равномерности нагрева всей изоляции. При суш-

ке электрическим током нагрев бумажной изоляции не должен превышать 130—140 °С, так как дальнейший нагрев приводит к ухудшению механических свойств бумажной изоляции и повышению ее хрупкости в пропитанном состоянии.

После достижения указанной температуры включается вакуумная система, а нагрев электрическим током прекращается.

Максимально допустимое остаточное давление, а также режим сушки кабелей 1—35 кВ, принятый на наших заводах, приведен в табл. 6-2.

Применение более глубокого вакуума может только способствовать повышению качества сушки бумажной изоляции.

По окончании сушки вакуум-котел соединяют с массохранилищем и благодаря разности давления пропиточный состав заполняет вакуум-котел до требуемой высоты.

Примерный режим пропитки, применяемый на отечественных заводах, также приведен в табл. 6-2; при этом предусматривается, что пропитка кабелей на 20 и 35 кВ должна производиться предварительно дегазированным составом. Применение дегазированного состава желательно и для кабелей других напряжений.

Температура пропиточного состава при поступлении его в котел и во время пропитки кабеля должна быть в пределах 120—130 °С и во всяком случае не ниже 110 °С при пропитке кабелей напряжением до 10 кВ включительно и не ниже 120 °С для кабелей напряжением 20 и 35 кВ.

По окончании процесса пропитки горячим составом в вакуум-котле корзины с кабелем обычно устанавливаются для охлаждения на открытом воздухе в сушильно-пропиточном отделении.

В процессе охлаждения объем пропиточного состава в изоляции уменьшается (температурный коэффициент расширения пропиточной массы примерно равен 0,0008 1/°С), и вследствие этого происходит дополнительная пропитка изоляции составом, находящимся в корзине.

Продолжительность естественного охлаждения корзин с кабелем (в особенности в летнее время) весьма значительна. Поэтому большой практический интерес представляет применение искусственного охлаждения.

Управление впуском и сливом пропиточного состава, а также поддержание состава на определенном уровне можно автоматизировать с помощью поплавковых устройств.

На новых кабельных заводах, в частности на заводе «Камкабель», предусмотрена возможность достаточно полной автоматизации процесса сушки и пропитки силовых кабелей.

Технологические режимы сушки и пропитки силовых кабелей аналогичных рабочих напряжений на отдельных зарубежных заводах по длительности не отличаются существенно от режимов, приведенных в табл. 6-2, но процесс сушки часто производится при более глубоком вакууме, чем в СССР. Пропитка производится под избыточным давлением пропиточного состава 0,15—0,17 МПа и более. Охлаждение корзин с кабелем производится путем пропускания состава из котла через холодильник.

6-5. СУШКА И ПРОПИТКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

А. Сушка и пропитка маслонаполненных кабелей низкого и среднего давления (с центральным маслопроводящим каналом)

Сушка и пропитка высоковольтных кабелей отличается особой глубиной и тщательностью проведения всего технологического процесса. Существующий пока на некоторых кабельных заводах отдельный технологический процесс сушки и пропитки этих кабелей обычно состоит из следующих последовательных операций:

1. Первая сушка.

а) Нагрев изолированной жилы до 90—115 °С за счет тепла от стенок вакуум-котла и тепла, выделяющегося при прохождении постоянного тока в токопроводящей жиле (плотность около 1 А/мм²).

б) Сушка под вакуумом в котле в течение 30—35 ч при 90—115 °С; последние 15 ч остаточное давление в котле должно быть не более 400 Па.

в) Охлаждение изолированной жилы до 45—60 °С; во время этого процесса в котел подается осушенный углекислый газ или азот.

2. Вторая сушка

Наложение свинцовой оболочки производится сразу после выемки кабеля из вакуум-котла. После этого про-

изводится сушка изоляции под вакуумом (остаточное давление до 10—30 Па) при $100 \pm 5^\circ\text{C}$; затем температуру в камере, в которой находится кабель, снижают до $70 \pm 5^\circ\text{C}$ и производят промывку кабеля углекислым газом для замещения им остатков воздуха в изоляции кабеля. После этого производится дополнительная вакуумная осушка изоляции при $70 \pm 5^\circ\text{C}$, в конце которой $\lg \delta$ просушенной изоляции должен быть не более 0,0035. Следует учитывать, что растворимость CO_2 в масле примерно в 10 раз больше, чем воздуха, поэтому остатки CO_2 после второй сушки легко растворяются в масле, что резко сокращает количество газовых включений.

3. Пропитка изоляции кабеля

а) Заполнение канала и изоляции кабеля дегазированным маслом.

б) Двукратная промывка кабеля дегазированным маслом; после первой промывки кабель охлаждается до окружающей температуры в цехе. Качество пропитки контролируется так называемым «пропиточным испытанием», определяющим объем газа в кабеле (в процентах объема масла в нем).

Б. Сушка и пропитка маслонаполненных кабелей высокого давления (в стальных трубах)

Этот технологический процесс применительно к кабелям 220 кВ и состоит из следующих последовательных операций: 1) нагрев изолированной жилы (при атмосферном давлении) до $115\text{—}120^\circ\text{C}$ за счет тепла от стенок вакуум-котла и тепла, выделяющегося при прохождении в токопроводящей жиле постоянного тока (плотность $0,6\text{—}0,8 \text{ А/мм}^2$); 2) сушка под вакуумом: первые 3—5 суток при $110 \pm 5^\circ\text{C}$; в последние сутки остаточное давление должно быть не более 100—150 Па (за эти операции удаляется очень большое количество влаги); 3) 2,5—3 суток сушка производится при $105 \pm 5^\circ\text{C}$ и остаточном давлении не более 70 Па; в конце этого периода $\lg \delta$ изоляции должен быть не более 0,005.

Пропитка кабелей изоляционным маслом производится при $105 \pm 10^\circ\text{C}$ и разделяется на следующие основные этапы: а) впуск масла в котел и пропитка под вакуумом (остаточное давление не более 70 Па) примерно в течение 30 ч. Вакуум здесь применяется для дополнительной дегазации масла и для удаления газовых включений

в изоляции кабеля; б) пропитка примерно в течение 40 ч при давлении (с помощью обезвоженного азота) в котле 0,01—0,02 МПа, причем в течение последних 24 ч электрическая емкость изоляции не должна изменяться, что в известной степени будет характеризовать качество пропитки изоляции; в) охлаждение пропитанного кабеля производится при указанном избыточном давлении азота до 20—30 °С.

Выгрузка корзины из котла должна производиться непосредственно перед наложением на кабель временных свинцовых оболочек.

Приведенные выше процессы сушки и пропитки высоковольтных кабелей разработаны применительно к технологическому оборудованию, существующему на некоторых наших кабельных заводах.

В настоящее время разработаны усовершенствованные сушильно-пропиточные установки, в которых во время сушки обеспечивается высокий вакуум (остаточное давление до 0,1—0,15 Па), а пропитка производится под избыточным давлением масла порядка 0,03—0,05 МПа.

Между сушильно-пропиточным котлом и свинцовым или алюминиевым прессом располагается шлюзовое устройство, которое перед наложением на кабель металлической оболочки плотно присоединяется к прессовой головке, вакуумируется и заполняется маслом. Таким образом, кабель поступает в пресс, совершенно не соприкасаясь с воздухом. Кабель помещается на полем металлическом барабане, который свободно плавает в масле, что облегчает смотку кабеля с барабана во время наложения металлической оболочки.

На некоторых заводах начинает применяться высокочастотная сушка изоляции кабелей высокого напряжения.

Исследованиями, проведенными канд. техн. наук В. М. Третьяковым и работниками завода «Камкабель», установлено, что скорость высокочастотной сушки значительно выше, чем обычной сушки при наличии в изоляции градиентов влажности и температуры. Этими исследованиями установлено также, что когда на невысушенную бумажную изоляцию начинает воздействовать электрическое поле высокой частоты, внутри изоляции при температуре несколько ниже 100 °С возникает повышенное давление пара, по-видимому, из-за того, что скорость образования пара значительно превышает перенос его из

изоляции в окружающую среду, причем во внутренних слоях (ближе к токопроводящей жиле) это давление значительно больше, чем в наружных слоях.

В процессе высокочастотного нагрева после сравнительно быстрого достижения максимума давления оно начинает заметно снижаться, но даже после прекращения высокочастотного нагрева некоторое избыточное давление пара внутри изоляции сохраняется. Таким образом, влага в виде пара выносится из внутренних слоев на поверхность изоляции под давлением пара. Этот перенос значительно интенсивнее, чем обычный диффузионный перенос влаги, чем и объясняется высокая эффективность высокочастотной сушки изоляции высоковольтных кабелей.

За рубежом некоторые фирмы к высокочастотной сушке изоляции кабелей высокого напряжения относятся с осторожностью, опасаясь возможности неравномерного нагрева и перегрева отдельных мест этой изоляции, а также возможных повреждений ее от возникновения внутреннего давления водяного пара.

6-6. ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУШИЛЬНО- ПРОПИТОЧНЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ

Для сушки и пропитки силовых кабелей применяются вертикальные вакуум-котлы (рис. 6-6) с обогревающей паровой рубашкой, которая имеется у наружной и внутренней цилиндрической части (керн) котла. Сверху котел имеет крышку, в которой в свою очередь имеются смотровое окно и воздушный кран. В существующих (старых) конструкциях котлов герметизация достигается уплотнением места стыка крышки и корпуса котла с помощью свинцовых прокладок, причем давление борта крышки на прокладку осуществляется за счет силы тяжести крышки P_1 , давления наружного воздуха на крышку при вакууме в котле P_2 и дополнительного усилия от затяжки болтов P_3 ; значения P_2 и P_3 значительно больше силы тяжести крышки P_1 . Удельное давление $P_{св}$ на свинцовую прокладку равно:

$$P_{св} = (P_1 + P_2 + P_3) / S,$$

где S — площадь опорной поверхности.

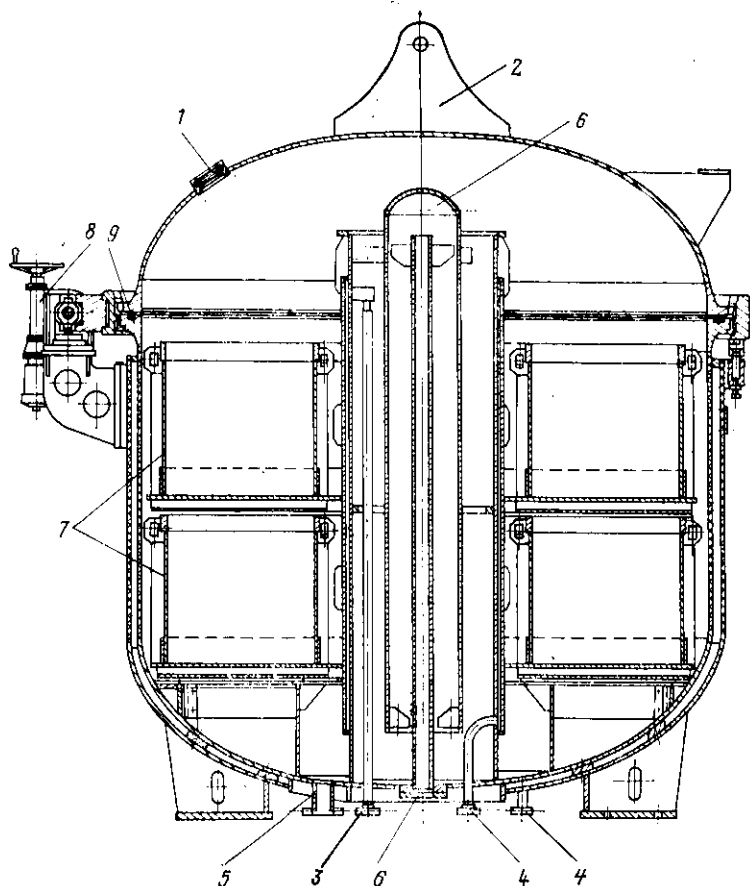


Рис. 6-6. Вертикальный вакуумный котел.

1 — смотровое окно; 2 — скоба для подъема крышки краном; 3 — ввод пара; 4 — выходы конденсата; 5 — ввод пропиточного состава; 6 — вакуумный провод; 7 — корзины с кабелем; 8 — механизм для поворота подвижного кольца байонетного затвора; 9 — подвижное кольцо.

При хорошо затянутых болтах и при остаточном давлении в котле $100\text{--}150\text{ Па}$ $P_{\text{св}} = 800 \div 900\text{ МПа}$. Под таким давлением свинцовая прокладка деформируется, плотно пристает к борту крышки и к стенкам опорного гнезда и создает необходимое уплотнение.

В современных конструкциях сушильно-пропиточных котлов крышки имеют байонетный затвор, а уплотнение производится с помощью нагревостойкой (кремнийорганической) резины. Это значительно облегчает и ускоряет

Таблица 6-3

Основные технические данные применяемых
в настоящее время вертикальных вакуум-котлов

Основные показатели	Диаметр котла, м	
	3	4
Диаметр корзины наружный, м	3	4
То же внутренний, м	1,0	1,2
Высота корзины, м	0,9	1,0
Число корзин, одновременно загруженных в котел, шт.	2—3	2—3
Давление пара в рубашке, МПа	0,3—0,4	0,3—0,4
Достижимое остаточное давление, Па	10	10
Масса корзины, т	3	4
Масса котла с арматурой, т	16	25

процесс посадки крышки и способствует получению более глубокого вакуума в котле (рис. 6-6).

Вакуумная труба расположена в центральной части вакуум-котла и присоединяется к вакуум-проводу в нижней части котла. На некоторых кабельных заводах начинают применять вакуум-котлы без внутренней цилиндрической части, так как наличие ее затрудняет установку корзин в котле. Это, однако, несколько снижает равномерность сушки изоляции кабеля. Кроме того, недостатком в этом случае является значительное увеличение объема пропиточного состава, которое необходимо для заполнения в сушильном котле пространства вне корзин с пропитываемым кабелем.

Все большее применение начинают находить вакуум-котлы для корзин диаметром 4 м (табл. 6-3).

Для целей сушки кабелей 1—35 кВ на наших кабельных заводах применяются главным образом *поршневые вакуумные насосы*. Последние представляют собой по существу воздушные поршневые компрессоры, в которых сжатие воздуха производится от очень малых давлений (создание вакуума) до атмосферного. Так как при сжатии газа от давления 40—50 Па до давления выше атмосферного отношение давлений составляет более 2000, поршневые вакуумные насосы строятся со сдвоенными цилиндрами. В этом случае второй цилиндр используется для уменьшения противодавления при выхлопе газов из первого цилиндра.

Во время сушки кабеля из бумажной изоляции выделяется значительное количество влаги.

Испаряясь, влага сильно увеличивает свой объем, что вызывает уменьшение вакуума. В связи с этим целесообразно водяные пары по выходе из вакуум-котлов конденсировать, что достигается установкой между вакуум-котлами и насосами холодильников (конденсационных колонок). Одновременно происходит значительное охлаждение газов, что также способствует повышению вакуума и облегчает работу вакуум-насосов.

Применяемые на наших заводах холодильники представляют систему вертикальных металлических трубок (диаметром 20—40 мм). Холодная вода поступает в нижнюю часть холодильника и омывает стальные (реже латунные) трубки, внутри которых сверху вниз направляются отсасываемые газы с парами воды. Наибольшее выделение влаги происходит в первые часы сушки кабеля, затем количество этой влаги резко уменьшается.

В современном сушильно-пропиточном оборудовании для производства силовых кабелей 1—35 кВ предусматривается применение высоковакуумных насосов, наличие дегазационных установок, хранение пропиточных составов под вакуумом, искусственное охлаждение пропитывающего состава и т. п.

6.7. ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУШКИ И ПРОПИТКИ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

При непрерывной технологии первая стадия сушки маслонеполненных кабелей низкого и среднего давления (с центральным каналом) и весь процесс сушки кабелей, монтируемых в стальных трубах, может производиться в вертикальных вакуум-котлах. В этом случае все должно удовлетворять требованиям установленного технологического процесса (изгиб кабеля при укладке в корзину в пределах допустимых радиусов, необходимый вакуум, равномерный нагрев изоляции, автоматический контроль процесса сушки и пропитки и т. п.). Для сушки и пропитки кабелей напряжением 220 кВ и выше применяются вакуум-котлы с внутренним диаметром 4 м и более.

Существуют усовершенствованные сушильно-пропиточные установки, в которых может создаваться высокий вакуум (остаточное давление 0,1—0,15 Па), а пропитка производится под избыточным давлением масла порядка 0,03 МПа. Схема такой установки, которая при-

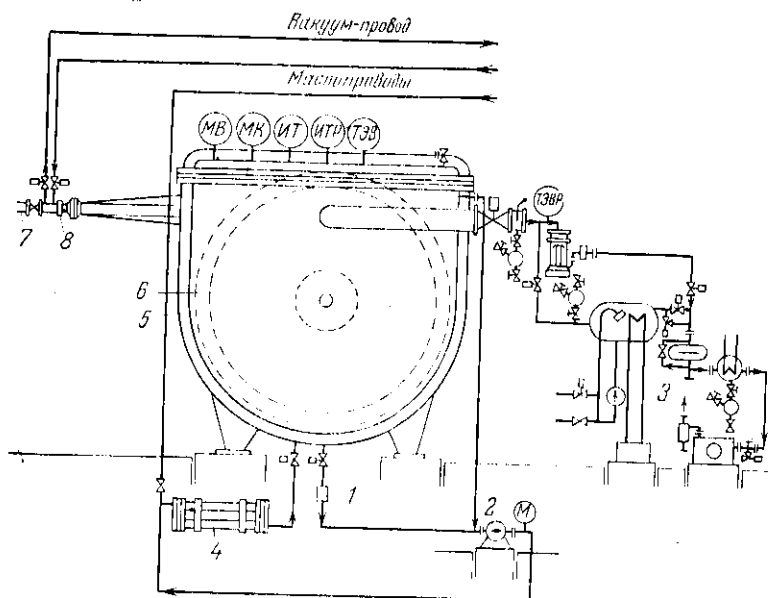


Рис. 6-7. Схема современной установки для сушки и пропитки маслонаполненных кабелей.

1 — сетчатый фильтр; 2 — масляный насос; 3 — вакуумная установка «Вапор-терм-20» (ротационно-масляный вакуумный насос, вакуумный насос типа «Рутс» и конденсатор-холодильник); 4 — маслоохладитель; 5 — сушильно-пропиточный котел; 6 — барабан с кабелем; 7 — герметичный желоб; 8 — шлюз; ИТ — измеритель температуры (указывающий); ИТР — измеритель температуры (регистрирующий); МК — контактный манометр; MB — вакуумметр (указывающий); ТЭВ — термоэлектрический вакуумметр (указывающий); ТЭВР — термоэлектрический вакуумметр (регистрирующий).

менима для сушки и пропитки кабелей высокого напряжения различных конструкций, приведена на рис. 6-7. Кабель помещается на полом металлическом барабане, который свободно плавает в масле, что значительно облегчает сматывание кабеля с него во время наложения металлической оболочки. Между сушильно-пропиточной установкой и свинцовым или алюминиевым прессом имеется шлюзовое устройство, которое перед наложением на кабель металлической оболочки плотно присоединяется к прессовой головке, вакуумируется и заполняется маслом. На рис. 6-8 приведена примерная технологическая схема сушильно-пропиточного оборудования для кабелей высокого напряжения различных конструкций.

Для создания высокого вакуума применяются ротационно-масляные насосы, причем когда в откачиваемых

газах содержится значительное количество водяных паров, целесообразно применение ротационно-масляных насосов, снабженных газобалластным устройством. На рис. 6-9 приведена схема работы ротационно-масляных насосов с газобалластным устройством и без него. При определенном положении ротора первого насоса газобалластное устройство открывается и в камеру сжатия нагнетается воздух (балластный газ). Благодаря этому при дальнейшем сжатии парциальное давление пара значительно снижается и конденсация пара, которая могла бы быть, при отсутствии балластного газа не произойдет. На некоторых наших заводах для сушки кабелей высокого напряжения применяются мощные ротационно-масляные газобалластные насосы с водяным охлаждением типов ВН-6Г и ВН-4Г, причем насосы типа ВН-4Г предназначаются для откачки небольших объемов газа, имеющихся под металлической оболочкой маслонаполненных кабелей при второй сушке и пропитке, а также для дегазационных установок при обработке масла.

Для создания глубокого вакуума иногда применяется за рубежом агрегат «Валпортерм-20», который состоит из нескольких вакуумных насосов и конденсатора-холодильника (рис. 6-7). Для получения глубокого вакуума, ког-

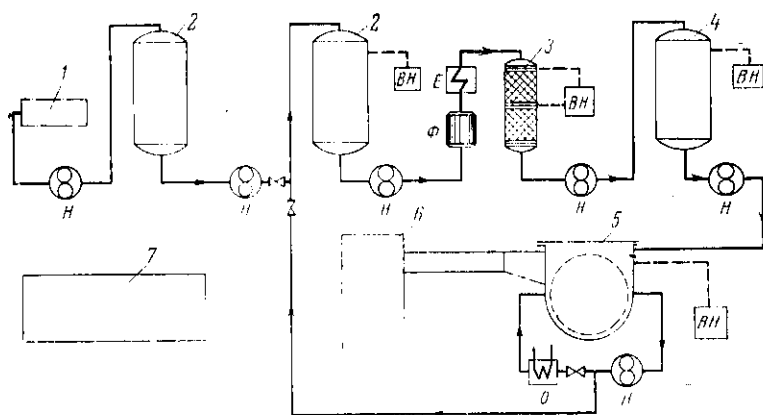


Рис. 6-8. Технологическая схема сушильно-пропиточного оборудования для высоковольтных кабелей фирмы «Артур Пфейффер».

1 — вагон-цистерна; 2 — необработанное масло; 3 — дегазация масла; 4 — дегазированное масло; 5 — сушильно-пропиточный котел; 6 — пресс для наложения оболочки; 7 — устройство для нагрева постоянным током; ВН — вакуумные насосы; Н — насосы для жидкостей; Е — нагреватель; О — охладитель; Ф — фильтр.

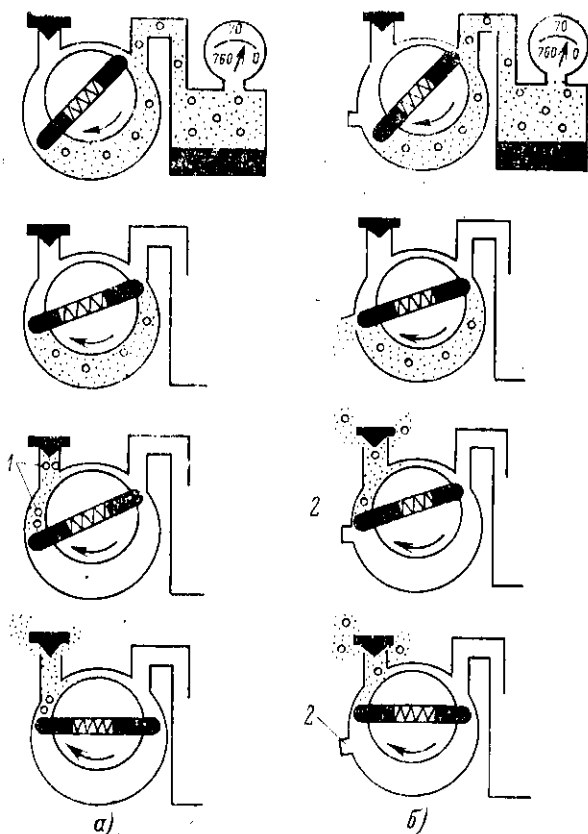


Рис. 6-9. Схема работы ротационно-масляных насосов.

а — без газобалластного устройства; *б* — с газобалластным устройством; 1 — частицы сконденсировавшейся влаги; 2 — балластное устройство.

да для конденсации отсасываемых водяных паров требуется низкая температура, в работу автоматически включается холодильная установка. Для сушки изоляции кабелей особо высокого напряжения агрегат «Вапортем-20» иногда дополняется диффузионным паромасляным насосом.

Для прокладки кабелей высокого напряжения в стальных трубах начинают применяться герметизированные контейнеры, в которых изолированные и пропитанные жилы подаются непосредственно к месту их прокладки в трубы. В этом случае отпадают процессы наложения

временных свинцовых оболочек и снятия их при монтаже кабеля, что одновременно повышает качество изоляции за счет исключения повреждения и загрязнения поверхности изоляции, которые возможны при снятии временных свинцовых оболочек.

Глава седьмая

КАБЕЛЬНЫЕ ОБОЛОЧКИ И ЗАЩИТНЫЕ ПОКРОВЫ

7-1. ХАРАКТЕРИСТИКА СВИНЦА И СВИНЦОВЫХ СПЛАВОВ

До последнего времени значительная часть силовых кабелей поверх изоляции покрывается свинцовой или алюминиевой оболочкой. Помимо защиты изоляции от механических повреждений основное назначение этих оболочек — предохранять изоляцию от попадания в нее влаги.

Свинец принадлежит к числу весьма тяжелых металлов (его плотность $11\,340\text{ кг/м}^3$). Температура плавления свинца равна $327,4^\circ\text{C}$, температура кипения 1560°C . Прочность на разрыв литого свинца около $9,5\text{ МПа}$, вальцованного $8,5\text{—}17\text{ МПа}$ и тянутого $21\text{—}23\text{ МПа}$. Помимо малой механической прочности свинец обладает значительной текучестью, с чем приходится считаться при вертикальных прокладках кабелей в голой свинцовой оболочке. Эта текучесть увеличивается с повышением температуры.

Нормальный электрохимический потенциал свинца равен минус $0,13\text{ В}$, и вследствие этого свинец обладает малой химической активностью и высокой коррозионной стойкостью.

Крупным недостатком свинцовых оболочек является их малая стойкость против вибрационных нагрузок, особенно при повышенных температурах. Вибрационная стойкость значительно уменьшается, если свинец находится в напряженном (натянута) состоянии.

Вибрационную стойкость свинцовых оболочек можно повысить, если применять не чистый свинец, а его сплавы, которые обладают более высокими механической прочностью и вибрационной стойкостью, а также меньшей текучестью.

В мировой практике применяется большое количество различных свинцовых сплавов. Значительная часть их относится к двойным сплавам: $\text{Pb} + (0,2; 0,5; 0,7; 0,85\text{ и}$

1,0%) Sb; Pb + (0,04; 0,06; 0,08%) Cu; Pb + (0,04 и 0,06) Te и пр.

Большую группу составляют также тройные сплавы: Pb + (0,2 или 0,4—0,45%) Sn + (0,1 или 0,2%) Sb; Pb + + 0,075% Cd + 0,2% Sn; Pb + (0,04—0,05%) Cu + 0,5% Sb и пр.

Имеется также некоторое количество сплавов свинца с небольшими присадками Sn, As, Bi, Cd. Двойные, тройные и четырехкомпонентные сплавы отличаются высокими механическими характеристиками, во много раз превосходящими свойства обычного свинца.

В СССР для кабелей связи применяются сплавы с 0,5—0,8% сурьмы. В соответствии с новым ГОСТ на силовые кабели с вязким и пестекающим пропиточными составами свинцовые оболочки этих кабелей могут содержать следующие присадки: сурьмы до 0,8%, теллура до 0,05% и меди до 0,05%. Свинцовые оболочки кабелей марок АСГ и СГ должны содержать присадку сурьмы в количестве 0,3—0,45% и теллура 0,03—0,05%. Кроме того, допускается присадка меди до 0,08%. Кабели, предназначенные для транспортирования на расстоянии более 5000 км, должны содержать присадку сурьмы в количестве 0,5—0,8%.

По обоснованным требованиям потребителей свинцовые оболочки силовых кабелей могут содержать в определенном количестве присадки сурьмы и теллура или сурьмы, олова и меди.

Упрочняющийся со временем сплав Pb и Sb отличается также хорошей вибростойкостью, но склонен к текучести и при температурах несколько выше 100 °С приобретает крупнокристаллическое строение.

Существенным недостатком свинца является его высокая плотность, из-за чего масса свинцовых оболочек составляет 40—50% массы кабеля.

К числу других недостатков свинца следует отнести его подверженность электрохимической коррозии, так что свинцовые оболочки часто разрушаются от блуждающих токов. Имеются свидетельства того, что на свинец разрушающе влияет, а также проявляет себя как катализатор коррозии фенол, который иногда может присутствовать в некоторых количествах в компаундах, применяемых для пропитки защитных покровов. Однако исследованиями установлено, что основной причиной химической коррозии свинцовых оболочек кабелей, про-

ложенных в земле, является агрессивность некоторых (кислых) почв, содержащих органические (гуминовые) кислоты, действующие на свинец. Наличие фенола в этом случае может усиливать процесс коррозии.

7-2. ХАРАКТЕРИСТИКА АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК

Свинец весьма дефицитен и дорог. Его основным заменителем является алюминий, который в сравнении со свинцом обладает рядом преимуществ. Так, плотность литого алюминия составляет 2640 кг/м^3 , а тянутого и вальцованного 2700 кг/м^3 , т. е. он более чем в 4 раза легче свинца и в то же время имеет более высокие механические характеристики и вибростойкость.

К числу основных недостатков алюминия следует отнести большие технологические трудности наложения на кабель алюминиевых оболочек и его малую устойчивость против электрохимической коррозии, что объясняется высоким нормальным отрицательным потенциалом алюминия, равным $-1,67 \text{ В}$. Коррозия алюминия, как и других металлов, обладающих значительным отрицательным потенциалом, сводится по существу к вытеснению из среды (растворов), с которой соприкасается алюминий, ионов водорода и переходу самого алюминия в виде ионов в раствор.

Коррозионная стойкость чистого алюминия весьма значительно увеличивается с уменьшением в нем количества примесей.

На воздухе алюминий очень быстро покрывается пленкой из Al_2O_3 , которая защищает его от дальнейшего окисления. Поэтому алюминий устойчиво ведет себя в таких средах, которые способствуют образованию этой пленки или не разрушают ее (азотная кислота, хромпик и т. п.), но в тех средах, которые вызывают разрушение оксидной пленки (щелочи, хлористый натрий, ряд кислот и т. п.), коррозия алюминия протекает весьма интенсивно. Если кабель в голой алюминиевой оболочке проложить в земле, результаты коррозии проявятся очень скоро. Поэтому кабели с алюминиевыми оболочками должны защищаться особо стойкими против гниения защитными покровами, которые, кроме того, не должны пропускать к оболочке влагу, при наличии которой возникает электрохимическая коррозия.

7-3. ТОЛЩИНЫ СВИНЦОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК

Толщины свинцовых и алюминиевых оболочек силовых кабелей и кабелей связи напряжением до 35 кВ включительно определяются из соображений механической прочности, технологии изготовления и учета размера деформации оболочек при изгибе кабелей. Номинальная толщина оболочек Δ устанавливается в зависимости от диаметра кабеля под оболочкой d_k . Для большинства кабелей эта зависимость может быть выражена уравнением

$$\Delta = k + f d_k. \quad (7-1)$$

Практически входящие в (7-1) коэффициенты для свинца равны:

$$k = 0,6 \div 1,7 \text{ мм и } f = 0,02 \div 0,04 \text{ мм.}$$

В ГОСТ 18410-73 для силовых кабелей размер Δ установлен в следующих пределах:

$$\Delta = (0,75 \div 1,1) + (0,022 \div 0,029) d_k.$$

Толщина алюминиевых оболочек примерно равна:

$$\Delta = (0,75 \div 0,85) + 0,022 d_k.$$

Если кабельные оболочки работают при повышенном внутреннем давлении (маслонаполненные кабели низкого и среднего давления, газонаполненные кабели и т. п.), то приближенно механическое напряжение в любом месте вдоль оболочки может быть определено с помощью уравнения

$$\sigma_1 = P d_k / (2\Delta).$$

Сила N , растягивающая оболочку в продольном направлении, равна:

$$N \approx P \pi d_k^2 / 4,$$

напряжение оболочки в этом направлении

$$\sigma_2 = \frac{N}{F} = \frac{P \pi d_k^2}{4 \pi (d_k + \Delta) \Delta} \approx \frac{P d_k}{4 \Delta}.$$

Таким образом, если оболочка не усилена извне упрочняющими покровами, она более напряжена и разрывается под действием внутреннего давления вдоль оси кабеля, что и подтверждается экспериментальными дан-

ными и практикой. Поэтому свинцовые и алюминиевые оболочки, находящиеся под внутренним давлением, упрочняются дополнительными покровами, например обмоткой твердокатаной медной лентой. В этом случае оболочки могут разорваться и от внутреннего давления только по кольцеобразному сечению. Наличие упрочняющих покровов учитывается коэффициентом $k_{\text{ц}}$, который можно принимать в зависимости от типа и конструкции этих покровов в пределах 1,2—1,5. Запас прочности при ориентировочных расчетах свинцовых и алюминиевых оболочек обычно принимается в пределах 5—8. Предел прочности свинца при растяжении можно считать равным 10 МПа и алюминия 60—70 МПа.

Таким образом, определение толщины металлических оболочек с внутренним давлением может быть приближенно определено с помощью уравнения

$$\Delta = Pd_{\text{к}}(5+8)/(4k_{\text{ц}}\sigma), \quad (7-2)$$

где σ — предел прочности при растяжении соответствующего металла.

Кроме того, оболочки испытывают напряжение при изгибах кабеля. Это напряжение приближенно определяется уравнением

$$\sigma_{\text{изг}} = \pm Ed_{\text{к}}/D_{\text{изг}},$$

где E — модуль упругости, равный для свинца $1,7 \times 10^4$ МПа и для алюминия $6,7 \cdot 10^4$ МПа;

$D_{\text{изг}}$ — диаметр дуги по оси кабеля, на которую он изогнут;

$d_{\text{к}}$ — диаметр кабеля под металлической оболочкой.

Таким образом, напряжение в металлических оболочках от внутреннего давления и при изгибах пропорционально диаметру кабеля, чем и объясняется приведенная выше зависимость толщины свинцовых оболочек от диаметра. Алюминий обладает значительно более высокой прочностью, однако на практике у нас и за рубежом толщина алюминиевых оболочек пока принимается близкой к толщине свинцовых оболочек, так как возникающие при изгибах напряжения в алюминиевых оболочках в 4 раза больше, чем у свинцовых. Повышение гибкости алюминиевых оболочек и снижение их толщины достигается гофрированием.

Сущность гофрирования заключается в обкатке алюминиевой оболочки, наложенной на кабель с некоторым

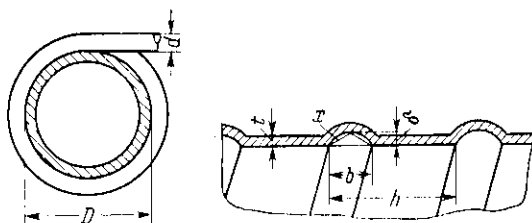


Рис. 7-1. Конструкция гофрированной несимметричной гармониевидной оболочки.

зазором, для придания оболочке профиля, у которого обжатые участки чередуются с выпуклыми. При гофрировании выпуклые участки не нагартовываются, поэтому при изгибах деформация оболочки осуществляется в основном за счет этих участков, которые подвергаются растяжению и несколько выпрямляются.

Существует несколько типов профилей гофра. Среди них для кабельной промышленности наибольший интерес представляют гармониевидные и синусоидальные гофры.

Для алюминиевых оболочек наиболее подходящим является гармониевидный профиль гофра (рис. 7-1).

В настоящее время приняты следующие примерные параметры профиля гофра (рис. 7-1):

$$h \approx 20t \text{ и } \eta = b/h \approx 0,40.$$

Профиль гофров алюминиевой оболочки зависит от минимально допустимого радиуса изгиба, который можно характеризовать отношением

$$n = D/d_{об},$$

где D — диаметр окружности, вокруг которой происходит изгиб кабеля;

$d_{об}$ — диаметр кабеля по оболочке.

При таком изгибе удлинение одного витка

$$\Delta l = \pi(D + 2d_{об}) - \pi(D + d_{об}) = \pi d_{об}.$$

Если для упрощения расчетов принять профиль выпуклого элемента за треугольник, то при полном выпрямлении каждый элемент гофра даст удлинение, равное

$$\Delta l_{эл} = 2x - b.$$

Для компенсации удлинения при изгибе одного витка вокруг диаметра D потребуется число витков

$$k = \Delta l / \Delta l_{\text{ол}} = \pi d_{\text{об}} / (2x - b);$$

с другой стороны,

$$k = \pi(D + d_{\text{об}}) / h.$$

Отсюда

$$(D + d_{\text{об}}) / d_{\text{об}} = h / (2x - b).$$

Из рис. 7-1 нетрудно установить, что

$$x = \sqrt{\delta^2 + b^2 / 4}$$

или

$$\delta = \frac{h \sqrt{1 + 2\eta(n+1)}}{2(n+1)}. \quad (7-3)$$

Эта формула дает только примерную зависимость высоты гофра от его шага и минимально допустимого радиуса изгиба кабеля.

Исследования показали, что после нескольких изгибов кабелей вокруг диаметра, для которого $n < 30$, иногда наблюдается разрушение алюминиевой гофрированной оболочки.

Возможно, что принятое выше условие полного распрямления выпуклой части профиля («горбика») является слишком жестким, так как наблюдается повышенное механическое напряжение в местах перехода выпуклой части гофра в выпрямленную часть. Необходима тщательная экспериментальная проверка и соотношения $h = 20t$, так как шаг гофра должен зависеть не только от толщины алюминиевой оболочки, но и от ее диаметра.

7-4. СВИНЦОВЫЕ ПРЕССЫ

Существуют два основных вида свинцовых прессов: вертикальные и прямочные (непрерывного действия). Последние имеют ряд преимуществ перед прессами прерывного действия и успешно эксплуатируются на ряде кабельных заводов.

А. Вертикальные прессы периодического действия

Вертикальные прессы конструируются с литой рамой с емкостью рабочего цилиндра 300—1000 кг. Наибольшее распространение получили у нас свинцовые прессы емкостью рабочего цилиндра 600—650 кг (полезная емкость

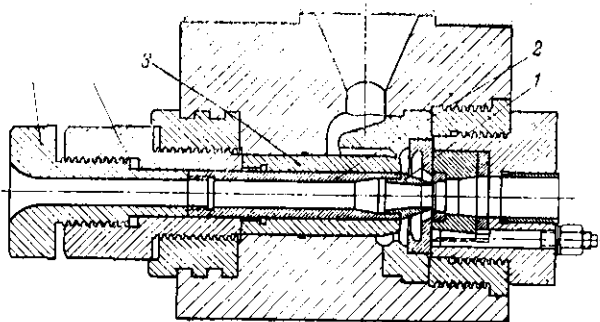


Рис. 7-2. Конструкция рабочей головки вертикального свинцового пресса.

1 — дорн; 2 — дорнодержатель; 3 — втулка; 4 — упорная гайка дорнодержателя; 5 — упорная часть втулки.

550—600 кг). При выпрессовывании поток свинца, поступающий из рабочего цилиндра в головку, изменяет свое направление на угол 90° и, проходя между дорном и матрицей, образует оболочку вокруг кабеля. Прессовая головка помещается непосредственно под рабочим цилиндром (рис. 7-2). Между дорном и матрицей помещается выравнивающее кольцо (рис. 7-3), способствующее выравниванию давления свинца по окружности между дорном и матрицей и получению равномерной толщины оболочки.

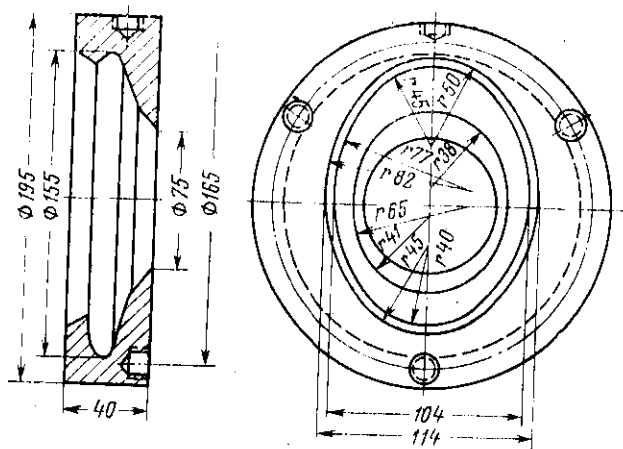


Рис. 7.3. Установочное кольцо для вертикального свинцового пресса.

Обогрев головки вертикальных прессов производится с помощью электрических нагревательных элементов, которые вставляются в нее с задней торцевой поверхности. Здесь же предусматриваются гнезда для установки термомпар.

Свинец из плавильной ванны заливается в рабочий цилиндр, который представляет толстостенный полый цилиндр, изготавливаемый из температуростойкой стали. В этот цилиндр запрессовывается толстостенная втулка из особо прочной и высококачественной стали, так как на нее непосредственно передается давление выпрессовываемого свинца. Между цилиндром и втулкой предусмотрены круговые каналы для нагрева (перед началом работы) и охлаждения (во время работы) цилиндра и содержащегося в нем свинца соответственно с помощью пара, масла или воды (рис. 7-4).

Гидравлический цилиндр помещается над рабочим цилиндром.

Этот цилиндр имеет верхнюю и нижнюю крышки. Для облегчения ра-

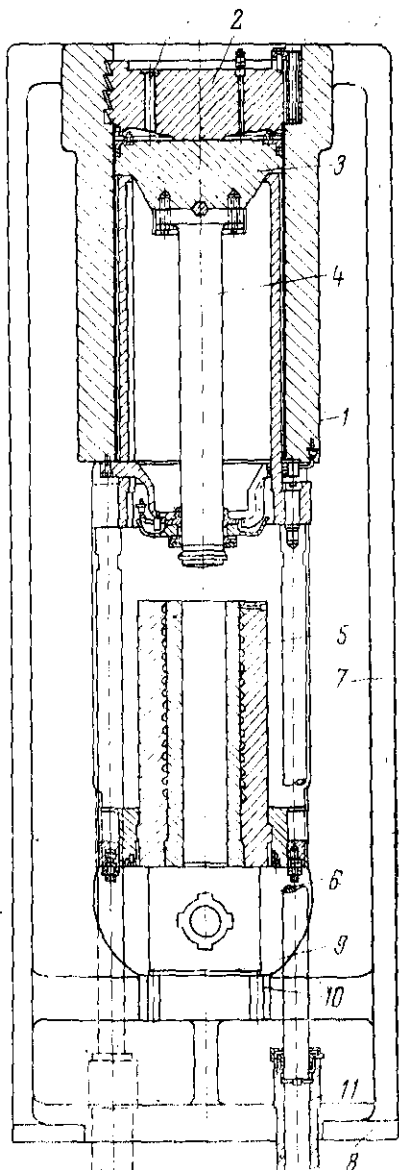


Рис. 7-4. Устройство вертикального свинцового пресса.

1 — гидравлический цилиндр; 2 — крышка гидравлического цилиндра; 3 — поршень; 4 — шток; 5 — рабочий цилиндр; 6 — чашка для сбора воды; 7 — станка; 8 — фундаментная плита; 9 — площадка для установки рабочей головки; 10 — места для болтов, крепящих рабочую головку; 11 — цилиндр обратного хода.

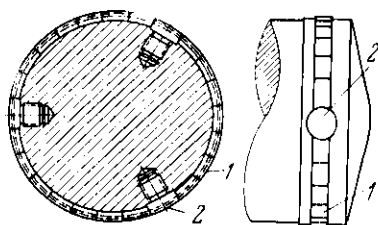


Рис. 7-5. Головки штока.

1 — бронзовые сухари; 2 — конусные пробки.

боты уплотняющих устройств внутрь гидравлического цилиндра вставляется медная рубашка, которая к тому же более устойчива против воздействия воды, чем сталь.

Шток изготавливается из цельной поковки. В нижней части штока имеется внутреннее отверстие диаметром примерно 140 мм и глубиной

180—200 мм с резьбой для ввинчивания головки штока, которая изготавливается из легированной стали.

Шток при выдавливании свинца подвергается изгибающим усилиям, поэтому большое значение имеет правильность его установки, чтобы избежать заклинивания штока в цилиндре. Для предупреждения этого явления и устранения трения его головки о стенку цилиндра на расстоянии около 25 мм от нижнего края делается клиновидная выточка, в которую вставляются бронзовые сухари, образующие бронзовое кольцо несколько большего диаметра, чем шток. Укрепляются эти сухари с помощью конусных пробок (рис. 7-5).

При обратном ходе штока вода под высоким давлением (до 40 МПа) начинает действовать на поршень цилиндра обратного хода и последний с помощью фасонной траверсы (рис. 7-4) создает обратное движение поршня основного цилиндра. Диаметр поршня обратного хода в прессах емкостью 600—650 кг составляет 130—145 мм, а усилие, которое действует на него, достигает 1—1,4 МН.

Вертикальные свинцовые прессы обычно обслуживаются одной и реже двумя электрическими плавильными ваннами. Емкость ванны должна быть в 6—7 раз больше емкости рабочего цилиндра. На поверхности расплавленного свинца быстро образуются его окислы. Для предотвращения попадания их в рабочий цилиндр при заливке свинца высота уровня расплавленного свинца должна быть не менее 500—700 мм. Температура свинца в плавильной ванне должна быть в пределах 400—440 °С.

При плавлении свинца возникает значительный угар. Кроме того, попадание окислов свинца существенно снижает надежность свинцовых оболочек. Уменьшение об-

разования окислов свинца может быть достигнуто применением специальных флюсов или с помощью герметизированных плавильных ванн.

Для работы свинцовых прессов применяются трехцилиндровые насосы горизонтального типа с давлением воды до 40 МПа и производительностью 35—80 л/мин. Все цилиндры работают одновременно, причем кривошипы их сдвинуты на угол 120° , благодаря чему вода поступает в трубопровод высокого давления непрерывно и равномерно.

Вертикальные прессы с емкостью рабочего цилиндра в 600—650 кг обычно обслуживаются двумя насосами среднего типа производительностью $(6,5—9) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, прессы емкостью в 300 кг — одним насосом производительностью $(10—13) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Производительность насоса Q определяется числом цилиндров k , площадью поршня F , м^2 , длиной хода поршня h , см; числом полных ходов поршня n в минуту и коэффициентом заполнения насоса η ($\eta=0,9$), т. е.

$$Q = \eta k \frac{F h n}{1000} \quad (7-4)$$

Давление штока на свинец $P_{\text{св}}$ и количество вытесняемого свинца $Q_{\text{св}}$ зависят от площади поршня F и площади штока f , давления воды в гидравлическом цилиндре P и количества воды, направленной в основной гидравлический цилиндр, $Q_{\text{ц}}$ ($Q_{\text{ц}} < Q$):

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{св}} &= PF/f; \\ Q_{\text{св}} &= 11,34 Q_{\text{ц}} f/F. \end{aligned} \right\} \quad (7-5)$$

Рабочую емкость цилиндра $q_{\text{раб}}$ можно определить с помощью уравнения

$$q_{\text{раб}} = 11,34 f h, \text{ кг.} \quad (7-6)$$

Б. Прямоточные свинцовые прессы

Прямоточные свинцовые прессы дают возможность накладывать на кабель любой строительной длины облоочки без шва и без остановочного знака, с повышенной равномерностью ее толщины по всей длине кабеля.

К числу первых конструкций таких прессов, которые за границей еще находят применение, относятся прямо-

точные прессы фирмы «Пирелли» с горизонтально расположенными внутри корпуса вращающимся шнеком и неподвижной трубой.

В СССР и за границей (Франция, Швеция, Голландия, скандинавские страны) широко применяются свинцовые прямоточные прессы конструкции фирмы «Хансон».

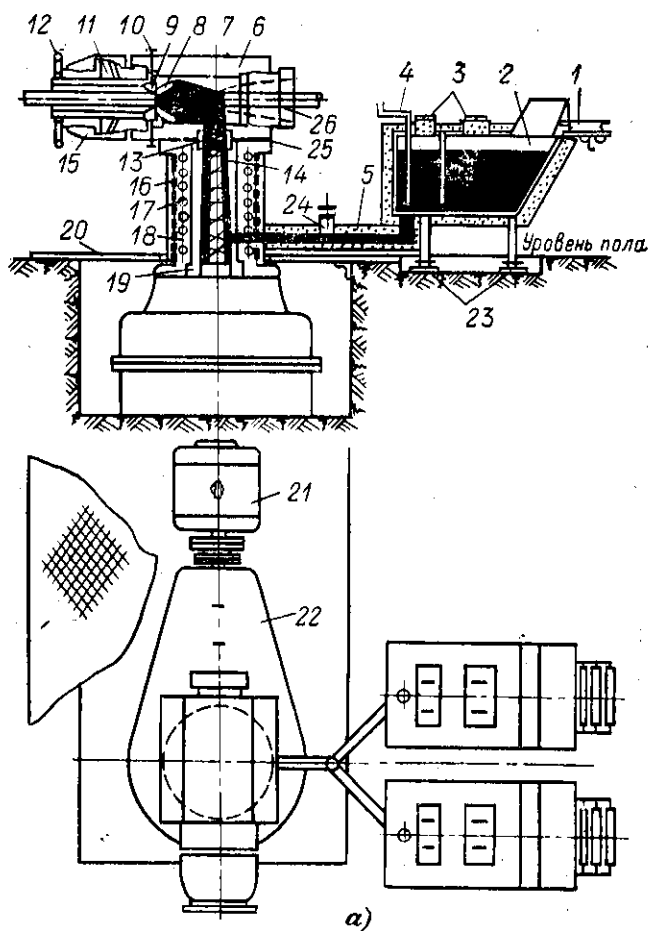
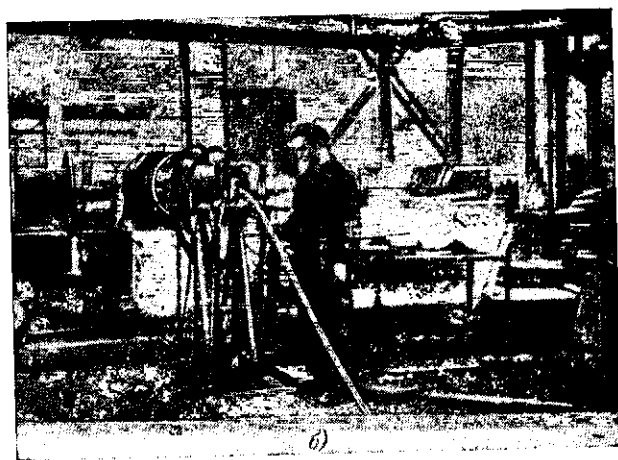


Рис. 7-6. Устройство прямоточного прессы
 а — схема прессы; 6 — общий вид; 1 — свинцовый слиток; 2 — ванна; 3 — крышки; втулка; 8 — дорн; 9 — матрица; 10 — радиальные болты; 11 — гидравлический плун гидравлического устройства; 16 — нагреватели; 17 — каналы охлаждения; 18 — на гатель; 22 — редуктор; 23 — катки; 24 — вентиль;

Робертсон». Эти прессы изготовляются нескольких типов, основные технические данные которых следующие:

Параметр	Пресс № 3	Пресс № 4	Пресс № 5
Диаметр выпрессовываемых оболочек, мм	5—64	8—90	10—115
Производительность пресса, кг/мин	25	35	55
Мощность привода, кВт	37	51	81
Мощность всех нагревательных устройств, кВт	190	200	215

В СССР применяются в основном прессы № 5. Вся установка состоит из пресса с электроприводом, двух плавильных ванн с электрическим подогревом и со свинцепроводом, системы охлаждения, отдающего и приемного устройства и пульта управления. Сам пресс с плавильной ванной (рис. 7-6) занимает производственную площадь, значительно меньшую, чем гидравлические прессы. Плавильная ванна емкостью около 7000 кг свинца состоит из двух секций, разделенных между собой перегородкой с окном внизу (рис. 7-6,а). Одна сек-



конструкции фирмы «Хансон-Робертсон».

4 — запорный вентиль; 5 — подводящая труба; 6 — корпус головки; 7 — фигурная жер; 12 — установочная гайка; 13 — установочное кольцо; 14 — шнек; 15 — корпус ружная втулка; 19 — внутренняя втулка; 20 — настил прямка; 21 — основной двн-
25 — асбестовая прокладка; 26 — задняя гайка.

ция служит для плавления свинца, во второй секции свинец поддерживается при определенной постоянной температуре. Из этой секции свинец по свинцепроводу поступает в рабочий цилиндр прессы. В отличие от прессов фирмы «Пирелли» стальной хромированный и отполированный шнек в этих прессах расположен вертикально. Он имеет слегка коническую форму (наружный диаметр нарезки у основания 175 мм и в верхней части 118 мм), длина части шнека с нарезкой составляет 940 мм, шаг нарезки 85 мм (глубина нарезки возрастает от 20 до 25 мм). Шнек может делать 4—16 об/мин.

По мере продвижения к прессовой головке свинец охлаждается водой, циркулирующей в винтовом канале внутри стенок рабочего цилиндра, и постепенно кристаллизуется. Чтобы свинец не проворачивался вместе со шнеком, на внутренней стенке рабочего цилиндра имеется 24 продольных канавки. В корпусе головки имеется предохранительное мембранное устройство. При достижении давления свинца 360 МПа установленная в устройстве пробка прорезает мембрану, дает выход свинцу и тем снижает его давление.

Установка толщины свинцовой оболочки и регулирование ее равномерности по сечению производятся с помощью имеющегося гидравлического устройства и четырех расположенных в разных местах фасонных болтов.

Однако описанные непрерывные прессы имеют и существенные недостатки, основными из которых являются значительно пониженная (в 2—3 раза) скорость прессования в сравнении с гидравлическими прессами и дополнительные трудности при прессовании свинцовых сплавов, имеющих значительно большую твердость в сравнении с чистым свинцом.

Основным недостатком гидравлических прессов является прерывистый процесс прессования (время прессования составляет около 40% продолжительности цикла), что связано с ухудшением качества оболочек в местах остановки и неравномерности толщины оболочек по сечению (примерно $\pm 0,15$ мм) и по длине оболочек (примерно $\pm 0,20$ мм).

В связи с этим значительный интерес представляет создание гидравлического прессы непрерывного действия, совмещающего преимущества червячных и гидравлических прессов. Среди ряда разработок таких прессов (фирма «Гловер», Англия, фирма «Гидравлик», ФРГ) нам

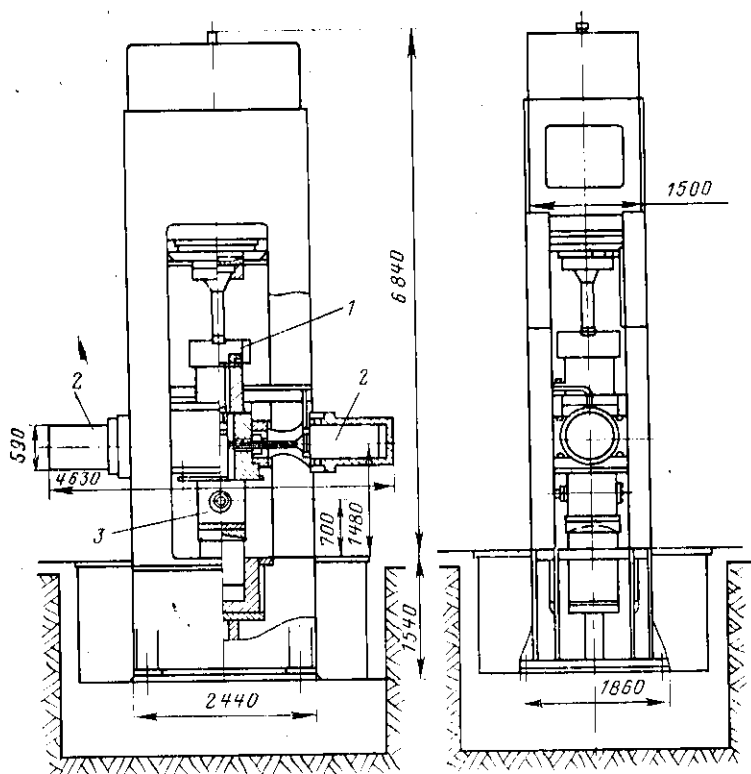


Рис. 7-7. Схема устройства гидравлического свинцового преса непрерывного действия марки KBK-1500 фирмы «Крупп».
1 — основной рабочий цилиндр; 2 — вспомогательные рабочие цилиндры; 3 — рабочая головка.

представляется наиболее интересным гидравлический пресс непрерывного действия марки KBK-1500 фирмы «Крупп» (ФРГ), общий вид которого приведен на рис. 7-7. Пресс имеет один главный рабочий цилиндр (контейнер) и два вспомогательных, штоки в которых работают синхронно между собой и попеременно со штоком главного цилиндра. Фирма «Крупп» при проектировании преса KBK-1500 приняла сравнительно небольшие скорости прессования (всего на 35% выше, чем на шнековых пресах непрерывного действия, и в 1,6 раза меньше, чем на обычных гидравлических пресах). Но и при таких скоростях, как показали расчеты, пресс KBK-1500 имеет

экономические преимущества перед шнековыми прессами фирмы «Хансон-Робертсон», в особенности при прессовании оболочек из сплавов свинца.

7-5. АЛЮМИНИЕВЫЕ ПРЕССЫ И ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НАЛОЖЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК

Наложение алюминиевых оболочек связано со значительными технологическими трудностями. Так, выпрессовывание алюминия производится при температуре прессовой головки около 500°C , т. е. при значительно большей, чем при выпрессовывании свинца. Алюминий по твердости значительно превосходит свинец, поэтому требует весьма высоких усилий прессования. В связи с этим для указанных целей значае приходилось применять алюминий повышенной чистоты ($\text{Al } 99,97\text{--}99,99\%$), обладающий более высокой пластичностью. Применение алюминия меньшей чистоты ($\text{Al } \geq 99,5\%$) стало возможным лишь после создания усовершенствованных конструкций прессов и проведения большой научно-исследовательской и экспериментальной работы. Рабочий инструмент пресса находится в тяжелых условиях, так как помимо повышенной температуры давление выпрессовывания алюминия значительно выше, чем свинца. При прессовании свинца оно обычно не превышает $390\text{--}540$ МПа.

У алюминиевых прессов фирмы «Шлеман» и у отечественных прессов последних конструкций оно составляет соответственно $620\text{--}775$ МПа.

Температура плавления алюминия значительно выше, чем у свинца, поэтому заливка расплавленного алюминия в рабочий цилиндр невозможна, так как она может приводить к чрезмерному нагреву прессового инструмента и изоляции кабеля. Кроме того, расплавленный алюминий разрушающе действовал бы на стенки рабочего цилиндра и прессовой головки. Поэтому в рабочий цилиндр обычно загружаются предварительно нагретые до $430\text{--}530^{\circ}\text{C}$ алюминиевые цилиндрические слитки, диаметр которых несколько меньше внутреннего отверстия цилиндра. Предварительный нагрев слитков производится в специальных электрических печах, причем загружаемые в печь слитки должны быть чистыми и сухими.

В настоящее время для наложения алюминиевых оболочек изготавливаются только горизонтальные прессы.

Одними из первых отечественных конструкций горизонтальных алюминиевых прессов являются мощные

прессы 2×50 МН. Такой пресс в целом представляет большое и сложное устройство, и его наиболее целесообразно использовать при наложении оболочек диаметром 30—100 мм. Пресс оборудован электрической нагревательной печью, из которой нагретые алюминиевые слитки длиной 500 и диаметром 254 мм (масса примерно равна 63,5 кг) по конвейеру поступают в рабочие цилиндры. Паспортная скорость опрессовывания кабеля диаметром 100 мм — 12 м/мин и диаметром 30 мм — 100 м/мин.

Большие успехи достигнуты по сокращению времени заправки прессов алюминиевыми слитками. В связи с этим появилась возможность значительно облегчить конструкции алюминиевых прессов путем уменьшения количества алюминия в рабочих цилиндрах и соответствующего снижения усилия прессования.

В этом отношении интерес представляют горизонтальные алюминиевые прессы немецкой фирмы «Шлеман», которые уже нашли широкое применение у нас и за границей (США, Франция, Чехословакия, ФРГ, Норвегия). Усилие прессования в этих прессах 2×16 МН, длина рабочих цилиндров около 440 мм и диаметр 180—185 мм. Алюминиевые слитки имеют соответственно несколько меньше размеры и массу 27,5 кг каждый. Производительность пресса около 740 кг/ч. Каждый пресс оборудован двумя электрическими печами для нагрева алюминиевых слитков мощностью 250 кВт и производительностью 550 кг/ч каждая.

Новосибирским заводом «Тяжстанкогидропресс» изготовлена серия алюминиевых горизонтальных прессов с усилием прессования 2×20 МН при удельном давлении прессования до 800 МПа.

Пресс предназначен для наложения оболочек диаметром 5—100 мм и толщиной 0,5—3,0 мм на кабели с пропитанной бумажной и пластмассовой изоляцией, а также на кабели связи со стирофлексной изоляцией из алюминия чистотой 99,5—99,7% со скоростью в зависимости от диаметра оболочки 12—80 м/мин.

Предусматривается, что температура рабочего цилиндра и прессовой головки у этого пресса должна быть $450 \pm 5^\circ\text{C}$, а нагрев кабелей в зоне прессовой головки во время остановок не должен превышать 180°C для пропитанной бумажной изоляции и 60°C для пластмассовой изоляции. Для этого в прессе должно быть предусмотрено описанное выше устройство, предотвращающее

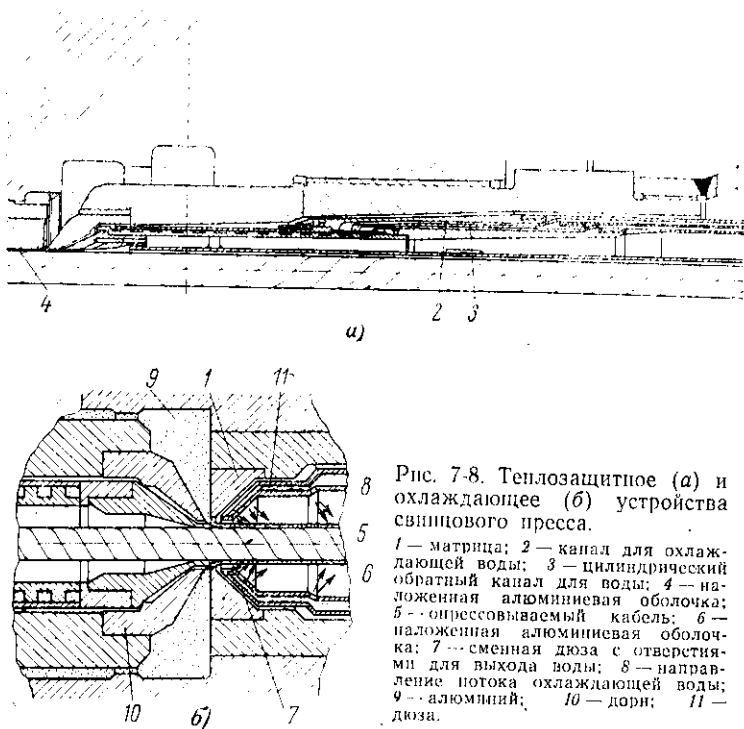


Рис. 7-8. Теплозащитное (а) и охлаждающее (б) устройства свинцового пресса.

1 — матрица; 2 — канал для охлаждающей воды; 3 — цилиндрический обратный канал для воды; 4 — наложенная алюминиевая оболочка; 5 — опрессовываемый кабель; 6 — наложенная алюминиевая оболочка; 7 — сменная дюза с отверстиями для выхода воды; 8 — направление потока охлаждающей воды; 9 — алюминий; 10 — дорн; 11 — дюза.

соприкосновение кабеля с нагретым корпусом головки пресса, а также приспособление для охлаждения водой алюминиевой оболочки внутри головки и по выходе из нее. В гидравлических цилиндрах вместо воды в этих прессах применяется маловязкое минеральное масло, которое одновременно является смазкой внутренней рабочей поверхности цилиндра.

Пресс оборудуется индукционной электрической печью, в которой обточенные алюминиевые слитки должны нагреваться так, чтобы перед загрузкой в рабочий цилиндр один конец слитка имел температуру около 500—530, а другой 400—430 °С, причем слиток загружается в рабочий цилиндр менее нагретой стороной, обращенной к штоку. Применение неравномерно нагретых слитков облегчает процесс выпрессовывания оболочек, так как в этом случае не требуется герметизации рабочего цилиндра с помощью специальной алюминиевой

шайбы и его вакуумирования, как это делается на других алюминиевых прессах при равномерном нагреве слитков. При прессовании неравномерно нагретых слитков воздух должен вытесняться из цилиндра алюминием, который в нижней части слитка будет плотно прилегать к стенке рабочего цилиндра.

Таким образом, та часть слитка алюминия, которая ближе к прессовой головке, нагревается примерно до 500°C ; примерно такую же температуру имеет и сама прессовая головка. Поэтому необходима самая эффективная защита изоляции опрессовываемого кабеля от воздействия высокой температуры.

Радикальным мероприятием, предохраняющим изоляцию от воздействия высокой температуры, являются теплозащитные устройства на входе кабеля в пресс и охлаждающее устройство на его выходе.

Теплозащитное устройство представляет собой трехстенную трубу, внутри которой циркулирует вода (рис. 7-8,а). На конце этого устройства имеется приспособление (шлиц), который поддерживает кабель внутри дорна без соприкосновения с последним. Между шлицем и дорном, а также между трубой и дорном имеется воздушный промежуток, значительно уменьшающий теплопередачу от головки пресса к теплозащитному устройству. Для исключения возможности конденсации паров влаги из воздуха и попадания ее в изоляцию кабеля температура циркулирующей воды поддерживается в пределах $30\text{—}50^{\circ}\text{C}$.

Охлаждающее душевое устройство, устанавливаемое на выходе, представляет собой двухстенную трубу, которая на конце имеет сменный инструмент-дюзу со 120 отверстиями для выхода охлаждающей воды. Эти отверстия сделаны так, что вода попадает только на наложенную алюминиевую оболочку, но не может попасть на матрицу (рис. 7-8,б). Для предупреждения чрезмерного охлаждения матрицы при длительных остановках в прессе имеется автоматическое устройство, благодаря которому при остановках и снижении удельного давления алюминия в рабочей головке ниже 500 МПа вместо воды в душевое устройство начинает поступать воздух.

При прессовании алюминиевых оболочек давление у дорна и матрицы составляет около 350 МПа , а температура алюминия и этого инструмента около $450\text{—}480^{\circ}\text{C}$. При прессовании свинцовых оболочек эти величины при-

мерно равны 150 МПа и 230—240 °С. Поэтому, если в свинцовых прессах дорн и матрица обычно работают длительное время, в алюминиевых прессах дорн и матрица довольно быстро изнашиваются, несмотря на изготовление этих деталей из высококачественных легированных сталей. Для увеличения срока службы целесообразно перед установкой в головку пресса смазывать рабочую поверхность дорна и матрицы графитной смазкой, что уменьшает также адгезию алюминия к стали.

Особенностью технологии наложения алюминиевых оболочек является также необходимость осевого перемещения дорна или матрицы в момент остановки пресса. При прессовании свинцовых и алюминиевых оболочек повышенное давление металла увеличивает расстояние между дорном и матрицей. Такое положение инструмента является рабочим, оно определяет толщину выпрессовываемой оболочки. При уменьшении давления происходит сближение дорна и матрицы и, следовательно, уменьшение толщины оболочки. Минимальная толщина оболочки получается при полном снятии давления. На оболочке в этот момент образуется остановочный знак, так называемое «бамбуковое кольцо». При прессовании алюминия давление у дорна и матрицы значительно больше, чем при прессовании свинца. Поэтому уменьшение толщины алюминиевых оболочек происходит в значительно больших размерах, чем свинцовых оболочек, и толщина их у «бамбуковых колец» выходит за пределы, нормированные стандартами.

Поэтому алюминиевые presses современных конструкций снабжаются храповым устройством, которое автоматически изменяет расстояние между дорном и матрицей

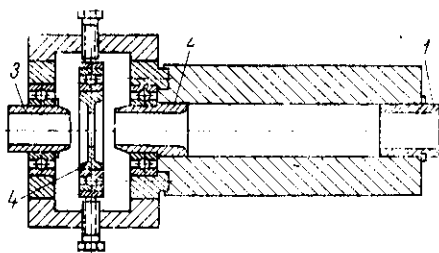


Рис. 7-9. Кольцевой инструмент для гофрирования алюминиевых оболочек.

1—3 — текстолитовые втулки; 4 — сменное стальное кольцо.

при снятии или подъеме давления алюминия в рабочей головке. Для получения на горизонтальных алюминиевых прессах оболочек равномерной толщины необходимо, чтобы движение обоих штоков и давление алюминия в цилиндрах было одинаковым. Это достигается с помощью особой системы синхронизации, которая регулирует движение штоков и давление алюминия в рабочей головке.

Гофрирование алюминиевых оболочек можно производить с помощью разъемных плашек или зубчатых шестерен и роликов, а также с помощью кольцевого инструмента.

Наиболее технологичным для гофрирования алюминиевых оболочек является кольцевой инструмент (рис. 7-9), который применяется в СССР и за рубежом. Этот инструмент дает возможность гофрировать алюминиевые оболочки разных диаметров и различного профиля. Сменными деталями здесь являются стальное гофрирующее кольцо 4 и текстолитовые втулки 1—3.

Гофрирование алюминиевых оболочек совмещается с процессом их прессования, причем все оборудование для гофрирования располагается на выходной стороне пресса вслед за охлаждающим устройством. Алюминиевая оболочка должна накладываться в этом случае не плотно, а с определенным зазором. Для этой цели удобно применять дорн с удлиненной цилиндрической частью, причем этот конец дорна должен заходить внутрь матрицы на 1—2 мм.

Смещением гофрирующего кольца с помощью имеющихся в устройстве винтов устанавливается нужная глубина впадины гофра.

Повышенная гибкость гофрированных оболочек позволила начать выпуск отдельных типов кабелей с гофрированными стальными оболочками. Для изготовления таких оболочек обычно применяются холоднокатаные ленты из малоуглеродистой стали. Наложение таких оболочек производится на специальном агрегате, причем продольно располагаемая стальная лента формируется в оболочку (трубку) с перекрытием кромок. После сварки стальной оболочки тем или иным способом кабель поступает во вращающееся гофрирующее устройство. Так как сталь обладает значительно большей твердостью, чем алюминий, профиль стальных оболочек отличается от профиля алюминиевых оболочек. Исследованиями установлено, что у стальных оболочек хорошие результа-

ты дает применение спирального синусоидального гофра. Повышенная прочность стали позволяет для кабелей диаметром 15—76 мм применять стальные оболочки толщиной 0,3—0,5 мм.

Стальные гофрированные оболочки целесообразно защищать от коррозии шлангом из поливинилхлорида или полиэтилена или покрывать их другими надежными защитными покровами.

7-6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА НАЛОЖЕНИЯ СВИНЦОВЫХ ОБОЛОЧЕК

А. Освинцевание силовых кабелей на напряжения 1—35 кВ на гидравлических прессах

Расплавленный свинец заливается в рабочий цилиндр. Окислы удаляются специальным ножом с гидравлическим приводом или вытесняются в специальную насадку. Свинец далее должен выдерживаться некоторое время для снижения температуры в рабочем цилиндре до 100—130 °С и в прессовой головке до 160—230 °С (чем больше диаметр оболочки, тем ниже должна быть температура свинца). Особое внимание здесь необходимо обращать на точное соблюдение температурного режима. Между скоростью выпрессования v , давлением около дорна и матрицы P и температурой свинца существует следующая примерная зависимость:

$$v = BP^{\alpha}. \quad (7-7)$$

Для чистого свинца $\alpha = 5,3$, т. е. увеличение давления на 10% вызывает увеличение скорости выпрессования более чем на 60%.

Кроме того, коэффициент B зависит от температуры, и в зоне, где температура равна 150 °С, увеличение температуры на 40 °С вызывает увеличение этого коэффициента в 10 раз. То же, но в меньшей степени, имеет место и при наложении алюминиевых оболочек. Таким образом, одновременное изменение давления и температуры будет приводить к весьма значительному изменению режима прессования.

Внутренний диаметр дорна должен быть в зависимости от диаметра кабеля больше последнего на 1,0—3,5 мм, чтобы кабель свободно проходил внутри дорна. Поэтому необходимо, чтобы по выходе из пространства между дорном и матрицей происходила так называемая

«внеконтактная» деформация оболочки, при которой, имело бы место уменьшение ее наружного и внутреннего диаметров. Это достигается соответствующим направлением потока металла по выходе из канала и взаимным расположением дорна и матрицы (рис. 7-10).

В процессе опрессовывания кабеля толщина оболочки может уменьшаться и выходить за пределы допусков при наладке. Поэтому при заправке нового конца кабеля необходимо производить повторное измерение оболочки.

Изменение толщины свинцовой оболочки происходит вследствие уменьшения давления свинца по мере его выпрессовывания, что вызывает некоторое сближение матрицы и дорна. Кроме того, на толщину оболочки влияет изменение температуры прессовой головки и выпрессовываемого свинца.

Наконец, как уже указывалось, отрицательно сказывается снятие давления на свинец во время остановки пресса. Поэтому в современных устройствах перед остановкой пресса матрица автоматически несколько отодвигается от дорна и таким образом существенно увеличивается толщина оболочки. После заливки свинца и пуска пресса матрица с помощью этого же приспособления ставится в свое прежнее положение.

Б. Особенности технологического процесса освинцевания маслonaполненных и газонаполненных кабелей на гидравлических прессах

Для освинцевания маслonaполненных кабелей рекомендуется применять прессы с герметизированными плавильными ваннами. При работе с открытыми ваннами освинцевание производится через 1—2 суток после очистки ванны. Освинцевание обычно производят, загружая в ванну медистый свинец, получаемый с заводов цветной

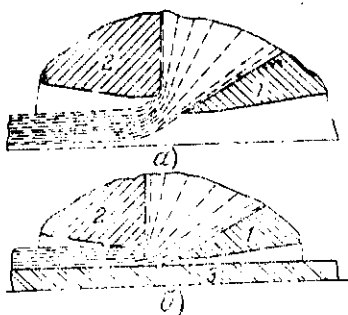


Рис. 7-10. Относительное расположение дорна и матрицы.

а — при выпрессовании одной оболочки; б — при наложении оболочки на кабель; 1 — дорн; 2 — матрица; 3 — кабель.

металлургии в виде слитков, содержащих медь в количестве 0,05—0,08%. В последнее время при изготовлении маслонеполненных кабелей все большее внимание уделяется тройным сплавам.

При наложении свинцовой оболочки на кабели диаметром выше 70 мм приходится принимать специальные меры борьбы с боковыми утолщениями оболочки и образованием гофров. Основными мероприятиями в этом случае являются: увеличение времени выдержки свинца после заливки его в рабочий цилиндр до 10—15 мин, понижение температуры головки до 155—165 °С и установка эллипсного кольца без карманов и с уменьшенным горизонтальным размером выточки.

При наложении свинцовой оболочки на маслонеполненные кабели необходимо обеспечить заполнение зазора между свинцовой оболочкой и изоляцией дегазированным маслом. Это заполнение производится путем подачи масла насосом от дегазатора в прессовую головку, снабженную каналами для прохода масла непосредственно к прессовому инструменту.

В. Особенности технологии наложения свинцовых оболочек на прессах непрерывного действия

При подготовке пресса к работе необходимо включить обогрев рабочей головки, цилиндра и свинцового провода и довести пусковую температуру этих узлов пресса соответственно до 295—300, 340—360 и 420—430 °С. После этого пускаются насос для подачи масла в редуктор главного двигателя и насос системы водяного охлаждения рабочего цилиндра. Вначале рабочий шнек вращается с небольшой частотой (3,0—4,0 об/мин). Температура рабочего цилиндра при этом снижается на 20—30 °С, и начинается выпрессовывание свинцовой оболочки. С увеличением частоты вращения шнека, которая в рабочем режиме составляет примерно 10 об/мин, температура рабочего цилиндра еще несколько снижается. Линейная скорость выпрессовывания оболочки на этих прессах в зависимости от диаметра оболочки составляет примерно 10—30 м/мин.

Как только будет достигнута рабочая скорость прессования, нужно производить проверку толщины оболочки и ее равномерности по сечению. Разностенность оболочки должна быть не более 0,05 мм. Изменение толщины оболочки производится перемещением матрицы относи-

тельно дорна с помощью ручного масляного насоса, а устранение разнотенности оболочки — соответствующим перемещением матрицы с помощью регулировочных болтов. Все эти операции производятся без остановки процесса прессования.

7-7. ЗАЩИТНЫЕ ПОКРОВЫ И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ИХ НАЛОЖЕНИЯ

Накладываемые поверх металлических или пластмассовых оболочек защитные покровы состоят из внутреннего покрова (подушки), ленточной и проволоочной брони и наружного покрова.

Нормальный наружный покров состоит из слоя битумного состава, пропитанной кабельной или стекловолоконной пряжи (из штапельного волокна), второго слоя битумного состава и покрытия, предохраняющего кабель от сгибания витков на барабане. В некоторых наружных покровах применяются только стеклянная пряжа из штапельного волокна и негорючие пропитывающие и покровные составы (в соответствии с ГОСТ 7006-72 этот наружный покров имеет марку «и»).

Внутренний покров (подушка) обычно состоит из слоя битумного состава, битуминированной кабельной бумаги, второго слоя битумного состава (пропитанной кабельной пряжи) и третьего слоя битумного состава. Ввиду высокой стоимости кабельная пряжа в подушке всех типов защитных покровов с ленточной броней обычно заменяется двумя лентами пропитанной кабельной бумаги. В наружных покровах такая замена недопустима, так как здесь битумная пропитка из покровов легко выщелачивается и они быстро разрушаются.

Алюминиевые оболочки должны быть надежно защищены от воздействия влаги. Поэтому для этих кабелей применяется подушка усиленной конструкции, состоящая из обмотки бумажной лентой, двух лент поливинилхлоридного, полиэтиленотерфталатного или полиамидного пластика, накладываемых с 20%-ным положительным перекрытием, одной ленты пропитанной кабельной бумаги и второго слоя битумного состава (по ГОСТ 7006-72 марка «л»).

Стальная лента покровов типа БГ и БГв должна иметь предварительно нанесенное противокоррозионное цинковое покрытие.

С 1 января 1975 г. на защитные покровы будет распространяться новый ГОСТ 7062-72. В этом стандарте каждая новая конструкция подушки или защитного покрова (кроме обычных, описанных выше конструкций) имеет свое буквенное обозначение. Так, подушки с двумя слоями пластмассовых лент имеют маркировку «2л»; если помимо пластмассовых лент в подушке предусматривается наличие выпрессованного поливинилхлоридного или полиэтиленового шланга, такие подушки маркируются соответственно буквами «в» или «п». Аналогичные маркировки предусматриваются и для нескольких новых конструкций наружных покровов (при наличии в покрове пластмассовых лент и выпрессованного шланга из полиэтилена или поливинилхлорида марки соответственно «Шп» и «Шв»). Маркировка покрова в целом предусматривает маркировку подушки, брони и защитных покровов, поэтому в ряде случаев она получается многобуквенной, так как количество типов покровов и в связи с этим марок силовых кабелей резко увеличилось.

Наложение стальных лент на кабели диаметром менее 13 мм связано со значительными технологическими трудностями (перекрутка кабеля стальной лентой). Поэтому очень часто вместо брони из стальных лент толщиной 0,3 мм применяется броня из стальных оцинкованных проволок диаметром 1,4—1,8 мм, что только повышает качество защитных покровов.

Ввиду дефицитности плоской провололочной брони она часто заменяется броней из круглых оцинкованных проволок диаметром 1,4—4,0 мм. Кабельная пряжа и бумага сравнительно быстро разрушаются под действием микроорганизмов. Поэтому они предварительно пропитываются противогнилостным составом, содержащим не менее 4% нафтената меди.

Бронеленты обычно накладываются в два слоя с зазором в 20—40% ширины ленты, причем верхняя лента

примерно своей серединой должна закрывать зазор между витками нижней ленты. Если принять, что D — диаметр кабеля по внутренней подушке, δ — толщина брони, h — длина шага обмотки

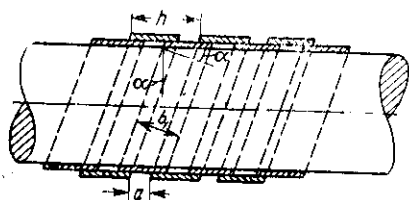


Рис. 7-11. Схема наложения ленточной брони на кабель.

броневой ленты (под шагом здесь понимается то же самое, что и при обмотке бумажными лентами), α_1 и α_2 — углы подъема первого и второго повивов бронеленты, b_1 и b_2 — ширина ленты первого и второго повивов и a — зазор между соседними витками брони (рис. 7-11), то нетрудно вывести следующие зависимости:

$$a = h - b_1 / \cos \alpha_1 = h - b_2 / \cos \alpha_2; \quad (7-8)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = h / \pi (D + \delta); \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = h / \pi (D + 3\delta).$$

Если считать $a = h/4$, то получаем:

$$b_1 = 0,75h \cos \alpha_1 \quad \text{и} \quad b_2 = 0,75h \cos \alpha_2, \quad \text{и так как} \quad \cos \alpha_1 < \cos \alpha_2, \quad \text{то} \quad b_2 > b_1.$$

Пренебрегая разницей между b_1 и b_2 (на практике $b_1 = b_2$), без большой погрешности можно написать:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = \operatorname{arctg} \frac{h}{\pi(D + 2\delta)} \quad (7-9)$$

и

$$b_1 = b_2 = b = 0,75h \cos \alpha = 0,75\pi(D + 2\delta) \sin \alpha. \quad (7-10)$$

На основании приведенных формул, задавшись шагом, можно определить ширину броневой ленты b и угол ее подъема α ; точно так же при заданной ширине ленты можно найти угол α и шаг h .

Чем шире ленточная броня, тем, естественно, гибкость кабеля будет меньше, а производительность бронировочных машин выше.

При бронировании кабелей круглой и сегментной проволоочной броней имеют место такие же соотношения, что и в схеме скрутки проволок в жилу. Здесь нужно только учитывать, что шаг скрутки бронепроволок обычно значительно меньше, чем шаг скрутки медных проволок в жилу, и поэтому сечение проволок плоскостью, перпендикулярной к оси кабеля, будет примерно эллипсом, большая ось которого равна:

$$d_1 = d / \sin \alpha = (1 + k) d,$$

где d — диаметр проволоки;

α — угол ее подъема.

Для сегментнообразной проволоки соответственно

$$b_1 = b / \sin \alpha = (1 + k) b,$$

где b — ширина проволоки.

Если круглые проволоки диаметром d навиваются с шагом h на цилиндрическое основание диаметром D ,

то число этих проволок n определяется уравнением

$$n = \pi(D + d)/(1 + k)d, \quad (7-11)$$

где $k = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{m} \right)^2$; $m = h/(D + d)$.

Проволочная броня накладывается с шагом, для которого $m = 8 \div 15$. Если принять для круглой брони $m = 12$ и для сегментной $m' = 10$, то

$$n = \pi(D + d)/1,034d; \quad n' = \pi(D + \delta')/1,05b,$$

где δ' — толщина сегментной брони.

В СССР при наложении ленточной и проволочной брони принято левое направление. Наружные защитные покровы из кабельной пряжи накладываются в правом направлении. В подушке под броней слои из поливинилхлоридной ленты и кабельной пряжи должны накладываться в различных направлениях с перекрытием соответственно не менее 25 и 15%.

Новый стандарт на защитные покровы регламентирует максимальную температуру ($50-70^\circ\text{C}$), при которой пропитывающий состав не должен вытекать из покрова, а также минимальное электрическое сопротивление защитных покровов, определяемое после циклических испытаний на нагрев в ванне, содержащей 0,5% NaOH.

Для подушек с пластмассовыми лентами или шлангом предусматривается их испытание в течение 1 мин переменным напряжением 2 кВ или постоянным напряжением 5 кВ.

Броневые машины состоят из отдающего и приемного устройств, пяти битумных ванн, устройств для обмотки кабельной пряжей, кабельной бумагой и поливинилхлоридными лентами, а также для наложения ленточной и проволочной брони. Кроме того, в броневых машинах имеются ванны, в которых кабель покрывается меловым раствором, чтобы отдельные витки не слипались друг с другом на приемном барабане.

Температура битумного компаунда в ваннах должна быть в пределах $140-180^\circ\text{C}$ (для битума № 3 в пределах $100-130^\circ\text{C}$).

Прессы для наложения поливинилхлоридного шланга на кабели в алюминиевой оболочке должны быть оборудованы устройством для наложения антикоррозионного подслоя из битумного компаунда и ленточного пластика.

КАБЕЛИ И ПРОВОДА С ПЛАСТМАССОВОЙ И РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

8.1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

А. Применение высокомолекулярных соединений в кабелях и проводах

В качестве изоляции и защитных оболочек в кабелях и проводах самого различного назначения широко применяются высокомолекулярные соединения, к которым относятся пластмассы и резины.

Резиновая изоляция применяется в кабельной технике давно. Бурное развитие производства кабелей и проводов с разнообразными видами пластмассовой изоляции наблюдается в течение последних 10—15 лет.

Весьма ценными качествами резиновой изоляции являются ее исключительная гибкость, влагостойкость и достаточно высокие электроизоляционные свойства. Кроме того, резина хорошо перерабатывается и имеет сравнительно невысокую стоимость. Поэтому многие виды кабельных изделий раньше выпускались с резиновой изоляцией (силовые и контрольные кабели; установочные и осветительные провода, провода зажигания и т. п.).

Однако в связи с развитием химии полимеров в очень многих видах кабельных изделий резиновую изоляцию (или оболочку) вытеснили такие широко распространенные полимеры, как полиэтилен, поливинилхлоридные пластикаты и пр. Они имеют более высокие электроизоляционные и физико-механические показатели, что позволяет в ряде случаев существенно уменьшить толщину изоляции и облегчить и упростить конструкции кабелей. Кроме того, эти полимеры можно перерабатывать на червячных прессах с высокими скоростями, что существенно снижает затраты на производство изделий.

Внедрение современных полимерных материалов позволило не только удешевить, упростить и существенно увеличить выпуск кабельной продукции, но и создать более современные и принципиально новые конструкции кабелей и проводов. Особенно это связано с внедрением различных теплостойких кремнийорганических и фторсодержащих органических соединений.

Однако неверно считать, что резиновая изоляция является устаревшей и со временем ее полностью вытеснят пластмассы. Резиновая изоляция широко применяется и будет применяться во многих видах гибких кабелей и проводов самого разнообразного назначения.

Дальнейший прогресс в области кабелей и проводов с пластмассовой и резиновой изоляцией связан с созданием более дешевых и технологичных рецептур резин, имеющих высокие физико-механические характеристики в широком диапазоне температур, с повышением нагревостойкости полимеров, увеличением стойкости пластмасс и резины к различным агрессивным средам.

Б. Особенности структуры высокомолекулярных соединений

Высокомолекулярные соединения (ВМС) имеют ряд особенностей, которые отличают их от низкомолекулярных соединений и создают специфику получения, переработки и применения таких материалов. Прежде всего ВМС характеризуются высокими значениями молекулярной массы в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч. Молекулы ВМС имеют повторяющиеся звенья, причем длина молекулы может в тысячи раз превышать ее поперечные размеры.

Синтетические высокомолекулярные соединения получают в результате реакций полимеризации или поликонденсации. В процессе этих реакций получается продукт в виде смеси полимергомологов, т. е. веществ, имеющих одинаковое химическое строение, но разные молекулярные массы. Это выражается в том, что отдельные молекулы имеют разное число звеньев, т. е. разную длину. По этой причине, например, полимеры не имеют резко выраженной температуры плавления или затвердевания.

Молекулярная масса полимера также не может быть оценена конкретным числом, а определяется в некотором интервале.

Свойства ВМС существенно зависят от молекулярной массы. Чем выше молекулярная масса (или степень полимеризации), тем выше механическая прочность и стойкость к воздействию повышенных температур. При уменьшении молекулярной массы (например, старение полимера) наблюдается ухудшение его физико-механических показателей.

Длинные молекулы полимеров можно условно рассматривать как нити, хаотически или упорядоченно расположенные в пространстве.

В зависимости от расположения молекул и наличия связей между ними различают полимеры с линейным, сетчатым и пространственным строением. Полимеры первых двух видов являются термопластичными веществами, причем наличие поперечных связей повышает температуру размягчения, а следовательно, и переработки материала.

Увеличение поперечных связей между молекулярными цепями и образование пространственной структуры приводят к тому, что полимер становится нерастворимым и приобретает терморезистивные свойства.

В кабельной промышленности наиболее широкое распространение в качестве изоляционных и защитных материалов получили термопластичные высокомолекулярные соединения, которые можно перерабатывать на червячных прессах. К таким полимерам относятся полиэтилен, поливинилхлоридные пластикаты, композиции полиэтилена с полиизобутиленом и пр.

При изготовлении различных кабельных изделий в качестве исходных продуктов для получения изоляции или защитных покрытий наиболее широко применяются полимеры с линейным строением.

Высокомолекулярные соединения могут иметь кристаллическую или аморфную структуру, причем большая часть полимеров в обычных условиях имеет одновременно кристаллическую и аморфную фазы. Соотношение фаз влияет на физико-механические свойства полимеров. Так как молекулы многих полимеров представляют собой тонкие длинные нити, строение кристаллического полимера существенно отличается от строения кристаллов низкомолекулярных веществ.

Молекулы полимера из-за большой длины не могут целиком войти в решетку кристалла, поэтому упорядоченной структурой могут обладать лишь отдельные места полимеров, которые называются кристаллитами. В кристаллитах правильно ориентированы отдельные участки соседних молекулярных цепей. Между кристаллитами расположены аморфные участки, в которых молекулярные цепи расположены неупорядоченно.

Если линейная молекула обладает большой гибкостью и малой разветвленностью, то данный полимер

проявляет большую склонность к образованию кристаллитов.

Наличие в молекулах боковых ответвлений затрудняет образование упорядоченных участков. Однако если боковые ответвления расположены по длине молекулы регулярно, то такой полимер может образовывать кристаллическую структуру с довольно высокой плотностью упаковки молекул. Такие полимеры называют изотактическими или стереорегулярными.

В зависимости от преобладания аморфной или кристаллической фазы различают аморфные и кристаллические полимеры. К аморфным полимерам можно отнести полистирол, полиметилметакрилат (органическое стекло) и пр.

В зависимости от температуры различают три состояния аморфных полимеров: стеклообразное, высокоэластичное и состояние пластического течения или текучести.

В стеклообразном состоянии наиболее заметно проявляются силы межмолекулярного взаимодействия, и полимеры обычно представляют собой твердые вещества, обладающие повышенной механической прочностью.

Особенностью высокоэластичного состояния является способность полимеров подвергаться значительным упругим деформациям при воздействии сравнительно небольших внешних нагрузок. Это объясняется тем, что деформирующие усилия вызывают растяжение хаотически расположенных и свернутых молекулярных цепей. После снятия усилий молекулы в результате теплового колебательного движения стремятся вернуться в исходное состояние и размеры деформированного полимера восстанавливаются. Температура, при которой застеклованный полимер переходит в высокоэластичное состояние (или обратно), называется температурой стеклования T_c . При дальнейшем увеличении температуры уменьшаются силы взаимодействия между молекулами и полимеры переходят в состояние пластического течения (или вязкотекучее состояние). Температура перехода в это состояние называется температурой текучести T_t .

Переход из одного состояния в другое совершается постепенно, и под температурами стеклования или текучести обычно понимают некоторый температурный ин-

тервал. Широкое распространение в кабельной промышленности имеют кристаллические полимеры, т. е. вещества, содержащие высокий процент кристаллической фазы. К ним относятся полиэтилен, полипропилен, политетрафторэтилен, полиамиды и пр.

При переходе из аморфного состояния в кристаллическое резко уменьшается объем полимеров, поэтому при их практическом использовании для получения стабильных характеристик необходимо создавать такие условия, чтобы в процессе эксплуатации полимер не изменял своего фазового состояния.

Физико-механические и электроизоляционные характеристики высокомолекулярных соединений существенно зависят от их химического состава, строения молекулярных цепей и образований и вида структуры кристаллической или аморфной фаз (или, как говорят, форм надмолекулярной структуры).

В. Основные закономерности, связывающие структуру полимеров с их физико-механическими и электроизоляционными свойствами

Большинство органических высокомолекулярных соединений имеют вид молекулярной цепи, показанной на рис. 8-1. Отдельные участки такой цепи могут вращаться относительно друг друга и без изменения угла между связями и расстояния между соседними атомами углерода принимать различные положения в пространстве. Радикалы, связанные с атомами углерода, уменьшают подвижность основной цепи. Особенно это относится к полярным группам (ОН, Сl и пр.), наличие которых приводит к жесткой структуре цепей.

Электроизоляционные свойства чистого полимера также преимущественно зависят от его полярности.

Если полимер имеет симметричную (электрически уравновешенную) структуру молекулы, то он является неполярным диэлектриком, характеризующимся малыми значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon < 2,5$), тангенса угла диэлектрических потерь [$\operatorname{tg} \delta \approx (2 \div 5) 10^{-4}$] и высокими значениями удельного электрического сопротивления ($\rho_v = 10^{15} \div 10^{16}$ Ом·м).

Физико-механические свойства полимеров зависят от размеров химических связей между атомами молекулярных цепей, от межмолекулярных сил, степени упак-

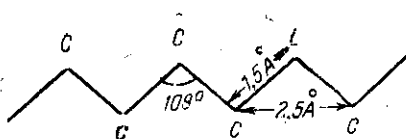


Рис. 8-1. Схематичное изображение части линейной молекулы высокомолекулярного соединения.

ковки цепей молекул, расположения и степени упорядоченности полярных групп, а также от степени кристалличности и форм надмолекулярной структуры.

Силы взаимодействия между атомами в молекулярных цепях органических соединений (первичные связи) весьма велики. Такие связи, как углерод — углерод в карбоцепных соединениях (рис. 8-1), кремний — кислород в кремнийорганических соединениях обладают весьма высокой энергией связи.

Межмолекулярные силы взаимодействия (вторичные связи) составляют около 10% сил первичных связей. Многие свойства полимеров (фазовое состояние, механическая прочность, твердость и т. п.) зависят именно от межмолекулярных сил.

Плотная упаковка молекул уменьшает расстояние между соседними цепями, что способствует увеличению межмолекулярных сил.

Наличие полярных групп в молекулярных цепях значительно увеличивает эти силы как за счет дипольного взаимодействия, так и за счет образования водородных связей. При этом влияние упаковки молекул сказывается на свойствах полярных полимеров меньше, чем неполярных. Это объясняется тем, что силы межмолекулярного взаимодействия неполярных молекул пропорциональны $1/r^6$, а полярных — $1/r^3$, где r — расстояние между центрами притяжения молекул. Чем больше межмолекулярные силы, тем выше механическая прочность и твердость полимера, меньше его растворимость, температуры стеклования, текучести сдвигаются в область более высоких температур, а следовательно, становится выше и нагревостойкость. Усиление вторичных связей также способствует стойкости полимера к агрессивным средам.

Однако большие межмолекулярные силы часто приводят к повышенной жесткости вещества (поливинилхлорид) или к трудности его переработки (фторопласт-4).

В зависимости от степени кристалличности и вида надмолекулярных структур изменяются также механические характеристики: предел прочности и относитель-

ное удлинение при разрыве, а также электроизоляционные характеристики.

Например, при крупнокристаллической структуре (сферолитные кристаллические образования) ухудшаются эластические свойства полимеров. В свою очередь характер надмолекулярных структур зависит от технологических режимов производства полимерной изоляции (режимы прессования, скорость охлаждения и пр.).

8-2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И СВОЙСТВА ПЛАСТМАСС, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Наиболее широкое применение в производстве кабельных изделий получили такие термопластичные полимеризационные соединения с линейным строением молекул, как полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, полиизобутилен, полистирол, фторопласты. Из поликонденсационных соединений наиболее широко применяются полиамиды. Перечисленные материалы применяются для изготовления изоляции и оболочек. Некоторые материалы (полиизобутилен, полипропилен) используются в качестве составных частей изоляционных или шланговых композиций.

Полиэтилен $(—CH_2—CH_2—)_n$ — термопластичный полимер, получающийся в результате полимеризации этилена, является одним из самых распространенных изоляционных материалов в производстве кабельных изделий.

В зависимости от плотности различают полиэтилен низкой, средней и высокой плотности.

Полиэтилен низкой плотности получают в результате реакции полимеризации этилена, проводимой при высоком давлении (150—200 МПа) и повышенной (до 200 °C) температуре. Полимеризацию полиэтилена высокой и средней плотности проводят при низких и средних давлениях в присутствии металлоорганических катализаторов.

Полиэтилен относится к линейным кристаллическим полимерам. Силы межмолекулярного взаимодействия полиэтилена невелики, так как группы $—CH_2—$ неполярны и обладают незначительными силами взаимодействия (когезии). Поэтому полимер имеет в обычных условиях довольно низкую температуру плавления и сравнительно небольшую твердость. Вследствие регулярности строения полиэтилен довольно легко кристаллизуется и сте-

пень кристалличности полиэтилена низкой плотности колеблется в пределах 50—70%, а полиэтилена высокой плотности — в пределах 80—90%.

Установлено, что макромолекулы полимера имеют боковые группы, большее число которых имеется у полиэтилена низкой плотности, что объясняется условиями проведения полимеризации продукта, проводимой при высоком давлении и повышенной температуре.

Наличие боковых групп ($-\text{CH}_3$, $-\text{C}_2\text{H}_5$) препятствует образованию кристаллитов, поэтому степень кристалличности и плотность полиэтилена, получаемого при высоком давлении, меньше.

Полиэтилен обладает высокими электроизоляционными характеристиками, мало зависящими от частоты, проявляет высокую инертность по отношению к агрессивным химическим средам, влагостоек, имеет хорошие механические характеристики и легко перерабатывается на червячных прессах. Довольно высокие разрывная прочность и эластичность полиэтилена сохраняются в широком интервале температур (-60 — $+80^\circ\text{C}$).

Полиэтилен высокой плотности имеет по сравнению с полиэтиленом низкой плотности повышенную температуру плавления, большие механическую прочность, твердость, стойкость к истиранию и продавливанию.

Однако его электрические характеристики несколько ниже, чем у полиэтилена низкой плотности. Это несмотря на меньшее количество боковых ответвлений происходит по той причине, что в нем остаются следы металлоорганических катализаторов, которые весьма трудно полностью удалить из материала.

Полиэтилен высокой плотности по технологичности существенно уступает полиэтилену низкой плотности. Вследствие повышенной жесткости он используется преимущественно для кабелей и проводов с тонкостенной изоляцией (кабели управления, монтажные провода и пр.), в то время как полиэтилен низкой плотности широко применяется для изоляции силовых, радиочастотных кабелей, кабелей связи, подводных кабелей, монтажных проводов и т. п.

Для повышения стойкости полиэтилена к тепловому и атмосферному старению в него вводят в небольшом количестве стабилизаторы. Смесь аминовых стабилизаторов обеспечивает стойкость к тепловому старению и

обеспечивает длительную эксплуатацию изделий при 70 °С.

При введении в полиэтилен небольших количеств (1—2%) газовой сажи получают светостабилизированный полиэтилен, применяемый в качестве наружных защитных оболочек кабеля.

Существенным недостатком полиэтилена является склонность к растрескиванию в напряженном состоянии и особенно при соприкосновении с поверхностно-активными веществами (бензол, органические кислоты, некоторые масла, синтетические моющие средства, мыла и пр.).

С повышением молекулярной массы и уменьшением индекса расплава стойкость полиэтилена к растрескиванию увеличивается.

С целью повышения эластичности полиэтилена и для повышения его стойкости к растрескиванию применяют композиции полиэтилена низкой плотности с полиизобутиленом. Процентное содержание последнего может быть в пределах 5—35%. Эти материалы имеют несколько худшие механические показатели и теплостойкость.

В последнее время вместо полиизобутилена применяют в таких композициях бутилкаучук в количестве 5—10%. Недостатками полиэтилена являются также низкая нагревостойкость, выражающаяся в том числе в резком размягчении при кратковременных перегревах, и горючесть.

Для повышения нагревостойкости применяют в некоторых случаях полиэтилен высокой плотности, но более эффективен вулканизирующийся (или сшитый) полиэтилен.

При сохранении основных целных электрических характеристик обычного полиэтилена сшитая композиция обладает повышенной теплостойкостью, стойкостью к растрескиванию в напряженном состоянии и к старению, повышенными механическими показателями. Одним из важнейших качеств является стойкость сшитого полиэтилена к кратковременным перегревам (до 150—200 °С), что позволяет использовать этот материал в качестве изоляции силовых кабелей, подверженных действию токов короткого замыкания.

Этот материал имеет структуру молекул с поперечными сшивками, которые осуществляются или химиче-

ским путем благодаря добавкам вулканизирующих агентов (органические перекиси), или путем облучения изоляции микрочастицами высоких энергий.

В сшитый полиэтилен могут добавляться также наполнители и стабилизаторы.

Для уменьшения горючести некоторых типов кабелей и проводов (шахтные и судовые кабели, кабели и провода для пожароопасных помещений, авиационные провода и пр.) используется негорючий, или самозатухающий, полиэтилен. Он получается в результате замены некоторых атомов водорода в молекуле полиэтилена атомами хлора или фтора или введением некоторых добавок (трехокись сурьмы, хлорированные углеводороды), выделяющих хлор при повышении температуры.

По механическим и электрическим характеристикам негорючий полиэтилен уступает чистому полиэтилену.

В последнее время разрабатываются композиции вулканизирующего самозатухающего полиэтилена, сочетающего свойства отмеченных выше видов полиэтилена.

Для изоляции кабелей связи применяется порообразующий полиэтилен, получающийся введением в основной материал порообразователя (порофора). Порофор при определенной температуре разлагается, и в изоляции образуются газовые поры. Диэлектрическая проницаемость такого материала уменьшается, однако ухудшаются механические характеристики и влагостойкость.

Полиэтилен применяется также в виде лент с подклеивающим покрытием для ремонта кабелей с полиэтиленовой изоляцией или оболочкой.

Низкомолекулярный полиэтилен в сочетании с другими материалами используется для сращивания кабелей и заливки кабельных муфт.

Некоторые физико-механические и электроизоляционные характеристики различных видов полиэтилена приведены в табл. 8-1.

Полипропилен $\left(\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$ — неполярный тер-

мопластичный полимер. Он обладает более высокой по сравнению с полиэтиленом механической прочностью, износоустойчив, стоек к различным агрессивным средам

Таблица 8-1

Основные характеристики полимеров, применяющихся для изоляции и оболочек кабелей и проводов

Характеристика	Полненькие пластмассы		Полиэтилен						Фторопласты		
	Нагревостойкость		низкой плотности	высокой плотности	пористый	негорючий	сшитый непластичный	полупроводящий	Ф-4, Ф-4Д	Ф-4М	Ф-40Ш
	нормальная	повышенная									
	Плотность, кг/м³	1310	1300	920	950	380—400	1250	920	1000	2100—2300	2150—2160
Предел прочности при разрыве, МПа	18—23	Не менее 14	10—13	22—30	3	8	15	10	14—25	16—25	30—35
Относительное удлинение при разрыве, %	200—280	Не менее 250	400—600	300—900	300	400	450	150	250—500	250—400	100—300
Модуль упругости при разрыве, МПа	10—20	—	150—250	550—800	—	—	—	—	700	470—850	110
Температура размягчения, °С	175—180	180	108—120	125—135	115	104—115	160	105—110	327	280—290	265—275
Холодостойкость, °С	—40	—40	—70	—70	—70	—60	—70	—40	—269	—190	—60
Влагостойкость	Удовлетворительная	Удовлетворительная	Отличная	Отличная	—	Удовлетворительная	—	—	Отличная	Отличная	Отличная
Горючесть	Не горит	Не горит	Горит	Горит	Горит	Затухает	Горит	Горит	Не горит	Не горит	Не горит
Стойкость к агрессивным средам	—	—	Отличная	Отличная	Хорошая	Отличная	Отличная	Отличная	Отличная	Отличная	Отличная
Удельная теплоемкость, Дж/(кг.°С)	(1,0—1,5) 10³	—	(1,5—7) 10³	—	—	—	—	—	1047	1047	1047
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м.°С)	0,15—0,20	—	0,25—0,32	—	—	—	—	—	0,25	0,25	0,25
Электрическая прочность, МВ/м (толщина 1 мм)	25—30	25	45—60	45—60	—	40	50	—	40	30—35	20*
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	(1—3) 10¹¹	1·10¹¹	10¹³	10¹³	—	10¹³	—	10¹³—10¹⁴	10¹³—10¹⁴	10¹⁵	10¹⁴—10¹⁵
tg δ	5—6	5—6	2,3	2,1—2,4	1,4	2,5	2,5	—	1,9—2,2	2,0—2,2	2,5—2,6
Максимальная рабочая температура, °С	(4—8) 10²	7·10²	(3—5) 10²	(3—5) 10²	2·10²	1·10²	1·10²	—	(2—3) 10²	(5—10) 10²	(6—8) 10²
Технологичность	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Низкая	Удовлетворительная	Удовлетворительная

* При толщине 2 мм.

и имеет повышенную температуру плавления (160 – 165 °С). Этот материал может длительно работать при 100–120 °С.

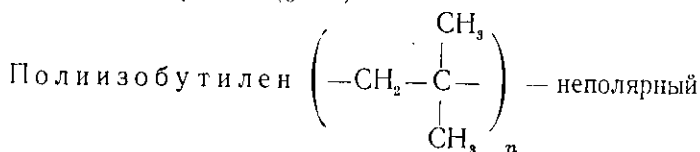
Эти свойства полипропилена объясняются его большой молекулярной массой (до 350 000) и высокой степенью кристалличности (90–95%), что вызвано стереорегулярным строением этого полимера.

Недостатками полипропилена, ограничивающими его применение в кабельной технике, являются большая жесткость, склонность к окислению при повышенных температурах и при контакте с медью, низкая (–5 ÷ –15 °С) холодостойкость.

Каталитическое действие меди ослабевает при введении специальных ингибиторов. Для повышения эластичности и холодостойкости применяют сополимеры этилена с небольшим количеством полипропилена и композиции с полиизобутиленом (до 10%).

Переработка полипропилена и его композиций осуществляется на червячных прессах, но при повышенных по сравнению с полиэтиленом температурах.

При большом содержании полипропилена (более 15%) в композиции с полиэтиленом получают каучукообразные материалы (§ 8-3).



полимеризованный диэлектрик. Наличие метильных групп при атомах углерода в его молекулярной цепи приводит к значительному уменьшению сил межмолекулярного взаимодействия. Это вызвано увеличением расстояния между цепями молекул. В результате этого полиизобутилен обладает по сравнению с полиэтиленом повышенной текучестью и меньшей твердостью. В зависимости от условий полимеризации этот полимер получают с различными молекулярными массами: от вязких жидкостей (молекулярная масса до 25 000) до каучукоподобных эластичных материалов с молекулярной массой 80 000—200 000. Полиизобутилен имеет высокую стойкость к агрессивным средам и обладает хорошими электроизоляционными свойствами и влагостойкостью. В чистом виде из-за небольшой механической прочности и способности к хладотекучести полиизобутилен в ка-

белой промышленности не применяется. Находят применение композиции на его основе, в которых используются высокая пластичность и влагостойкость полиизобутилена. Его вводят в резиновые смеси для повышения их клейкости, а также совмещают с полиэтиленом для получения более гибкого, эластичного и стойкого к растрескиванию полиэтилена, иногда называемого кабельным. Смеси полиизобутилена с такими наполнителями, как сажа, графит, воск, используют для получения влагонепроницаемых защитных оболочек. Ввиду невысокой механической прочности поверх таких оболочек обычно дополнительно накладывают оболочку из полиэтилена или поливинилхлоридного пластика.

Низкомолекулярный полиизобутилен применяется в качестве составной части нестекающих пропиточных масс, используемых в силовых кабелях, прокладываемых по наклонным трассам.

Поливинилхлорид $\left(\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ | \\ \text{Cl} \end{array} \right)_n$. В кабельной

промышленности широкое распространение получили поливинилхлоридные пластики, представляющие собой смеси поливинилхлорида с различными пластификаторами, стабилизаторами, наполнителями и другими добавками.

В чистом виде поливинилхлорид не получил в кабельной промышленности широкого применения ввиду его жесткости и хрупкости при пониженных температурах. Эти свойства объясняются строением полимера. Присутствие атома хлора, связанного с углеродом, обуславливает сильно выраженную полярность полимера и приводит к резкому увеличению в нем межмолекулярных сил.

Для повышения эластичности материала в поливинилхлорид вводят различные пластификаторы. Молекулы пластификаторов, проникая между молекулярными цепями полимера, способствуют ослаблению межмолекулярных связей и взаимному перемещению цепей. Повышая эластичность поливинилхлорида и способность к переработке на червячных прессах, пластификаторы снижают его нагревостойкость, химическую стойкость и электроизоляционные свойства.

Наполнители вводят в состав поливинилхлоридных пластиков для их удешевления, а также для придания

им некоторых специфических свойств (например, стойкости к продавливанию, улучшения электроизоляционных характеристик и пр.).

В качестве наполнителей применяют каолин, тальк, карбонат кальция, двуокись кремния и пр. При повышенных температурах (более 140 °С) наблюдается разложение поливинилхлорида с выделением хлористого водорода. Поэтому в состав пластика вводят стабилизаторы, которые связывают выделяющийся хлористый водород и повышают стойкость пластика к тепловой деструкции. В состав пластика вводят красители, которые помимо своей основной функции часто повышают светостойкость композиции.

Так как поливинилхлорид представляет собой полярный диэлектрик, его электроизоляционные характеристики значительно хуже, чем характеристики описанных выше полимеров.

В зависимости от состава и соотношения составных частей поливинилхлоридные пластики делят на две группы: изоляционные и шланговые. Шланговые пластики обладают пониженными электроизоляционными характеристиками, но имеют более высокую эластичность, холодо- и светостойкость (табл. 8-1).

Поливинилхлоридные пластики различаются номером рецептуры или маркой. По ГОСТ 5960-72 в марках первая буква обозначает область применения или тип пластика: И — изоляционные, О — для оболочек; ИО — для изоляции и оболочек. Две цифры, следующие за буквами, показывают его холодостойкость (°С), цифры через черточку — показатели степени удельного объемного сопротивления материала. Имеются специальные обозначения, например ОМБ — с повышенной маслобензостойкостью, ОНМ — с уменьшенным значением миграции пластификатора в изоляцию, ИТ-105 — теплостойкий пластикат на рабочую температуру 105 °С.

При эксплуатации кабельных изделий с поливинилхлоридными пластиками используются такие их достоинства, как высокая гибкость, негорючесть, химическая стойкость, хорошая технологичность.

Недостатками поливинилхлоридных пластиков являются часто невысокая холодостойкость, а также миграция пластификаторов в изоляцию при повышенных температурах и использовании пластиков в качестве оболочек кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Введение

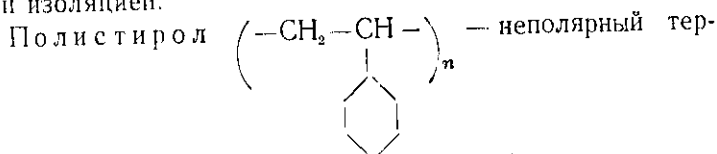
некоторого количества каучуков способствует в ряде случаев устранению этих недостатков.

Из-за пониженных электроизоляционных характеристик область применения поливинилхлоридной изоляции ограничивается низкочастотными и низковольтными кабелями и проводами.

Поливинилхлоридные пластикаты применяются в качестве изоляции силовых кабелей на напряжения 1—10 кВ, некоторых низкочастотных кабелей связи (шахтные, внутрирайонные, станционные), судовых кабелей, различных монтажных, осветительных проводов и шнуров и т. п. Наибольшее применение имеют шланговые оболочки из поливинилхлоридных пластикатов.

Поливинилхлорид, подвергнутый тепловой обработке, носит название винипласта. Этот твердый, упругий материал, обладающий высокой химической стойкостью, применяется как конструкционный электроизоляционный материал.

Изоляционные ленты из поливинилхлоридного пластиката с липким слоем, состоящим из перхлорвиниловой смолы и пластификаторов, применяются для ремонта и сращивания кабелей и проводов с поливинилхлоридной изоляцией.



мопластичный аморфный полимер.

Присутствие фенильной группы в углеродной цепи резко увеличивает силы межмолекулярного взаимодействия за счет большого количества групп СН в боковом ответвлении. Однако из-за наличия разветвленной структуры образование кристаллитов затруднено. В обычных условиях полистирол представляет твердый, механически прочный прозрачный материал, обладающий большой влагостойкостью и химической стойкостью. Боковая группа не увеличивает полярности материала, поэтому он имеет высокие электроизоляционные характеристики, сохраняющиеся в широком диапазоне частот.

Полистирол хорошо перерабатывается методами литья и выдавливания. Из-за невысокой температуры размягчения (70—80 °С), повышенной хрупкости и жесткости этот материал имеет ограниченное применение

в кабельной технике. Он используется в виде ориентированных нитей (корделя) и лент для изоляции высокочастотных симметричных кабелей дальней связи.

Фторопласты. Это пластмассы на основе производных этилена, в которых атомы водорода замещены фтором, а также сополимеры тетрафторэтилена с другими мономерами.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен), формула которого $-(\text{—CF}_2\text{—CF}_2\text{—})_n$, широко применяемый в кабельной промышленности материал, представляет собой продукт полимеризации тетрафторэтилена ($\text{CF}_2=\text{CF}_2$). Это кристаллический полимер со степенью кристалличности 80—90%. Температура плавления кристаллитов 327°C, температура стеклования — 120°C.

Большой процент кристаллической фазы объясняется малым размером атомов фтора и симметричным строением молекулярной цепи полимера. Поэтому фторопласт-4 обладает высокой температурой плавления, а наличие аморфной фазы придает полимеру достаточную гибкость и высокую холодостойкость. Высокая энергия связи атомов фтора и углерода и плотная упаковка молекулярных цепей обуславливают исключительно высокую химическую стойкость фторопласта-4, превосходящую таковую у всех известных полимеров и таких металлов, как золото и платина.

Фторопласт-4 не смачивается водой и не набухает ни в одном растворителе. Этот полимер сохраняет высокие электроизоляционные свойства в очень широком диапазоне температур (в пределах $\pm 250^\circ\text{C}$). Он обладает также высокими механическими характеристиками, влагонепроницаем, холодостоек. Большие силы межмолекулярного взаимодействия являются причиной того, что даже в аморфном состоянии, т. е. при температуре выше температуры плавления кристаллитов (327°C), полимер не переходит в вязкотекучее состояние, а остается в высокоэластичном состоянии. Поэтому фторопласт-4 нельзя перерабатывать на обычном для термопластических материалов оборудовании, в частности на червячных прессах.

Методы изготовления изоляции из фторопласта-4 основаны на свойстве полимера спекаться в монолитную массу при 360—380°C.

При резком охлаждении спеченной массы (так называемая закалка) наблюдается образование аморфной

структуры полимера, которая сохраняется, если температура полимера не будет превышать 250—300 °С. При 300 °С наблюдается наибольшая скорость образования кристаллитов. Поэтому для сохранения механических характеристик изделий из фторопласта-4 их рекомендуется применять при температуре, не превышающей 250 °С. При более высоких температурах наблюдается также выделение вредных фтористых продуктов разложения.

Фторопласт-4 широко применяется в качестве изоляции нагревостойких радиочастотных кабелей и монтажных проводов, а также кабелей, работающих в химически активных средах. Наряду с трудностью переработки недостатком фторопласта-4 является его невысокая коррозийная стойкость.

В кабелях с ленточной изоляцией из фторопласта-4, где возможна ионизация в воздушных зазорах между лентами, применяется промазка изоляции специальными теплостойкими составами.

В кабельной промышленности широко применяется фторопласт-4Д. Этот материал, имея то же химическое строение, что и фторопласт-4, благодаря соблюдению особых условий реакции полимеризации имеет мелкодисперсную структуру. Это облегчает некоторые технологические операции при изготовлении изоляции и обеспечивает более стабильные свойства материала.

Весьма перспективными для кабельной промышленности являются фторопласты, способные перерабатываться на червячных прессах. К таким материалам относятся фторопласт-40Ш, фторопласт-4М и фторопласт-2М.

Фторопласт-40Ш $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ — сополимер этилена и тетрафторэтилена. Этот материал обладает высокой механической прочностью, твердостью, почти не подвержен, в отличие от фторопласта-4, хладотекучести, стойк к агрессивным средам, имеет достаточно высокие электроизоляционные характеристики. Рабочий диапазон температур от —60 до +200 °С. Фторопласт-40Ш может перерабатываться на червячных прессах, хотя этот процесс связан с определенными трудностями (§ 8-4). Этот материал является весьма перспективным для получения тонкослойной изоляции разнообразных теплостойких кабелей и проводов (каротажные кабели, монтажные провода и пр.), стойкой к различным внешним воздействиям.

Недостатком фторопласта-40Ш являются несколько худшие по сравнению с фторопластом-4 значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$, что затрудняет использование этого материала в высокочастотных кабелях, а также повышенная жесткость.

Фторопласт-40Ш применяется также в качестве герметичных защитных оболочек теплостойких кабелей.

Фторопласт-4М $\left(\begin{array}{c} -\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}- \\ | \\ \text{CF}_3 \end{array} \right)_n$ — сопо-

лимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена. Впервые получен в США под маркой Тефлон-100X, известен под маркой Тефлон FER.

Это термопластичный неполярный материал, обладающий высокими электроизоляционными и физико-механическими характеристиками. Наличие боковых групп CF_3 (гекса) в молекулярной цепи резко уменьшает вязкость расплава и обеспечивает возможность его переработки на червячных прессах.

Фторопласт-4М имеет несколько худший тангенс угла диэлектрических потерь из-за наличия «гекса»-групп, а также небольшого количества других групп (OH , CH_2 , COOH), образующихся в процессе реакции сополимеризации.

Этот материал весьма перспективен для изоляции и оболочек кабелей и проводов, работающих при повышенных температурах (до 200°C).

Недостатками этого материала являются невысокая гибкость и определенные трудности при переработке на червячных прессах.

Фторопласт-2М $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2-)_n$ — поливинилиденфторид — термопластичный материал, имеющий рабочую температуру $130-140^\circ\text{C}$.

Этот материал обладает высокой прочностью, стойкостью к растрескиванию в напряженном состоянии, может перерабатываться на червячных прессах. Недостатками этого материала являются невысокие текучесть, холодостойкость, электроизоляционные характеристики.

Однако вследствие повышенной нагревостойкости и высокой твердости фторопласт-2М является весьма перспективным материалом для получения тонкостенных прочных слоев кабельной изоляции и оболочек.

Этот материал дает возможность заменить поливинилхлоридную изоляцию и изоляцию из фторопласта-4

в ряде конструкций монтажных проводов. Первое обеспечивает лучшие механические характеристики (или уменьшение толщины изоляции) и теплостойкость, второе дает возможность отказаться от применения дорогостоящих покрытий из серебра проволоки, применяющейся в проводах с изоляцией из фторопласта-4, работающих при 130—140 °С. Характеристики фторопластов приведены в табл. 8-1.

Полиамиды — поликонденсационные полярные высокомолекулярные соединения с линейным расположением молекул и высокой степенью кристалличности.

Строение молекулярной цепи полиамидов имеет вид:



Наибольшее применение имеют капрон (κ - p -5) и анид (найлон) (κ -4, p -6).

Наличие полярной карбоамидной группы в углеродной цепи резко увеличивает силы межмолекулярного взаимодействия. Регулярное чередование карбоамидных групп между группами $-\text{CH}_2-$ способствует образованию большого количества связей между водородом и кислородом в группах CONH соседних цепей.

Полиамиды обладают высокой температурой плавления (220—265 °С), стойкостью к большинству обычных растворителей, высокой механической прочностью и износостойкостью. Они обладают невысокой вязкостью расплава, способны к большой вытяжке при выдавливании, что существенно облегчает переработку этих материалов.

Недостатками полиамидов являются невысокие электроизоляционные характеристики, довольно большое водопоглощение (до 10—11 %), невысокая стойкость к тепловому и световому старению. Введением специальных добавок эти показатели можно улучшить.

Наибольшее применение в кабельной технике полиамиды получили в качестве тонкостенных защитных покрытий кабелей и проводов с изоляцией из полиэтилена или поливинилхлоридных пластикатов. При этом используются хорошая нагревостойкость, химическая стойкость и механические показатели полиамидов. Перспективным является замена поливинилхлоридной изоляции на полиамидную в некоторых типах монтажных проводов, что позволяет их существенно облегчить и повысить механические показатели, а также нагревостойкость.

8-3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И СВОЙСТВА РЕЗИН, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. Общие сведения о резинах

Резина — широко применяемый в кабельной промышленности эластомер — получается при вулканизации резиновых смесей, которые состоят из натурального или синтетического каучука (или их смесей) и различных добавок, называемых ингредиентами.

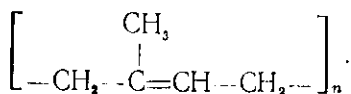
В процессе вулканизации, проводимой обычно при повышенных температуре и давлении, в результате действия вулканизирующих агентов происходит поперечная сшивка молекул каучука. В результате этого пластичная резиновая смесь приобретает упругие и высокоэластичные свойства.

Основными ценными свойствами резины являются большая гибкость, упругость, влагостойкость и довольно высокие электроизоляционные характеристики. Под действием деформирующих усилий резина способна изменять свои размеры, а после снятия усилий — восстанавливать их.

Подбирая различные виды каучуков и добавок, можно в широких пределах изменять физико-механические и электрические характеристики материала и получать резины, удовлетворяющие самым разнообразным требованиям в эксплуатации (масло- и бензостойкие, озоностойкие, негорючие резины и т. п.).

Б. Каучуки

Натуральный каучук имеет структурную формулу

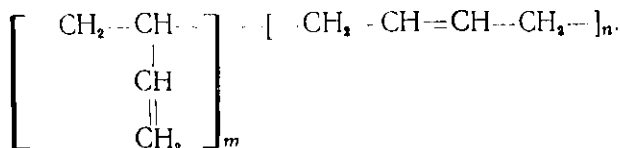


Это полимер линейного строения, обладающий большой молекулярной массой. Резиновые смеси на основе натурального каучука имеют высокую механическую прочность, хорошую эластичность и способность к технологической переработке. Однако наличие двойных связей в молекулах полимера вызывает недостаточную стойкость к действию различных органических соединений, кислорода, озона и к тепловому старению.

Недостатком резины на основе натурального каучука является также их горючесть. Натуральный каучук дефицитен, поэтому обычно применяются смеси натурального каучука с синтетическим.

Из синтетических каучуков применяются бутадиеновые, бутадиен-стирольные, бутадиен-нитрильные, бутиловые, полихлоропреновые, кремнийорганические каучуки и пр.

Бутадиеновые каучуки получают в результате полимеризации бутадиена (дивинила):

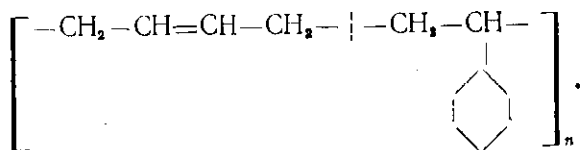


Наличие боковых винильных групп ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) обуславливает возможность вулканизации без применения вулканизующих агентов. При $180-200^\circ\text{C}$ происходит образование поперечных связей за счет дивинильных групп. Такую реакцию называют термополимеризацией.

Бутадиеновые каучуки выпускаются марок СКБ и СКБМ, причем последние обладают большей холодостойкостью. Смеси на основе этих каучуков обладают сравнительно небольшими механической прочностью и клейкостью и имеют более низкие электроизоляционные характеристики по сравнению с резиновыми смесями на натуральном каучуке. Недостатками их являются также горючесть и недостаточная стойкость к действию различных органических веществ. Однако резиновые смеси на основе бутадиеновых каучуков менее подвержены тепловому старению.

Бутадиен-стирольные каучуки получают путем сополимеризации бутадиена (C_4H_6) и стирола (C_8H_{10}). Эти каучуки обозначаются маркой СКС и различаются соотношением бутадиена и стирола.

Структура бутадиен-стирольного каучука имеет следующий вид:



Эти каучуки, как и бутадиеновые, имеют нерегулярную структуру. Вследствие этого они не имеют кристаллической фазы и уступают по механическим характеристикам (сопротивлению многократному изгибу и раздиру) натуральному каучуку. Однако по стойкости к истиранию и тепловому и световому старению бутадиен-стирольные каучуки превосходят натуральный каучук.

Изменяя соотношение бутадиена и стирола, можно регулировать механические и электрические характеристики полимера.

Резины на основе бутадиен-стирольных каучуков по сравнению с резинами на натуральном каучуке имеют пониженные клейкость и холодостойкость и худшие электроизоляционные характеристики.

Механические характеристики и химическую стойкость резины на основе бутадиен-стирольных каучуков повышают путем применения активных наполнителей (углеродная сажа и пр.).

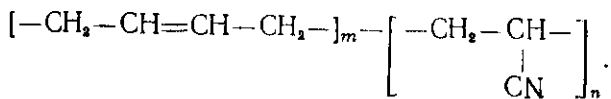
Широкое применение получил стереорегулярный бутадиеновый каучук СКД. Он отличается регулярным расположением звеньев в цепи полимера, высокими физико-механическими характеристиками (например, стойкость к истиранию) и высокой холодостойкостью.

Из-за плохой технологичности этот каучук применяется в смеси с другими каучуками (НК, СКС).

Синтезированный в последнее время изопреновый каучук марки СКИ по своим физико-механическим и электроизоляционным характеристикам практически не уступает натуральному и имеет аналогичное строение.

Весьма перспективным материалом в качестве заменителя дорогостоящего натурального каучука является диэлектрический изопреновый каучук (СКИ-ЗД).

Бутадиен-нитрильные (нитрильные) каучуки получают путем сополимеризации бутадиена и нитрила акриловой кислоты (C_3H_3N):



Эти каучуки обозначаются маркой СКН и цифрой, показывающей содержание акрилонитрила в исходной смеси мономеров.

Нитрильные каучуки содержат в молекулярной цепи полярную группу—CN. Это обстоятельство объясняет повышенную стойкость резин на основе этого каучука к воздействию масел, эфиров, ароматических углеводов, бензина и пр. к истиранию, а также повышенную нагревостойкость.

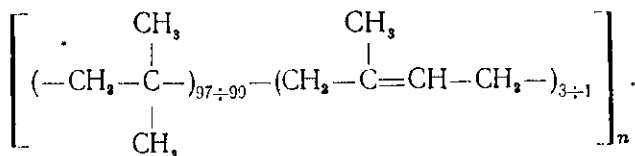
Электрические характеристики резин на основе нитрильных каучуков невысоки, что объясняется полярностью полимера.

Эти каучуки обладают также невысокой атмосферостойкостью.

Для повышения пластичности в резиновые смеси на основе нитрильных каучуков вводят соответствующие пластификаторы.

Бутилкау́чук получают путем сополимеризации изобутилена (C_4H_8) и небольшого количества изопрена (C_5H_8).

Строение полимера имеет вид:



Отсутствие больших боковых групп и малая неупорядоченность обуславливают такие свойства бутилкаучука, как способность к кристаллизации, а следовательно, и довольно высокую механическую прочность, стойкость к тепловому и световому старению и воздействию кислорода и озона.

Резины на основе бутилкаучука обладают хорошими электроизоляционными характеристиками, а также стойкостью к действию влаги и агрессивных химических сред.

Этилен-пропиленовые каучуки (СКЭП, СКЭПТ) являются одними из самых перспективных каучуков для создания гибкой изоляции высоковольтных кабелей. Они представляют собой сополимеры этилена с пропиленом ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}-$) с содержанием пропилена бо-



лее 15%.

Эти каучуки обладают чрезвычайно высокой озоноустойчивостью, хорошими электроизоляционными характеристиками, влагостойкостью, невысокой плотностью. Они хорошо перерабатываются на червячных прессах, имеют теплостойкость выше, чем у многих других каучуков (до 85°C), и имеют хорошую холодостойкость (-50°C).

Не очень высокие механические характеристики, ухудшающиеся в процессе теплового старения, можно улучшить рецептурным путем, добавляя в резины на основе этих каучуков активные наполнители.

Недостатком резины на основе этих каучуков является низкая скорость вулканизации.

Имеют применение каучуки на основе двойного (СКЭП) и тройного (СКЭПТ) сополимеров. Последнему материалу соответствует структурная формула, отличающаяся от вышеприведенной наличием дивинильной группы вместо одного из атомов водорода в звене пропилена.

Полихлоропреновые каучуки (наирит, неопрен) $(-\text{CH}_2-\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$ получают путем полимеризации



хлоропрена.

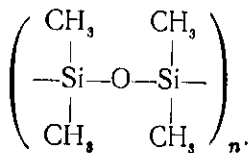
Присутствие атома хлора в молекулярной цепи обуславливает способность полимера к кристаллизации, стойкость к воздействию масла, бензина, негорючесть и озоностойкость.

Как полярный диэлектрик полихлоропреновый каучук имеет невысокие электроизоляционные характеристики. Недостатками резины на основе этого каучука являются низкая холодостойкость ($-30 \div -35^{\circ}\text{C}$), повышенная влагопроницаемость и значительное ухудшение механических характеристик при повышении температуры.

Холодостойкость резины на основе этих каучуков улучшают (до -60°C) за счет создания композиции их с бутадиен-нитрильными каучуками.

Кремнийорганические каучуки получают в результате реакции поликонденсации кремнийорганических соединений.

Структура молекулы полидиметилсилоксанового каучука (СКТ) имеет вид:



При замене одной из метильных групп атома кремния винильной ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) или фенильной ($-\text{C}_6\text{H}_5$) группами получают полиметилвинилсилоксановый (СКТВ) или полиметилфенилсилоксановый (СКТФ) каучуки.

Каучук СКТ является одним из самых эластичных полимеров; он может применяться при температурах от -90 до $+250^\circ\text{C}$. Гибкость каучука СКТВ сохраняется до -65°C , а каучука СКТФ — до -90°C . Эти свойства обусловлены тем, что вследствие полярности и большого размера атома кремния части молекулы полимера имеют большую свободу вращения. Кроме того, метильные группы в спирально скрученной молекуле ослабляют действие дипольных связей кремний — кислород и обуславливают наличие малых межмолекулярных сил в полимере. Поэтому цепи молекул получают большую подвижность, что приводит к большой холодостойкости кремнийорганических каучуков. Однако механические показатели резины на основе этих каучуков невысокие.

Большая прочность связи кремний — кислород по сравнению со связью углерод — углерод и отсутствие непредельных групп в составе полимера придают ему высокую теплостойкость и стойкость к действию кислорода, озона и других агрессивных сред.

Фторкаучуки получают в результате реакции сополимеризации различных фторсодержащих мономеров. Известны два основных типа фторкаучуков: СКФ-26 и СКФ-32. Каучук СКФ-26 представляет собой сополимер винилиденфторида и гексафторпропилена, химическая формула которого $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2)-(\text{CF}_2-\text{CF}-)$. Каучук

СКФ-32 — это сополимер винилиденфторида и трифторхлорэтилена $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2)-(-\text{CF}_2-\text{CF}-)$.

В кабельной технике находит применение преимущественно каучук СКФ-26.

Фторкаучуки представляют собой полностью насыщенные углеводороды. Как многие фторсодержащие углеводороды (например, фторопласты), они обладают высокими механическими характеристиками, исключительной химической стойкостью, высокой теплостойкостью (до $180-200^\circ\text{C}$), не поддерживают горения.

Общие свойства каучуков

Характеристика	Каучук						
	Натуральный	Бутадиен-стирольный	Полихлоропреновый	Бутадиен-нитрильный	Бутыл-каучук	Кремний-органический	СКЭП
Плотность, кг/м ³	920	940	1230	1000	920	Непостоянная	850
Прочностные свойства	О	Х	Х	У	У	П	Х
Износостойкость	О	Х	Х	Х	Х	П	—
Теплостойкость	У	Х	ОХ	ОХ	ОХ	О	ОХ
Стойкость к атмосферным воздействиям	П	П	О	У	Х	О	Х
Огнестойкость	П	П	Х	П	П	У	П
Холодостойкость	О	О	У	У	Х	О	Х
Озоностойкость	П	П	О	У	О	О	О
Газопроницаемость	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая	Очень низкая	Средняя	Низкая
Стойкость к действию: воды	Х	Х	О	Х	О	Х	Х
смазочных масел	П	П	Х	ОХ	П	П	—
							1800—1900

Характеристика	Каучук						
	Натуральный	Бутадиен-стирольный	Полихлоропреновый	Бутадиен-нитрильный	Бутил-каучук	Кремний-органический	СКЭП
Фторкаучук							
алифатических углеводородов	П	П	Х	О	П	П	—
ароматических углеводородов	П	П	У	Х	П	П	—
кетонов	Х	Х	П	П	Х	У	—
разбавленных кислот	Х	Х	О	Х	О	О	—
концентрированных кислот	Х	Х	Х	Х	О	У	—
$\lg \delta$ при 50 Гц	(5—6)10 ³	7,5·10 ⁻³	1,5·10 ⁻¹	2·10 ⁻¹	6·10 ⁻⁴	(3—20)10 ⁻³	5·10 ⁻³
ϵ	2,2	2,5	6,8	16	2,2	2,7—4,5	2,7—3,4
ρ_{γ} , Ом·м	5·10 ¹³	8·10 ¹²	5·10 ⁹	1·10 ⁷	5·10 ¹³	2·10 ¹²	10 ¹⁴ —10 ¹⁵
$E_{\text{дф}}$, МВ/м	45	32	25	15	28	20—25	—
							(5—6)10 ⁻²
							5—6
							10 ¹²
							20—22

Примечание. О — отличная; ОХ — очень хорошая; Х — хорошая; У — удовлетворительная; П — плохая.

Присутствие групп CN_2 в жесткой высокофторированной молекулярной цепи обуславливает достаточную эластичность сравнительно с фторопластами.

Недостатками фторкаучуков являются невысокие электронизоляционные характеристики, связанные с полярностью материалов, ограниченная холодостойкость ($-30 \div -50^\circ\text{C}$) и трудность переработки. Последнее обстоятельство связано с повышенной по сравнению с другими каучуками жесткостью и требует специального оборудования.

Исследования в области фторкаучуков ведутся в направлении создания рецептур, способных перерабатываться на обычном оборудовании. Решение этой задачи существенно расширит области применения этих материалов.

Физико-механические и электронизоляционные характеристики различных каучуков приведены в табл. 8-2.

В. Ингредиенты резиновых смесей

По назначению различают следующие группы ингредиентов: вулканизующие агенты, ускорители, активаторы, наполнители, мягчители, стабилизаторы, красители.

Вулканизующие агенты способствуют образованию поперечных связей между молекулами каучука. Это приводит к тому, что резиновая смесь переходит из пластического состояния в эластичное.

Наиболее распространенными вулканизующими агентами являются сера и тиурам, причем последний в отличие от серы не вызывает коррозии меди в кабелях и обеспечивает большую теплостойкость резины. Тиурам применяется обычно в изоляционных резинах.

Для резиновых смесей на основе полихлоропренового каучука в качестве вулканизаторов применяются окислы металлов (ZnO , PbO , MgO); вулканизующими агентами бутилкаучука являются неорганические перекиси и некоторые смолы, а кремнийорганического и этиленпропиленового каучуков — органические перекиси (перекись бензоила и пр.).

Ускорители применяются для сокращения времени процесса вулканизации. Применение ускорителей позволяет также уменьшить количество серы в смесях и повышает физико-механические характеристики резины.

К ускорителям вулканизации относятся такие органические вещества, как каптакс, альтакс, цимат, дифенилгуанидин (ДФГ), тиурам и пр.

Активаторы повышают активность ускорителей. В качестве активатора наиболее часто употребляется окись цинка.

Наполнители вводят в состав резиновых смесей для улучшения их технологических свойств при переработке на различном оборудовании, уменьшения усадки, а также в целях снижения стоимости резиновой смеси. Некоторые (активные) наполнители улучшают физико-механические характеристики резины. К ним относятся различные виды сажи, каолин, цинковые белила и пр. Из неактивных наполнителей наиболее широко применяются мел и тальк.

Мягчители вводят в состав резиновой смеси для облегчения смешения ее составных частей, улучшения способности к переработке и придания резине глянцевої поверхности. Наиболее распространенными мягчителями являются парафин, смесь парафина с петролатумом (мягчитель ИП), стеариновая кислота, канифоль, дибутилфталат. Мягчители вводят в состав смесей в небольших количествах во избежание снижения их механических характеристик и замедления процесса вулканизации.

Стабилизаторы (противостарители) вводят в состав резиновых смесей для защиты каучуков от окисления при воздействии тепла, света, различных катализаторов окисления.

По механизму защиты каучука от окисления различают физические стабилизаторы, которые образуют на поверхности резины пленку, защищающую ее от воздействия кислорода и озона воздуха, и химические стабилизаторы, которые, реагируя с попадающим в резину кислородом, связывают его. К стабилизаторам первого типа относятся парафин, церезин и другие воски; из химических стабилизаторов наиболее широко применяется пезон Д (фенил-β-нафтиламин).

В качестве красителей применяют различные органические красители (пигменты — зеленый, голубой, оранжевый, лак — рубиновый и т. п.).

Для получения резины белого цвета применяют обычно цинковые белила, для получения резины черного цвета — различные сажи.

Для получения полупроводящих резин в них вводят графит, а материал, именуемый бензосульфогидразином, позволяет получить микропористую резину.

Г. Виды резин, применяемых в кабельной промышленности

Резины, применяемые в производстве кабелей и проводов, можно разделить на две большие группы: изоляционные и шланговые.

Изоляционные резины должны обладать высокими электроизоляционными характеристиками, эластичностью, механической прочностью, водостойкостью, озоностойкостью, теплостойкостью.

К шланговым резинам предъявляются требования высокой стойкости к различным деформирующим и истирающим воздействиям; они должны быть эластичными, холодостойкими, атмосферостойкими. В ряде случаев от шланговых резин требуется стойкость к действию агрессивных сред (масло-, бензостойкость).

В зависимости от перечисленных требований изменяются вид и количество каучуков и ингредиентов резиновых смесей.

Основные качества резины определяются видом и количеством каучука. В изоляционных резинах содержание каучука составляет 30—45%, а в отдельных случаях до 50—60%, в шланговых — 40—50%. ГОСТ 2068-70 устанавливает ряд типов резин (табл. 8-3).

В пределах каждого типа имеется несколько марок резин, различающихся рецептурой и способом переработки, но количество каучука в них и область применения одинаковы. Например, резины ТС-35, ТСШ-35 и ТСШ-35А относятся к типу резин РТИ-1. Количество каучука в них одинаково (35%), но первая резина накладывается в качестве изоляции на холодных прессах, вторая — на червячных прессах, третья — на агрегатах непрерывной вулканизации (АНВ).

В зависимости от требуемых показателей и условий переработки составляют различные рецептуры резиновых смесей. Для кабелей и проводов, работающих при небольших рабочих напряжениях (до 1 кВ), применяются резины с натуральным каучуком или его смесями с бутадиеновым и бутадиен-стирольным, а также каучук СКИ.

Типы резин (ГОСТ 2068-70) и области их применения

Тип	Содержание каучука в резине, %, не менее	Примерные области применения
РТИ-0	40	Теплостойкая изоляция кабелей для геофизических работ, специальных гибких, радиочастотных, высоковольтных рентгеновских кабелей
РТИ-1	35	Теплостойкая изоляция для силовых, контрольных, судовых, шахтных и других кабелей
РТИ-2	30	Теплостойкая изоляция для шланговых кабелей и проводов, бытовых шнуров, автомобильных, тракторных и других проводов
РНИ	35	Изоляция, не распространяющая горение, для осветительных проводов
РШИ-1	50	Резина для оболочек кабелей шахтных, торфяных, для землеройных горнодобывающих машин
РШТМ-2	45	Резина теплостойкая и холодостойкая для оболочек кабелей управления и силовых
РШМ-2	45	Резина холодостойкая для оболочек кабелей управления, силовых, шланговых
РШ-2	40	Резина для оболочек кабелей, шнуров и проводов гибких и особо гибких и других
РШТ-2	40	Резина теплостойкая для оболочек кабелей и проводов, работающих в средних и легких условиях
РШН-1	50	Резина маслостойкая, не распространяющая горение, для оболочек шахтных гибких экранированных кабелей
РШН-2	40	Резина маслостойкая, не распространяющая горение, для оболочек силовых, контрольных, судовых и других кабелей

Для резин, применяемых в кабельных изделиях, работающих при напряжениях свыше 1 кВ, используются такие озоностойкие каучуки, как бутилкаучук и этиленпропиленовый каучук (СКЭП, СКЭПТ).

Если требуется обеспечить высокую влагостойкость изоляции, то применяют натуральный и бутиловый каучуки, смеси каучуков с полиизобутиленом и полиэтиленом, а также используют тальк в качестве наполнителя, битумный лак в качестве мягчителя и т. п.

Для повышения нагревостойкости резин используют смеси на основе бутилкаучука ($85-110^{\circ}\text{C}$); кремнийорганический каучук (180°C), фторкаучук (200°C).

Ведутся работы по созданию кремнийорганических резин с нагревостойкостью до $250-300^{\circ}\text{C}$.

Ввиду того что кремнийорганический каучук обладает биологической инертностью, резины на его основе широко используются для создания кабелей и проводов, применяющихся в медицинской технике (для медицинского оборудования, для введения в живые организмы и т. п.).

Для шланговых резин, к которым предъявляются повышенные механические требования, применяются натуральный каучук в композициях с бутадиеновым (СКД) и бутадиен-стирольным (СКС).

Для негорючих шланговых резин, стойких к действию агрессивных сред, используется полихлоропреновый каучук.

Для негорючих нагревостойких шланговых резин, стойких также к действию агрессивных сред, используются фторкаучуки.

В изоляционных резинах (при использовании каучуков НК, СКД, СКИ, СКС) в качестве вулканизатора обычно применяется тиурам для повышения их теплостойкости и электроизоляционных характеристик.

В шланговых резинах в качестве активного наполнителя часто применяется углеродная сажа, которая одновременно повышает светостойкость смеси.

В высоковольтных шахтных кабелях применяется полупроводящая резина. Удельное объемное сопротивление ее составляет $0,1-10\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Проводимость резин увеличивают путем введения в них добавок сажи и графита.

8-4. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

А. Общая характеристика способов наложения изоляции или оболочки

Самый распространенный способ производства кабелей и проводов с пластмассовой изоляцией — изолирование (или ошлангование) на червячных прессах путем выдавливания расплава полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии. Этот способ обеспечивает вы-

сокую производительность, непрерывность процесса, дающую возможность выпускать продукцию большими длинами, широкую возможность автоматизации и создания поточных линий совмещенных процессов.

На червячных прессах перерабатываются такие термопластичные полимеры, как полиэтилен разных видов, смеси полиэтилена с полиизобутиленом, полипропилен, полиамиды, некоторые виды фторопластов, поливинилхлоридные пластикаты.

На червячных прессах можно получать изделия с большой радиальной толщиной монолитной изоляции без воздушных включений, что весьма существенно для высоковольтных кабелей и проводов. Кроме того, существуют червячные прессы для наложения нескольких слоев изоляции или изоляции и оболочек за один проход.

Вследствие того что фторопласт-4 не переходит в вязкотекучее состояние при повышении температуры, существуют специальные методы его переработки.

Широко используется метод обмотки лентами из фторопласта-4 для получения изоляции теплостойких, радиочастотных или стойких к агрессивным средам кабелей.

Для обмотки или продольного наложения на токопроводящую жилу применяются как строганные, так и давленные (сырые) или каландрованные пленки фторопласта-4 или фторопласта-4Д. После образования такой изоляции она обычно подвергается термообработке с целью получения монолитной изоляции («запечка» фторопласта).

Для получения тонкостенной изоляции или корделя для полувоздушной изоляции радиочастотных кабелей производят переработку фторопласта-4Д с добавкой замасливателя на плунжерных прессах методом смазанных паст. Полученная изоляция подвергается термообработке с целью удаления замасливателя и спекания материала.

Б. Основные сведения о реологических свойствах полимеров

Одной из важных в технологическом отношении особенностей полимеров является их способность протекать в расплавленном состоянии по каналам различной формы и выдавливаться через малые отверстия.

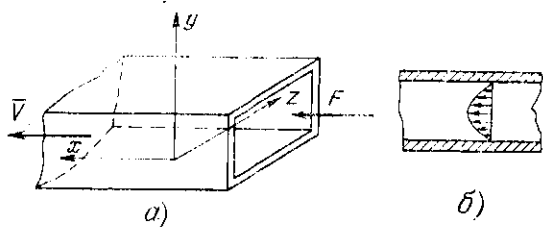


Рис. 8-2. Движение вязкой жидкости по каналу прямоугольной формы.

a — схема участка канала; F — выдавливающее усилие; v — направление движения жидкости; b — распределение скоростей слоев по оси y в плоскости xy .

Рассмотрим некоторые особенности реологии (наука о течении) полимеров.

При увеличении температуры сверх температуры текучести T_t силы межмолекулярного взаимодействия ослабевают и под действием приложенного усилия молекулы перемещаются относительно друг друга. Деформации полимера носят при этом необратимый характер, и он переходит в состояние пластического течения. Чем больше силы межмолекулярного взаимодействия, тем большее усилие необходимо приложить для выдавливания полимера или необходимо повысить температуру переработки. Некоторые полимеры (фторопласты, фторкаучуки и пр.) имеют температуру переработки, близкую к температуре разложения, что создает большие трудности при разработке технологических режимов.

При протекании полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии, через канал прямоугольного сечения его слои движутся с разными скоростями (рис. 8-2). Скорость движения слоев, соприкасающихся со стенками, можно считать равной нулю, в то время как скорость средних слоев наибольшая.

Для поддержания постоянства распределения скоростей по сечению необходимо приложить силу F , равную по значению и противоположную по знаку силе внутреннего трения рассматриваемого жидкого полимера. Эта сила связана с градиентом скорости уравнением Ньютона [Л. 33]

$$F = \mu S dv/dy, \quad (8-1)$$

где S — поверхность соприкосновения слоев жидкости;

μ — коэффициент пропорциональности (вязкость жидкости);

dv/dy — изменение скорости в направлении, перпендикулярном направлению движения жидкости (градиент скорости или скорость сдвига).

Вязкость жидкости численно равна силе внутреннего трения между двумя слоями с площадью, равной единице, при градиенте скорости, равном единице.

Уравнение Ньютона можно записать также в следующем виде:

$$\tau = \mu dv/dy \quad (8-2)$$

($\tau = F/S$ и называется напряжением сдвига).

Уравнение Ньютона справедливо для ламинарного течения несжимаемых жидкостей, вязкость которых не зависит от напряжения сдвига, а зависит только от температуры.

Большинству расплавов полимеров свойственна зависимость вязкости от напряжения или скорости сдвига, в связи с чем вводят понятие кажущейся (эффективной) вязкости.

Поведение расплавов полимеров при их течении зависит от степени ориентации молекулярных цепей в направлении течения. Чем выше скорость течения, а следовательно, и скорость сдвига, тем выше эта ориентация. Степень ориентации молекул будет высокой, если сдвигающие усилия достаточны для подавления дезориентированного хаотического теплового движения. Поэтому при низких скоростях сдвига ориентация молекул мала, тепловое хаотическое движение превалирует и расплав ведет себя как ньютоновская жидкость.

Вследствие большой длины концы молекулы могут находиться в слоях, движущихся с разными скоростями. При этом одна часть молекулы получает избыточную энергию от другой, находящейся в области более высоких скоростей (ближе к центру трубы). Эта энергия рассеивается в результате столкновений с другими молекулами, движущимися с малыми скоростями. Поэтому вязкость полимера высокая при малых скоростях сдвига.

При высоких скоростях сдвига определяющей является ориентация молекул за счет сдвигающих усилий, а влиянием теплового хаотического движения можно пренебречь, так как скорость ориентации высока. Даль-

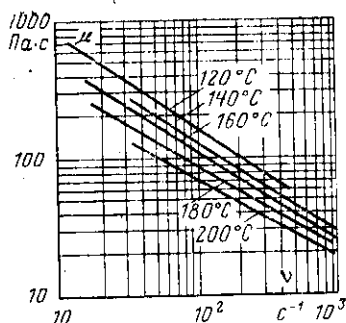


Рис. 8-3. Зависимость эффективной вязкости от эффективной скорости сдвига и температуры для полиэтилена низкой плотности (показатель текучести расплава 2,0 г/10 мин).

На рис. 8-3 представлена зависимость эффективной вязкости полиэтилена от скорости сдвига при различных температурах.

При протекании полимера по каналам различной формы он испытывает различное сопротивление R .

Существует следующая связь между объемом прошедшего в единицу времени материала Q , его эффективной вязкостью μ , падением давления по пути протекания ΔP и сопротивлением протеканию R :

$$Q = \Delta P / R \mu. \quad (8-3)$$

Величина, обратная R , характеризует пропускную способность канала. Ее называют константой сопротивления (K), она зависит от профиля и размеров данного канала.

Значение K можно определить следующим образом: для круглого канала

$$K = \frac{\pi d^4}{128 (L + 4d)}; \quad (8-4)$$

для прямоугольного канала

$$K = \frac{B \Delta^3}{12L}; \quad (8-5)$$

для канала с кольцевым отверстием

$$K = \frac{I \Delta^3}{12L}, \quad (8-6)$$

нейшее увеличение скорости сдвига в этом случае уже не влияет заметно на ориентацию, а отсюда поведение расплава опять приближается к свойствам ньютоновской жидкости.

При этом обмен количествами движения между слоями полностью ориентированных и выпрямленных молекул происходит как в обычных жидкостях. Поэтому вязкость расплава при больших скоростях сдвига низкая.

где L — длина канала;

d — диаметр круглого канала;

B — ширина канала;

Δ — высота прямоугольного канала или ширина кольцевого отверстия;

l — длина средней окружности кольцевого отверстия.

Скорость сдвига v в потоке полимера можно определить по следующим выражениям [Л. 28]:
для круглого канала

$$v = \frac{32Q}{\pi d^3}; \quad (8-7)$$

для прямоугольного канала

$$v = \frac{6Q}{\Delta^2 (B + \Delta)}; \quad (8-8)$$

для канала с кольцевым отверстием

$$v = \frac{6Q}{\Delta^2 (l + \Delta)}. \quad (8-9)$$

Эффективную вязкость определяют в зависимости от скорости сдвига v и при определенной температуре (рис. 8-3).

При повышенных скоростях сдвига поток расплава полимера может потерять стабильность. Это явление носит названия излома или разрыва расплава.

Для всех термопластов существуют критические скорости сдвига, выше которых наблюдается разрыв расплава. Поверхность выпрессованного материала при этом становится неровной, шероховатой.

Чем выше вязкость полимера, тем быстрее достигается критическая скорость сдвига и тем сильнее расплав подвержен разрыву. Во избежание этого явления при переработке полимеров с высокой вязкостью (например, фторопласты-40Ш и фторопласты-4М) приходится их прессовать с небольшими скоростями (в цилиндре, головке пресса) при увеличенных сечениях канала (см. § 8-4, л. Г).

Реологические свойства некоторых полимеров, в частности полиэтилена, оценивают через показатель текучести расплава ПТР, называемый также индексом расплава.

Для полиэтилена этот показатель характеризуется количеством полимера (в граммах), выдавленных через стандартное цилиндрическое отверстие под действием определенного груза при 190 °С за 10 мин.

Для полиэтилена с меньшим индексом расплава характерны большая молекулярная масса, большая плотность, теплостойкость, стойкость к растрескиванию, лучшие механические показатели.

В. Теоретические основы переработки полимеров на червячных прессах

Наиболее распространенным способом переработки высокомолекулярных соединений для наложения изоляции или защитных оболочек кабелей и проводов является выдавливание (экструзия) на червячных прессах.

В основе действия червячных прессов лежит способность полимеров протекать в расплавленном состоянии через узкие каналы под действием выдавливающего усилия.

Принципиальная схема червячного пресса изображена на рис. 8-4.

Полимерные материалы в виде мелких гранул подаются в загрузочную зону пресса 1. Основной рабочей частью пресса является червяк (шнек) 2. Он размещен в цилиндре 3 пресса, имеет винтовую нарезку и, вращаясь, захватывает нагревающийся материал, уплотняет его, гомогенизирует и подает в головку пресса 4, где расположен формующий инструмент 5.

Для уплотнения материала объем витка червяка на выходе делается меньше объема витка на входе; отношение этих объемов называется компрессией (степенью сжатия). Компрессия обеспечивается или путем уменьшения шага резьбы по длине червяка, или путем уменьшения глубины нарезки при постоянном шаге.

На рис. 8-5 показаны часть цилиндра и червяка с винтовой нарезкой.

Для объяснения причин осевого перемещения материала в прессе часто проводят аналогию с перемещаю-

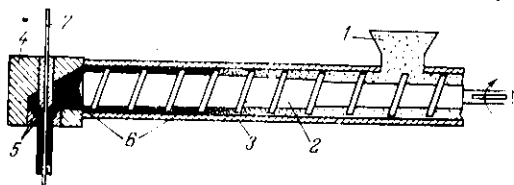


Рис. 8-4. Принципиальная схема червячного пресса.

1 — загрузочная зона; 2 — червяк; 3 — цилиндр; 4 — головка пресса; 5 — формующий инструмент (дори, матрица); 6 — расплав полимера; 7 — изолируемый проводник.

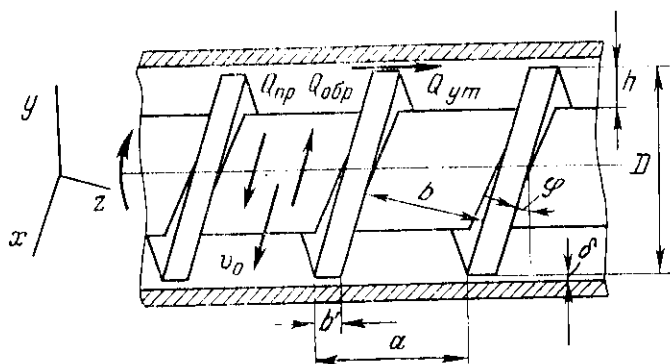


Рис. 8-5. Часть цилиндра прессы и червяка.

щейся по вращающемуся винту гайкой, которая удерживается от вращения внешней силой. Эта аналогия весьма условна, так как в отличие от монолитного металла (тело гайки) объем витка в прессе заполнен большим количеством отдельных гранул. Внешней силой, удерживающей материал от вращения с червяком, является сила трения между ним и стенками цилиндра прессы. Эта сила должна быть возможно большей, в то время как трение между полимерным материалом и поверхностью червяка — минимальной. В загрузочной зоне это достигается поддержанием определенных температур цилиндра и червяка, так как коэффициент трения полимера по стали зависит от температуры (рис. 8-6). В результате создается выдавливающее усилие, вызывающее перемещение материала от зоны загрузки к головке, по мере которого материал все более разогревается и уплотняется и в последней зоне цилиндра (дозировочной зоне) полностью переходит в состояние расплава. Поступая из цилиндра в головку и проходя через кольцевой зазор между дорном и матрицей, полимер формируется в цилиндрический слой изоляции или оболочку.

Стенки червяка и цилиндра, каналы головки, различ-

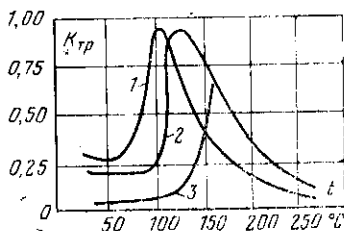


Рис. 8-6. Зависимость коэффициента трения полимеров по стали от температуры.

1 — полиэтилен низкой плотности;
2 — полиэтилен высокой плотности;
3 — поливинилхлорид средней твердости.

ные детали, встречающиеся на пути потока (фильтрующие сетки, решетки, выравниватели направления потока и т. п.), оказывают сопротивление течению расплава. Это ведет к увеличению давления внутри пресса, которое становится максимальным примерно в конце дозирующей зоны перед головкой. Таким образом, между концом цилиндра (максимальное давление) и началом цилиндра (атмосферное давление) существует разность давлений или, как ее обычно называют, противодавление, превышающее в несколько десятков раз атмосферное.

Наличие этого противодействия необходимо для сжатия материала и получения монолитной однородной изолляции без воздушных включений. Однако из-за противодействия уменьшается количество материала, поступающего в головку, что в конечном счете приводит к уменьшению объемной производительности пресса.

Расчеты производительности прессов основаны на принципе наложения трех различных потоков в канале червяка. Помимо основного потока массы — прямого потока $Q_{пр}$ (рис. 8-5) рассматриваются обратный поток $Q_{обр}$ и поток утечки $Q_{ут}$. Поток $Q_{обр}$ направлен навстречу основному потоку по каналу червяка, а поток $Q_{ут}$ проходит по зазору между стенками цилиндра и витками резьбы червяка. Потоки $Q_{обр}$ и $Q_{ут}$ вызваны наличием противодействия в цилиндре пресса.

Следует иметь в виду, что в действительности имеет место движение результирующего потока Q , а не отдельных указанных его составляющих.

Применяя принцип суперпозиции, можно записать:

$$Q = Q_{пр} - Q_{обр} - Q_{ут}. \quad (8-10)$$

Течение жидкости в общем случае описывается линейным дифференциальным уравнением Навье — Стокса [Л. 36], которое связывает скорость потока с градиентом давления:

$$\text{grad } P = \mu \Delta v, \quad (8-11)$$

где P — локальное давление;

μ — вязкость, зависящая только от температуры;

v — вектор локальной скорости расплавленного материала;

Δ — оператор Лапласа.

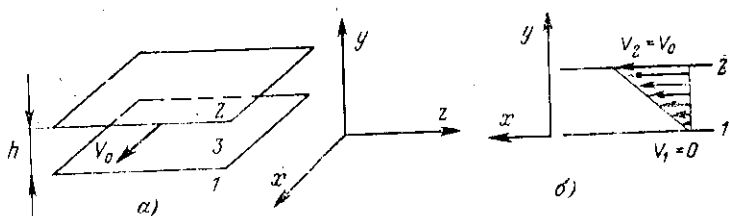


Рис. 8-7. Двухпластинчатая модель винтового канала червяка.

а — двухпластинчатая модель: 1 — неподвижная пластина; 2 — движущаяся пластина; 3 — вязкая жидкость; б — распределение скоростей вязкой жидкости по оси y .

Применяя (8-11) для описания ламинарного течения несжимаемой изотропной жидкости вдоль канала червяка (ось x , рис. 8-5), получаем [Л. 28]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{\partial \mu}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{\partial \mu}{\partial y}. \quad (8-12)$$

Так как в уравнении (8-12) вязкость может зависеть от положения элемента жидкости в канале и определяться температурой и градиентом скорости в этой точке, то это уравнение не требует, чтобы жидкость обладала ньютоновскими свойствами и процесс был изотермичным.

Обычно вязкость расплава очень мало изменяется вдоль оси z в поперечном сечении канала. Поэтому можно считать $\partial \mu / \partial z = 0$ и (8-12) примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{\partial \mu}{\partial y}. \quad (8-13)$$

Ввиду большой сложности решения данного уравнения обычно ограничиваются частными решениями, описывающими изотермический или адиабатический режимы работы и применимыми для большинства практических случаев. Предположив, что вязкость расплава по всей площади поперечного сечения канала постоянна, получим $d\mu/dy = 0$. Это допущение предполагает изотермический режим работы, т. е. что температура расплава по всей площади сечения канала постоянна.

Для червяков с малым отношением глубины канала к его ширине можно пренебречь изменением скорости по оси z . В этом случае $d^2 v_x / dz^2 = 0$ и (8-13) принимает вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}$$

$$\text{или} \quad \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (8-14)$$

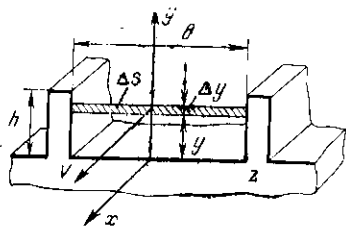


Рис. 8-8. Схема канала червяка (к расчету объемной производительности).

Это уравнение описывает одномерное течение пьютоновской жидкости в канале червяка. В этом случае задача сводится к рассмотрению двухпластинчатой модели (рис. 8-7).

Более удобно для анализа работы червячного пресса считать, что червяк неподвижен, а цилиндр пресса вращается в направлении, противоположном действительному вращению червяка. При этом относительные скорости цилиндра и червяка будут такими же, как в реальном случае.

Таким образом, вязкая пьютоновская жидкость находится между неподвижной 1 (червяк) и движущейся 2 (цилиндр) пластинами.

Граничные условия для решения дифференциального уравнения вытекают из предположения, что жидкость смачивает как поверхность движущейся пластины 2, с которой она соприкасается, так и поверхность неподвижной пластины 1, т. е.

$$v_1 = 0; \quad v_2 = v_0, \quad (8-15)$$

где v_0 — скорость перемещения пластины (линейная скорость вращения цилиндра).

Если расстояние между двумя пластинами (высота нарезки червяка или глубина канала) равна h (рис. 8-7), то путем двукратного интегрирования (8-14) по переменной y с учетом граничных условий (8-15) получаем:

$$v_x(y) = \frac{v_0 y}{h} - \frac{h y - y^2}{2\mu} \frac{dP}{dx}. \quad (8-16)$$

Первый член этого уравнения представляет собой скорость прямого потока, второй — обратного.

Для определения объема массы, проходящей через поперечное сечение канала червяка в единицу времени (объемная производительность), нужно проинтегрировать по сечению канала (рис. 8-8) произведение скорости в

данной точке на площадь элементарного участка $\Delta S = b\Delta y$, соответствующего этой точке:

$$Q = Q_{\text{уп}} - Q_{\text{отп}} = \int_0^h v_x dS = \int_0^h v_x b dy = \\ = \int_0^h \left(\frac{v_0 y}{h} - \frac{hy - y^2}{2\mu} \frac{dP}{dx} \right) b dy = \frac{v_0 b h}{2} - \frac{bh^3}{12\mu} \frac{dP}{dx}. \quad (8-17)$$

Выразим v_0 , b и dx через параметры пресса — частоту вращения, диаметр и длину червяка.

Из рис. 8-5 имеем:

$$\left. \begin{aligned} v_0 &= \pi D n \cos \varphi; & b &= (a - b') \cos \varphi; \\ a &\text{— шаг резьбы } (a = \pi D \operatorname{tg} \varphi); \end{aligned} \right\} \quad (8-18)$$

$$dx = dl / \sin \varphi, \quad (8-19)$$

где dl — расстояние вдоль оси червяка, соответствующее расстоянию dx по оси канала червяка.

Считаем, что ширинаребня парезки b' значительно меньше шага резьбы a , т. е. $b' \ll \pi D \operatorname{tg} \varphi$, поэтому

$$b = \pi D \operatorname{tg} \varphi \cos \varphi = \pi D \sin \varphi. \quad (8-20)$$

Подставляя (8-18), (8-19) и (8-20) в (8-17), получаем:

$$Q = \frac{\pi D n \cos \varphi \pi D \sin \varphi h}{2} - \frac{\pi D \sin \varphi h^3}{12\mu} \frac{dP \sin \varphi}{dl} = \\ = \frac{\pi^2 D^2 n h \sin \varphi \cos \varphi}{2} - \frac{\pi D h^3 \sin^2 \varphi}{12\mu} \frac{dP}{dl}. \quad (8-21)$$

Уравнение (8-21) не учитывает потока утечки $Q_{\text{ут}}$. Выражение для этого потока можно получить при рассмотрении прохождения жидкости через прямоугольный паз шириной $\pi D \cos \varphi$, длиной $b' \cos \varphi$ и высотой δ .

Решив (8-14) с учетом соответствующих граничных условий, получим:

$$Q_{\text{ут}} = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \operatorname{tg} \varphi}{12\mu b'} \frac{dP}{dl}. \quad (8-22)$$

Изменение давления dP/dl при выводе (8-21) и (8-22) принималось постоянным по всей длине пути потока массы. Это определяет линейное увеличение давления по длине канала, т. е.

$$dP/dl = (P_2 - P_1)/L_{12},$$

где P_1 и P_2 — давление массы соответственно в начале и конце дозирующей (выходной) зоны;

L_{12} — длина дозирующей зоны.

Здесь сделано допущение, что увеличение давления начинается с начала дозирующей зоны, а в загрузочной и переходной зонах давление равно атмосферному.

В конечном виде уравнение для объемной производительности имеет вид:

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 n h \sin \varphi \cos \varphi}{2} - \frac{\pi D h^3 \sin^2 \varphi}{12 \mu} \frac{P_2 - P_1}{L_{12}} - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \operatorname{tg} \varphi}{12 \mu b'} \frac{P_2 - P_1}{L_{12}}. \quad (8-23)$$

В этом выражении линейные размеры измеряются в метрах, частота вращения червяка — в оборотах в секунду; эффективная динамическая вязкость имеет размерность паскаль в секунду; давление — паскаль.

Из выходной зоны цилиндра расплавленный полимер попадает в головку пресса, где расположен формующий инструмент. Количество массы, проходящей через формующий инструмент за единицу времени, прямо пропорционально перепаду давления в головке ΔP и обратно пропорционально сопротивлению R , оказываемому потоку стенками головки, и вязкости материала:

$$Q = \Delta P / R \mu. \quad (8-24)$$

При расчетах часто вводят величину, обратную сопротивлению R , и обозначают ее как константу головки k (см. § 8-4, п. Б). Наибольшее влияние на значение k оказывает кольцевой зазор между проводником и цилиндрической частью матрицы. Поэтому в первом приближении константу головки можно определить следующим образом:

$$k = \pi d_{\text{ср}} \Delta^3 / 12 l, \quad (8-25)$$

где $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр зазора;

Δ — ширина зазора;

l — длина кольцевого зазора, равная длине цилиндрической части матрицы.

Уравнение (8-23) можно привести к виду

$$Q = A n - (B + C) \Delta P / \mu, \quad (8-26)$$

где

$$A = \frac{\pi^2 D^2 h \sin \varphi \cos \varphi}{2}; \quad B = \frac{\pi D h^3 \sin^2 \varphi}{12 L_{12}}; \quad C = \frac{\pi^3 D^2 \delta^3 \operatorname{tg} \varphi}{12 b' L_{12}}.$$

Коэффициенты A , B и C определяются только геометрическими размерами червяка и цилиндра. Приняв, что перепады давлений ΔP и вязкости расплава по длине выходной зоны и длине головки равны, из совместного решения (8-24) и (8-26) можно получить выражение для объемной производительности червячного пресса:

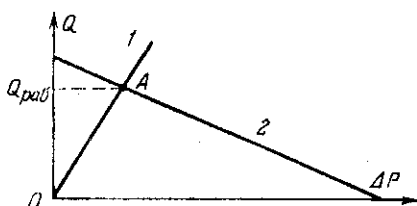


Рис. 8-9. Зависимость производительности червячного пресса от давления ΔP .

1 — характеристика формующего инструмента; 2 — характеристика червяка.

$$Q = \frac{An}{1 + \frac{1}{k}(B + C)} \quad (8-27)$$

Из (8-27) видно, что производительность пресса при изотермическом выдавливании ньютоновской жидкости определяется в первую очередь геометрическими размерами червяка, цилиндра и формующего инструмента и частотой вращения червяка.

Уравнениям (8-24) и (8-26) соответствуют графические зависимости производительности от давления в головке и канале, изображенные на рис. 8-9.

Рабочая точка A , соответствующая производительности, полученной из (8-27), определяется как место пересечения характеристик червяка согласно (8-26) и формующего инструмента (8-24).

Уравнение (8-27), выведенное с учетом ряда допущений, иногда называют одномерным или упрощенным уравнением выдавливания (шприцевания). Существуют более общие решения (8-13), позволяющие учитывать изменение вязкости по объему канала и скорости расплава по ширине канала, кривизну винтового канала червяка и пр. Ввиду того, что рассмотрение этих решений выходит за рамки курса «Основы кабельной техники», ниже рассмотрен лишь случай, когда учитывается изменение вязкости по глубине канала. Это необходимо учитывать из-за того, что большинство существующих червячных прессов имеет принудительный обогрев или охлаждение цилиндра и червяка. Поэтому нельзя не учитывать изменения температуры, а следовательно, и вязкости по сечению канала.

Для рассматриваемого случая (8-13) примет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{\partial \mu}{\partial y}. \quad (8-28)$$

Решением этого уравнения в предположении, что вязкость расплава в канале изменяется пропорционально расстоянию от дна канала и поток утечки мал, будет выражение [Л. 28]

$$Q = F_{\text{пр}} A n - F_{\text{обр}} \frac{B'}{\mu_{\text{ср}}} \frac{dP}{dl}, \quad (8-29)$$

где

$$B' = \frac{\pi D h^3 \sin^2 \varphi}{12};$$

$\mu_{\text{ср}}$ — средняя вязкость расплава в канале:

$$\mu_{\text{ср}} = (\mu_{\text{ч}} + \mu_{\text{ц}})/2, \quad (8-30)$$

где $\mu_{\text{ч}}$ — вязкость расплава около поверхности червяка (на дне канала);

$\mu_{\text{ц}}$ — вязкость расплава у стенки цилиндра;

$F_{\text{пр}}$, $F_{\text{обр}}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние изменения вязкости вещества по высоте парезки на прямой и обратный поток.

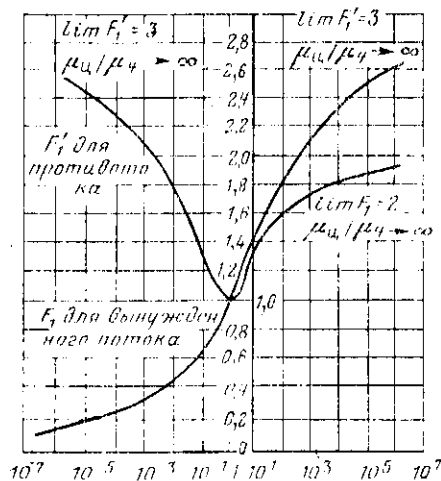


Рис. 8-10. Поправочные коэффициенты, учитывающие изменение вязкости по глубине канала червяка.

Эти коэффициенты зависят только от отношения $\gamma = \mu_{\text{ц}}/\mu_{\text{г}}$ и определяются по рис. 8-10 или выражениями

$$F_{\text{пр}} = 2[\gamma/(\gamma-1) - 1/\ln\gamma] \quad (8-31)$$

и

$$F_{\text{обр}} = \frac{3(1+\gamma)}{1-\gamma} [1 - F_{\text{пр}}]. \quad (8-32)$$

При $\mu_{\text{ц}} = \mu_{\text{г}}$ коэффициенты $F_{\text{пр}}$ и $F_{\text{обр}}$ равны единице и (8-29) совпадает с (8-26).

Для неньютоновских жидкостей, к которым относится большинство применяемых в кабельной технике расплавов полимеров, вязкость в головке может не совпадать с вязкостью в канале червяка из-за различий градиента скорости или температуры.

Если обозначить вязкость в канале червяка через $\mu_{\text{ср}}$, а вязкость в головке через $\mu_{\text{г}}$, то (8-24) и (8-26) принимают в этом случае вид:

$$Q = \Delta P_{\text{г}}/R\mu_{\text{г}} = \Delta P_{\text{г}}k/\mu_{\text{г}}; \quad (8-33)$$

$$Q = F_{\text{пр}}An - F_{\text{обр}}(B+C)\Delta P_{\text{ч}}/\mu_{\text{ср}}. \quad (8-34)$$

Если приравнять давления на выходе из цилиндра и на входе в головку, то перепад давлений вдоль оси червяка будет равен перепаду давлений в головке, т. е. $\Delta P_{\text{ч}} = \Delta P_{\text{г}}$.

Из совместного решения (8-33) и (8-34) получим:

$$Q = \frac{F_{\text{пр}}An}{1 + \frac{\mu_{\text{г}}}{\mu_{\text{ср}}} \frac{F_{\text{обр}}(B+C)}{k}}; \quad (8-35)$$

$$\Delta P = \frac{F_{\text{пр}}An}{\frac{k}{\mu_{\text{г}}} + \frac{F_{\text{обр}}(B+C)}{\mu_{\text{ср}}}}. \quad (8-36)$$

Эти уравнения позволяют определить производительность и давление при выдавливании как точку пересечения характеристик червяка и головки.

Для ньютоновской жидкости при изотермическом режиме и при $\mu_{\text{ср}} = \mu_{\text{г}}$ (8-27) и (8-35) совпадают.

Из (8-34) можно получить максимально возможное значение давления в прессе ($\Delta P_{\text{макс}}$). Если предположить, что $Q = 0$ (выход из цилиндра закрыт), то

$$\Delta P_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{пр}}}{F_{\text{обр}}} \frac{An\mu_{\text{ср}}}{B+C}. \quad (8-37)$$

Пользуясь параметром $\Delta P_{\text{макс}}$, можно рассчитать крепежные устройства для соединения головки с цилиндром.

По (8-27) и (8-35) можно рассчитать производительность пресса в предположении, что вязкость расплава не зависит от градиента скорости (или скорости сдвига).

Для того чтобы учесть эту зависимость, нужно знать скорости сдвига в различных частях пресса.

В канале дозирующей зоны червяка с достаточной точностью скорость сдвига определяется следующим выражением (рис. 8-7):

$$v = dv/dy = v_0/h = \pi Dn/h. \quad (8-38)$$

Каналы головки имеют сложную форму, и определить скорость сдвига в них труднее. Можно применять следующий способ, основанный на методе последовательных приближений. Считая в первом приближении, что скорости сдвига в головке и канале червяка равны, определяют $\mu_{\text{ср}}$ и $\mu_{\text{г}}$, зависящие от температуры.

По (8-35) определяют производительность пресса Q . Затем производится уточнение значений скорости сдвига полимера в различных участках головки.

Наибольшее сопротивление расплаву полимера в головке оказывают три участка: решетка, помещаемая перед входом в головку для выравнивания потока; кольцевой конический переход между дорном и матрицей и участок между жилой и цилиндрической частью матрицы.

Пропускная способность (константа K , м^3) решетки с числом отверстий m , диаметром отверстий d и толщиной L_1 определяется выражением

$$K_1 = m\pi d^4 / 128 L_1. \quad (8-39)$$

При известном количестве материала Q в соответствии с (8-7) скорость сдвига ($1/\text{с}$) расплава в решетке равна:

$$v_1 = 32Q / m\pi d^3. \quad (8-40)$$

Пропускная способность конического перехода в соответствии с (8-6) согласно рис. 8-11 равна:

$$K_2 = \frac{\pi}{8L_2} \left[R_{\text{Нср}}^4 - R_{\text{Вср}}^4 - \frac{(R_{\text{Нср}}^2 - R_{\text{Вср}}^2)^2}{\ln R_{\text{Нср}}/R_{\text{Вср}}} \right], \quad (8-41)$$

где размеры кольцевой щели определяются в среднем сечении.

Скорость сдвига в коническом переходе с учетом (8-9) равна:

$$v_2 = 24Q / \pi (R_{\text{ср.вх}} + R_{\text{ср.вых}}) (\delta_{\text{вх}} + \delta_{\text{вых}})^2, \quad (8-42)$$

где $R_{\text{ср}}$ — радиус средней окружности кольцевой щели;

δ_1, δ_2 — радиальная толщина кольцевой щели на входе и выходе конического перехода.

Константа калибрующей (цилиндрической) части матрицы (K_3) определяется из (8-6).

Скорость сдвига в калибрующей части матрицы в соответствии с (8-9) равна:

$$v_3 = 6Q/\Delta^2(\pi d_{\text{ср}} + \Delta). \quad (8-43)$$

По известным v_1, v_2, v_3 с учетом температуры головки определяются эффективные вязкости μ_1, μ_2, μ_3 , а затем перепады давлений на соответствующих участках по формуле

$$\Delta P_n = Q\mu_n/K_n, \quad n=1; 2; 3. \quad (8-44)$$

По результирующему перепаду давления в головке $\Delta P_r = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$ определяют среднюю вязкость в головке $\mu_{\text{ср.г.}}$:

$$\mu_{\text{ср.г.}} = K_r \Delta P_r / Q, \quad (8-45)$$

где K_r — результирующая константа головки:

$$K_r = \frac{1}{1/K_1 + 1/K_2 + 1/K_3} \quad (8-46)$$

Уточненные значения константы головки K_r и вязкости в головке $\mu_{\text{ср.г.}}$ подставляют в (8-35) для более точного определения производительности пресса Q .

Если полученное значение Q сильно отличается от первоначального, аналогичный расчет проводят еще раз, подставляя в вышеприведенные выражения новое значение Q , и т. д.

Производительности прессов, установленные экспериментально, обычно несколько отличаются от тех, которые получаются по расчету. Это объясняется тем, что при выводе расчетных уравнений принимался ряд допущений.

Например, не учитывалось тормозящее влияние боковых стенок нарезки червяка (это приводит к зависимости скорости от координаты z), которое тем больше,

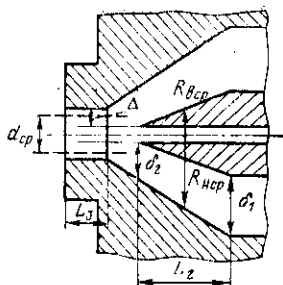


Рис. 8-11. Схема расположения дорна и матрицы в головке червячного пресса.

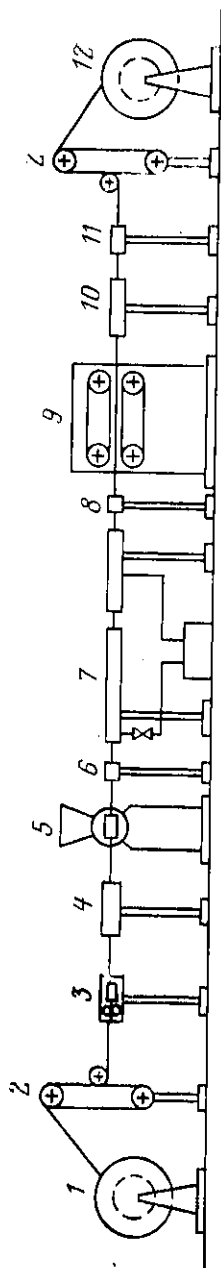


Рис. 8-12. Схема агрегата для наложения пластмассовой изоляции или оболочки.

чем глубже его парезка. Не учитывалась также ширина гребня парезки. Эту погрешность, которая может быть заметной для многозаходных червяков, можно учесть введением соответствующих поправок в (8-23) — (8-26). Градиент давления dP/dl в выходной зоне принимался постоянным по длине витового канала, а перепад давления в цилиндре (ΔP) — приходящимся целиком на эту зону. В реальных условиях эксплуатации это не совсем так.

При работе пресса также неизбежны колебания температуры, давления, частоты вращения червяка. Все это влияет сложным образом на производительность пресса.

Приведенные соотношения можно использовать для приближенного расчета червячных прессов.

Г. Особенности технологии наложения изоляции и оболочек на червячных прессах

Червячный пресс является основным технологическим узлом агрегата для наложения изоляции или оболочки из полимерных материалов (рис. 8-12). Кроме пресса, в агрегат входят отдающее (1), охлаждающее (7), тяговое (9) и приемное (12) устройства, а также ряд дополнительных узлов, паличие которых вызвано спецификой переработки конкретного полимера или кабельного изделия.

Токопроводящие жилы (особенно однопроволочные) после

отдающего устройства обычно проходят через систему роликов 3 для выпрямления. Перед головкой прессы имеется подогревное устройство 4, выполненное в виде контактных роликов, обеспечивающих пропускание тока по жиле, или обогреваемой трубе. Нагрев заготовки необходим как для лучшей адгезии жилы с изоляцией, так и для обеспечения стабильного температурного режима в головке прессы.

После выхода из червячного прессы 5 изолированная жила проходит через измеритель диаметра 6 бесконтактного типа и поступает в охлаждающее устройство, которое обычно выполняется в виде одной или нескольких ванн с водой в зависимости от материала изоляции.

После ванны стоит сушильное устройство 8, где изделие сушится с помощью обдува воздухом.

Тяговое устройство 9 может быть колесного или гусеничного типов, причем последнее применяется для изделий большого диаметра или с пластичной изоляцией.

Для выявления дефектов в изоляции применяется аппарат сухого испытания (АСИ) 10, в котором между поверхностью изоляции и жилой прикладывается переменное напряжение промышленной или повышенной частоты. В последнем случае аппарат носит название ЗАСИ (звуковой) или ВАСИ (высокочастотный). Затем провод проходит счетчик длины 11.

Компенсаторы 2 применяются для обеспечения постоянного натяжения провода по мере заполнения приемного барабана 12 и изменения линейной скорости провода. Это достигается путем регулирования частоты вращения приемного барабана.

Процессы наложения изоляции и оболочки на червячных прессах весьма схожи, однако имеются и различия. Прежде всего различается формирующий инструмент (дорн, матрица) при изолировании и опланировании.

При наложении изоляции обычно требуется ее плотное прилегание к токопроводящей жиле, обеспечивающее отсутствие воздушных включений у поверхности жилы. Этого можно достигнуть взаимным расположением дорна

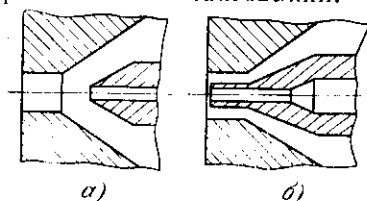


Рис. 8-13. Схемы расположения дорна и матрицы при наложении изоляции (а) и оболочки (б).

и матрицы, показанным на рис. 8-13,а. Чем больше расстояние a между дорном и началом цилиндрической части матрицы, тем с большим обжатием накладывается изоляция. Однако увеличивающееся при этом давление может привести к нарушению центровки и обрыву жилы.

При наложении изоляции размер a обычно выбирается равным удвоенной толщине изоляции. Длина цилиндрической части матрицы L_m часто принимается равной ее диаметру. Угол между конусными поверхностями матрицы и дорна составляет $1-3^\circ$.

При наложении оболочки обычно требуется получить ее в виде трубки, свободно располагающейся поверх изделия. Расположения дорна и матрицы, соответствующие этому случаю, показаны на рис. 8-13,б.

Весьма существенные различия в устройстве отдельных узлов пресса и всего агрегата, в температурных режимах переработки и охлаждения наблюдаются также при использовании различных термопластов в качестве изоляции или оболочки.

При переработке полиэтилена в червячном прессе поддерживается следующий температурный режим ($^\circ\text{C}$) по зонам обогрева:

1-я зона . . .	100—120	Головка . . .	200—270
2-я зона . . .	150—180		
3-я зона . . .	180—240	Матрица . . .	220—300

Верхние границы указанных значений соответствуют случаям опрессования с высокими скоростями (более 600 м/мин).

Приведенные значения применяются при переработке полиэтилена низкой плотности.

В случае использования полиэтилена высокой плотности температуры повышаются на $40-60^\circ\text{C}$.

Охлаждение наложенного слоя полиэтилена производится постепенно. Охлаждающая ванна состоит в этом случае обычно из трех секций. В первой температура воды в пределах $80-90^\circ\text{C}$, во второй $50-70^\circ\text{C}$, в третьей $20-40^\circ\text{C}$.

Постепенное охлаждение полиэтилена особенно необходимо при изготовлении изделий с толстым слоем изоляции или оболочки. Полиэтилен имеет большой температурный коэффициент расширения (усадки) при сравнительно низкой теплопроводности. Поэтому при резком охлаждении наружные слои, охлаждаясь, деформируют-

ся и воздействуют на внутренние, находящиеся еще в расплавленном состоянии. Поэтому возможно образование внутренних напряжений в толще изоляции, а также появление воздушных пустот в результате усадки внутренних слоев при сформировавшихся ранее наружных.

В зависимости от толщины слоя и скорости опрессовывания подбирают соответствующие температуры и длину секций охлаждающей ванны (см. § 8-6, п. Г).

В связи с усадкой полиэтилена при охлаждении диаметр матрицы D_m выбирается несколько большим, чем требуемый диаметр по изоляции.

Основные особенности переработки поливинилхлоридных пластикатов на червячных прессах заключаются в изменении температур в зонах обогрева пресса, конструкции червяка, головки и охлаждающей ванны.

В головке применяются специальные рассекатели и выравниватели потока, обеспечивающие наложение слоя материала концентричным слоем.

Температура ($^{\circ}\text{C}$) в зонах пресса изменяется для различных рецептур пластиката и составляет:

1-я зона . . .	100—110	Головка . . .	160—180
2-я зона . . .	110—150		
3-я зона . . .	120—160	Матрица . . .	180—200

Диаметр матрицы принимается равным диаметру изоляции или оболочки по поверхности.

Охлаждающая ванна выполняется из одной секции с холодной водой.

Переработка фторосодержащих полимеров (фторопласт-4М, фторопласт-40Ш, фторопласт-2М и пр.) на червячных прессах подчиняется в основном тем же закономерностям, что и переработка полиэтилена, но сопряжена с рядом технических трудностей и имеет ряд особенностей.

Эти сополимеры переходят в состояние пластического течения при весьма высоких температурах ($300—400^{\circ}\text{C}$), часто близких к температуре разложения, и имеют вязкость расплава, значительно превышающую вязкость полиэтилена. При их переработке на прессах выделяются активные летучие фтористые вещества, вызывающие разрушение материала, из которых выполнены детали пресса, а также усложняющие работу обслуживающего персонала.

Поэтому червяк, втулка цилиндра, головка, инструмент выполняются из специальных никелевых сплавов, а агрегат снабжен системами приточно-вытяжной вентиляции.

Температуры по зонам пресса при переработке фторопласта-4М и фторопласта-40Ш составляют:

1-я зона . . .	260—310	Головка . . .	340—380
2-я зона . . .	280—320		
3-я зона . . .	320—340	Матрица . . .	330—370

Указанные температуры близки к температурам разложения сополимеров. Поэтому на пути прохождения расплава в цилиндре, головке, формирующем инструменте делают плавные внутренние переходы во избежание образования «мертвых» зон (скорость потока в которых равна нулю) и разложения материала из-за чрезмерного нагрева. По этой же причине, а также ввиду высокой вязкости расплава коническую часть матрицы обычно выполняют двухконусной с разницей углов в 5—10°. Цилиндрическая часть матрицы L_m принимается равной 12—20 D_m .

Поскольку фторопласты обладают высокой вязкостью расплава, их критические скорости сдвига невысоки и могут быть достигнуты при переработке со скоростями, применяемыми для полиэтилена. В этом случае может иметь место разрыв расплава этих полимеров (см. § 8-4, п. Б).

Во избежание этого частота вращения червяка принимается для них значительно меньшей (по сравнению с другими термопластами), а диаметр матрицы D_m делают намного больше, чем требуемый диаметр провода по изоляции.

При этом опрессование проводят с вытяжкой, которая происходит, если выдавливаемый в виде свободной трубки материал накладывается на жилу,двигающуюся со значительно большей скоростью. Этим достигается утоньшение слоя материала до требуемой радиальной толщины, уменьшение скорости сдвига и обеспечивается высокая скорость процесса изолирования.

Вытяжка может быть до 50-кратной. Линейная скорость изолирования при этом может достигать 200 м/мин при частоте вращения червяка 10—15 об/мин.

Весьма важным моментом является подогрев жилы перед входом в головку. Необходимо подобрать опти-

маленькую температуру подогрева, которая близка к температуре головки. При чрезмерном нагреве жилы может происходить разложение материала в матрице, при недостаточном нагреве из-за отбора жилой тепла от расплава температура его станет недостаточной для переработки. В результате резче проявляются внутренние силы взаимодействия, и в готовой изоляции формируются значительные внутренние «замороженные» напряжения. Слой такой изоляции подвержен растрескиванию и излому даже при нормальной температуре.

Для кабелей и проводов, изолированных фторосодержащими полимерами, применяется воздушное охлаждение или в среде теплоустойчивых жидкостей.

Особенности переработки полиамидных смол на червячных прессах связаны со следующими свойствами этих материалов: низкая вязкость расплава, сравнительно резкий переход из твердого состояния в расплав при повышении температуры, повышенные (по сравнению с полиэтиленом) температуры переработки и коррозионная активность этих материалов, повышенные физико-механические характеристики ориентированных оболочек, вытянутых при наложении ($^{\circ}\text{C}$).

Температуры, $^{\circ}\text{C}$, по зонам должны поддерживаться с точностью $\pm (1-2)^{\circ}\text{C}$:

В 1-й зоне цилиндра	200	В 3-й зоне	280
Во 2-й зоне	260	В головке	290

Детали пресса, соприкасающиеся с материалом, выполняются из легированных сталей.

Широко применяются тонкостенные оболочки из полиамидных смол, которые накладываются с вытяжкой при весьма высоких скоростях опрессования (400—800 м/мин). При таких скоростях за счет ориентации молекул улучшаются физико-механические свойства оболочек.

Размеры выпрессовываемой трубки должны быть примерно в 3—5 раз больше, чем требуемой оболочки.

Для увеличения плотности наложения слоя полимера применяется вакуумирование дорна.

Охлаждение изделия производят в ванне с холодной водой. Загружаясь в пресс полиамидная смола должна быть просушена, так как эти полимеры склонны к увлажнению, которое значительно ухудшает условия их переработки и эксплуатационные характеристики.

Д. Способы производства кабелей и проводов с изоляцией из фторопласта-4 и фторопласта-4Д.

Применение дублированных пленок

Фторопласт-4 при повышении температуры не переходит в состояние пластического течения. Поэтому его нельзя перерабатывать на обычных червячных прессах подобно таким термопластам, как полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат и пр. Для получения изоляции из этого материала применяют следующие способы: изолирование на плунжерных прессах методом смазанных паст на основе фторопласта-4Д, спиральная обмотка или продольное наложение строганных или давленных лент из фторопласта-4 или фторопласта-4Д.

Весьма перспективно также применение для изоляции дублированных (двухкомпонентных) пленок с использованием фторопластов.

а) Наложение изоляции методом смазанных паст. Этот способ применяется для изготовления кабелей и проводов с изоляцией небольшой радиальной толщины, а также для получения корделя, применяющегося в теплостойких радиочастотных кабелях или используемого для получения давленных пленок.

Изоляция накладывается на плунжерном прессе (рис. 8-14), в котором под действием плунжера 4 находящаяся в холодном состоянии смесь порошка фторопласта-4Д со смазкой (чистый бензин) формируется в головке пресса 6 в цилиндрический слой на жиле. После головки изолированная жила проходит

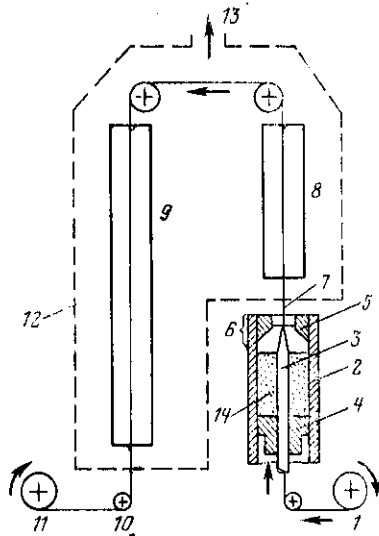


Рис. 8-14. Принципиальная схема плунжерного пресса.

1 — отдающее устройство; 2 — цилиндр; 3 — дорнодержатель с дорном; 4 — плунжер; 5 — матрица; 6 — головка пресса; 7 — изолированная жила; 8 — печь для сушки; 9 — печь запечки; 10 — тяговое устройство; 11 — приемное устройство; 12 — защитный кожух; 13 — отвод выделяющихся фтористых веществ; 14 — сформованная таблетка из пасты.

дит через печь сушки 8 и печь запечки 9 и поступает на приемное устройство 11.

В зоне сушки происходит удаление смазки из изоляции. Длина печи составляет 2—2,5 м, температура 200—250 °С с подразделением на две-три зоны. Печь запечки имеет длину около 3,5—4 м и четыре-пять зон нагрева. Средняя температура этих зон лежит в пределах 350—420 °С. При излишне высоких температурах могут происходить бурное вскипание смазки в зоне сушки и перегорание изоляции в зоне запечки. То и другое ведет к получению изоляции низкого качества. При достижении изоляцией 380—400 °С происходит ее спекание в монолитный слой в зоне запечки.

Плунжерный пресс является устройством периодического действия. Строительная длина изготавливаемого изделия определяется объемом таблетки 14, сформованной из смазанной пасты и заложенной в цилиндр 2 пресса. Отношение поперечного сечения таблетки к поперечному сечению выпрессовываемого материала (коэффициент сжатия) может достигать весьма больших значений (500—1000 для пасты на основе фторопласта-4Д). Это обеспечивает получение достаточно больших строительных длин при производстве кабельных изделий небольшого диаметра.

б) Способы изолирования жил лентами фторопласта-4 и фторопласта-4Д имеют широкое распространение, особенно при производстве изделий с большой радиальной толщиной. Изолирование может производиться путем обмотки на лентообмоточных машинах вертикального и горизонтального типов.

Чаще применяют строганые ленты. Они получают путем строжки из предварительно сформованной и спеченной заготовки из фторопласта-4. Строганые ленты бывают неориентированными и ориентированными. Ориентация достигается прокаткой ленты, что повышает ее механические характеристики в продольном направлении. При превышении температуры, при которой происходила ориентация, имеет место разориентация молекул. Это сопровождается усадкой пленки по длине. На этом свойстве основан способ получения плотной изоляции из лент фторопласта-4 путем ее термообработки при 320—350 °С.

Для получения тонкослойной монолитной изоляции миниатюрных теплостойких кабелей и проводов приме-

няются так называемые «сырые» или давленные (каландрованные) пленки из фторопласта-4Д.

Они получают путем прокатки прутков, полученных на плунжерном прессе из пасты на основе фторопласта-4Д. После прокатки смазка из пленки удаляется химическим путем.

Такие пленки при 380 °С легко спекаются, образуя монолитный слой изоляции. Однако наложение их путем обмотки сопряжено с рядом трудностей, связанных с низкой разрывной прочностью и способностью их растягиваться. Поэтому применяются специальные машины, обеспечивающие небольшие и регулируемые натяжения при обмотке. Применяются также способы продольного наложения на жилу давленных пленок с последующими обжатием и тепловой обработкой («сваркой»).

в) Применение дублированных пленок. В последнее время для получения тонкослойной монолитной изоляции применяются так называемые дублированные (двух- или трехслойные) пленки.

Один слой выполняется из материала, обеспечивающего пленке высокие механические характеристики (прочность на разрыв, стойкость к истиранию, прокалыванию и т. п.), другой — из термопластичного материала, способного при термообработке образовывать монолитный слой.

Известны такие дублированные пленки, как полиэтилен — лавсан (рабочие температуры 70—80 °С) полиимид — фторопласт-4М (рабочая температура 200 °С). Упрочняющей основой в них являются такие высокопрочные материалы, как полиэтилентерефталат (лавсан) и полиимид. Изоляцию из дублированных пленок получают методом обмотки и путем продольного наложения с обжатием при нагреве (тепловая сварка).

Дублированные пленки перспективны для изготовления изоляции миниатюрных кабельных изделий (микромонтажные провода, ленточные провода и кабели).

8.3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ С РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

А. Основные способы наложения резиновой изоляции или оболочки

Существует ряд способов наложения цилиндрического слоя резины. Одни основаны на способности невулканизованной («сырой») подогретой резиновой смеси вы-

давливаясь через формующий инструмент, другие — на способности резиновой смеси склеиваться в холодном состоянии под действием сжимающих нагрузок.

Первый способ реализуется при переработке резин на червячных («горячих») прессах и агрегатах непрерывной вулканизации (АНВ), второй способ — при наложении резиновой изоляции на продольно-покрывательных («холодных») прессах.

Существует также способ получения изоляции путем обмотки токопроводящих жил лентами невулканизированной резины.

После образования слоя изоляции или оболочки изделие должно быть подвергнуто вулканизации для образования сшитой структуры, обеспечивающей материалу необходимые физико-механические свойства. Вулканизация проводится при $140\text{--}200^\circ\text{C}$ и давлении пара или газа $0,3\text{--}2$ МПа. Процессы наложения резины и ее вулканизации могут проводиться отдельно. В этом случае вулканизация производится в вулканизационных котлах.

Более прогрессивным и перспективным является метод последовательного проведения изолирования (или наложения оболочки) и вулканизации, проводимых на одной установке АНВ. Некоторые виды резин (например, кремнийорганические) требуют проведения вулканизации в две стадии. Во время первой изолированный провод после червячного пресса проходит через вулканизационную трубу. Затем проводится вторая стадия в вулканизационных котлах или термощкафах.

Перспективным методом является радиационная вулканизация, во время которой сшитая структура резины образуется в результате воздействия на нее микрочастиц высокой энергии.

В зависимости от способа наложения изоляции или оболочки и методов вулканизации применяются те или иные рецептуры резиновых смесей. Для переработки на червячных прессах требуются мягкие пластичные смеси, для АНВ — пластичные, быстровулканизирующиеся смеси, для холодного опрессования — достаточно жесткие и клейкие резины.

На кабельных заводах, производящих кабели и провода с резиновой изоляцией, обычно имеются резиноделательные цеха, в которых производятся обработ-

ка каучука и ингредиентов, смешение компонентов и последующая обработка готовых смесей. Различные методы наложения изоляции или оболочки требуют разной предварительной обработки резиновых смесей.

Б. Изготовление резиновых смесей

Для наложения резиновой изоляции на провода и кабели методом горячего или холодного опрессования необходимо провести ряд технологических операций, имеющих целью достижение определенных свойств резиновой смеси, предназначенной для переработки. К таким операциям относятся подготовка каучуков и ингредиентов резиновых смесей, развешивание компонентов, смешение, листование, фильтрация (стрейпирование), каландрование, резка на ленты и пр.

Схема технологического процесса резиноделательного цеха кабельного завода приведена на рис. 8-15.

К подготовительным операциям перед смешением компонентов можно отнести такие, как очистка, сушка и просев сыпучих ингредиентов.

Сушка производится в сушильных устройствах периодического и непрерывного действия. К первым относятся вакуумные шкафы и котлы, ко вторым — роторные, червячные и барабанные сушилки.

Просев сыпучих материалов осуществляют в специальных сеялках, где частицы материала проходят через тканевые или металлические сита, которые в зависимости от конструкции сеялки могут быть неподвижными или перемещающимися внутри корпуса. Различают сеялки с неподвижными, цилиндрическими вращающимися или совершающими возвратно-поступательное движение ситами. Имеются агрегаты, где совмещены процессы дробления, сушки и просева сыпучих материалов.

К подготовительным операциям относится также очистка мягчителей. Материалы, имеющие температуру плавления до 140°C , фильтруются в расплавленном состоянии (дибутилфталат, парафин), материалы с температурой плавления выше 140°C (рубракс) дробятся в молотковых дробилках.

Для подготовки каучука к смешению поступающие на завод каучуки подвергаются нагреву в камерах для просушки и облегчения условий резки. Время

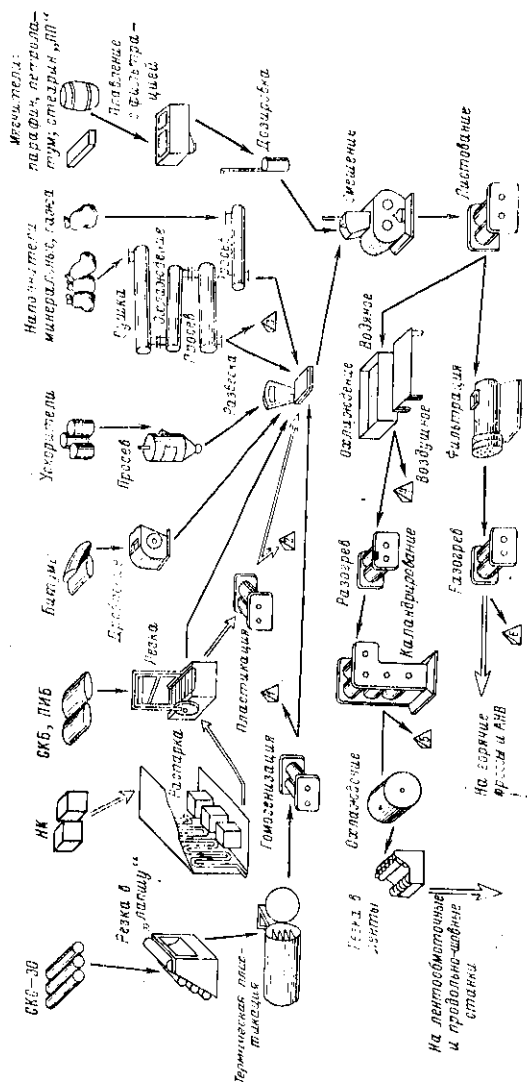


Рис. 8-15. Общая схема резиноделательного цеха.

прогрева и температуры разные для каучуков разных видов. Многие синтетические каучуки не требуют прогрева (СКБ, СКБМ, СКД). Весьма эффективным является прогрев кип натурального каучука в электрическом поле высокой частоты.

Для резки каучуков применяются специальные пожигильотинного типа с механическим приводом.

При нормальной температуре каучук находится обычно в эластичном состоянии, т. е. восстанавливает свою форму после снятия деформирующих нагрузок. Для проведения процесса смешения каучуков с различными ингредиентами необходимо повысить его пластические свойства, для чего каучук подвергают пластикации, т. е. механической, окислительно-тепловой или химической обработке. Пластикация необходима в основном для натурального каучука. Во время этого процесса под действием различных факторов происходит частичная деструкция длинных молекул, т. е. повышается пластичность материала.

Наиболее прогрессивным способом пластикации является осуществление ее в пластиляторах червячного типа, что обеспечивает непрерывность процесса и совмещения технологических операций.

Подготовленные каучук и ингредиенты должны быть смешаны в строго определенных соотношениях согласно рецепту резиновой смеси. Так как даже небольшие отклонения по массе от требуемого соотношения могут существенно ухудшить характеристики резины, применяют автоматическое развешивание и дозировку компонентов смеси.

Одной из наиболее ответственных операций при изготовлении резиновых смесей является смешение каучуков с другими ингредиентами. Смешение обычно проводится в закрытых резиносмесителях. В результате этого процесса частицы каучука должны равномерно обволакивать частицы других порошкообразных компонентов с целью получения однородной по виду и свойствам смеси. От правильности выбранного режима смешения (последовательность введения ингредиентов, температура и давление на смесь и пр.) зависят технологичность смеси и ее физико-механические и электроизоляционные показатели.

После резиносмесителя смесь поступает на вальцы, которые очень широко применяются в резиноделатель-

ном производстве. Они необходимы для получения резины в форме листов или рулонов, удобных для транспортировки, проведения последующих технологических процессов (охлаждение, каландрование и т. п.), а также хранения.

Для улучшения качества резиновых смесей, увеличения производительности и повышения культуры производства применяются поточные полуавтоматические линии изготовления резиновых смесей (ПАЛ). Отдельные операции выполняются в них на обычном оборудовании, которое соединяется в последовательную технологическую цепочку при помощи различных транспортных средств непрерывного действия (вертикальные элеваторы, ленточные и червячные транспортеры, пневматические системы подачи).

Контроль отдельных технологических процессов и управление ими осуществляются автоматически с общего пульта управления.

Для очистки резиновых смесей от возможных загрязнений, скопившихся в процессе смешения компонентов, и для повышения однородности смесей их подвергают фильтрации (или стрейнированию). Эта операция осуществляется на фильтр-прессах — агрегатах червячного типа с выходной частью в виде фильтрующей решетки с многими отверстиями диаметром 8—12 мм. Операции фильтрации подвергаются смеси, идущие на горячие прессы или АНВ.

Если резина поступает на стрейнер после хранения на складе, то необходимо ее предварительно разогреть на подогревательных вальцах.

В смеси, подвергающиеся фильтрации, вулканизующие агенты добавляются после этой операции во избежание начала вулканизации смесей, сильно нагреваемых в процессе стрейнирования внутри агрегата. Затем резиновые смеси поступают на горячие прессы или АНВ.

На каландрах резиновые листы приобретают строго заданную толщину. Каландры имеют от одного до пяти валков с определенными размерами зазоров между ними. Валки имеют разную температуру для обеспечения перехода листа резины с одного валка на другой. Смеси с натуральным каучуком имеют тенденцию переходить на более горячий валок, с синтетическими — лучше прилипают к более холодным. После каландров ре-

зиновое полотно разрезается на ленты, которые в дальнейшем идут на обмоточные машины или продольно-покрывательные прессы.

В. Наложение резиновой изоляции и оболочек на червячных прессах

При переработке резиновых смесей на червячных прессах материал в прессе подвержен в отличие от, например, полиэтилена действию других факторов. Разогретую резиновую смесь нельзя считать вязкой жидкостью, которая течет в канале червяка. Перемещение ее в цилиндре прессы можно объяснить причинами, которые приводились для пояснения движения полимеров в грузочной зоне прессы (модель «винта и гайки»). Поэтому производительность прессы для переработки резины определяется количеством массы, выдавленной за один оборот червяка. Она зависит от объема витка парезки червяка, его заходности, плотности материала и степени заполнения массой канала червяка.

Устройство агрегата для наложения резиновой изоляции или оболочки методом горячего опрессования в общем сходно с устройством агрегата для наложения пластмасс (см. § 8-4, п. Г). Различие между этими агрегатами заключается в технологических режимах работы отдельных частей агрегата и некоторых конструктивных особенностях (рис. 8-16).

Червячные прессы для опрессования резиной имеют более короткие червяки (длина 4—12 D) по сравнению с прессами для переработки пластмасс. Для прессов часто применяют червяки с двух- и трехзаходной нарезкой. Температура головки в червячных прессах для фазных типов каучука колеблется в пределах 50—90 °С, причем соблюдение выбранного температурного режима в зонах цилиндра и головке весьма важно во избежание частич-

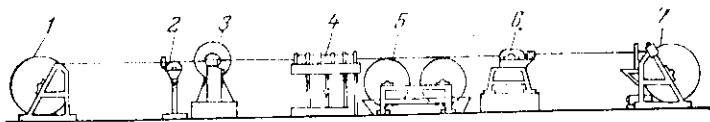


Рис. 8-16. Схема агрегата для наложения резиновой изоляции и оболочек.

1 — отдающее устройство; 2 — счетчик длины; 3 — червячный пресс; 4 — охлаждающая ванна; 5 — тяговое устройство; 6 — талькирующие приспособления; 7 — приемник.

ной подвулканизации резиновой смеси. В загрузочное отверстие прессов резина поступает в виде лент в холодном или подогретом до 45—70 °С состоянии, причем подпрев резины обычно производят на подогревательных вальцах.

Одной из особенностей опрессования резиной является изменение размеров резиновой изоляции или оболочки. Вследствие упругости резиновой смеси наружный диаметр наложенного на прессе слоя резины больше диаметра матрицы. Поэтому при выборе рабочего инструмента учитывают это явление введением соответствующей поправки на его размеры.

Охлаждение резиновой изоляции или оболочки осуществляется холодной водой в охлаждающей ванне, а также на тяговом устройстве, колеса которого погружаются в ванну с проточной водой. Это позволяет уменьшить в процессе проектирования общую длину агрегата.

Между тяговым и приемным устройствами находится талькирующее устройство, проходя через которое провод или кабель покрывается слоем талька во избежание слипания витков.

Приемные устройства позволяют получить кабель, намотанный на барабан или уложенный в специальные тарелки с тальком. Последний способ применяется для кабелей со значительной толщиной изоляции или оболочки, а также в случае применения высокопластичной резины.

Г. Наложение резиновой изоляции на холодных прессах

Кроме изолирования или оплашгования резиной на червячных прессах, применяется наложение изоляции методом «холодного» опрессования и путем обмотки лентами из невулканизованной резины.

При холодном опрессовании резиной применяются продольно-покрывательные прессы. В зависимости от конструкции прессы применяют одношовное и двухшовное опрессование.

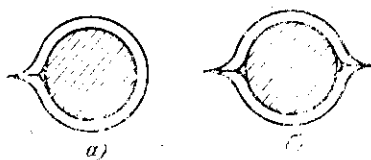


Рис. 8-17. Схема образования одношовной (а) и двухшовной (б) изоляции при холодном опрессовании.

При одношовном опрессовании одна невулканизованная лента проходит через формующий калибр, охватывает токопроводящую жилу и поступает в обжимные валки со специальными канавками, которые формируют изоляцию с одним продольным швом (рис. 8-17,а). При двухшовном изолировании (рис. 8-17,б) в обжимные валки прессы поступают две резиновые ленты с размещенными между ними токопроводящими жилами. При этом на изоляции провода получают два продольных шва. При последнем способе опрессования одновременно можно изолировать до 20 параллельных жил.

Обычно на продольно-покрывательном прессе выполняют изолирование в несколько проходов для получения требуемой толщины изоляции.

Весьма важное значение имеет конструкция кромок канавок и выступов на обжимных валках, от которой зависят прочность образованного продольного шва и равномерность толщины изоляции.

Для уменьшения вероятности попадания воздуха между жилой и первым слоем и между слоями изоляции обычно накладывают изоляцию с некоторым обжатием.

Для изолирования на холодных прессах применяются резиновые смеси, имеющие достаточную жесткость (что необходимо для сматывания резиновых лент с отдающих кружков без деформации) и клейкость (для образования прочного шва).

Для отдельных конструкций кабелей применяют изолирование с помощью обмотки лентами невулканизованной («сырой») резины.

Д. Вулканизация кабелей и проводов с резиновой изоляцией

При повышении температуры до определенного уровня (обычно 140—160 °С) введенные в резиновую смесь вулканизующие агенты вступают в реакцию с молекулами каучука, и происходит образование сшитой структуры полимера. Физико-механические свойства резины сильно зависят от времени процесса вулканизации.

Степень вулканизации обычно оценивают путем измерения прочностных характеристик резин, например предела прочности при разрыве σ_r . В начале вулканизации с увеличением времени процесса t наблюдается увеличение прочности при разрыве (участок кривой до точки А на рис. 8-18). Это объясняется все увеличивающейся

степенью сшивания структуры полимера. Участок AB , при котором разрывная прочность максимальна и уже не изменяется от времени, называется плато вулканизации. После точки B наблюдается уменьшение разрывной прочности, что связано с преобладанием явлений деструкции, вызванных нагревом резины.

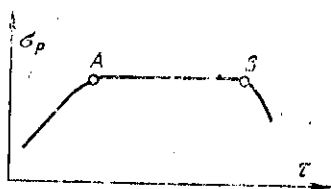


Рис. 8-18. Характерная зависимость прочности при разрыве от времени вулканизации для резины.

Наилучшей технологичностью обладают резины, у которых точка A наступает возможно раньше, а плато вулканизации как можно более широкое.

Первое обстоятельство дает возможность повысить производительность процесса вулканизации, второе — уменьшает вероятность перевулканизации наружных слоев при пропреве внутренних слоев до степени, необходимой для их вулканизации.

Резины с применением в качестве вулканизующего агента тиурама обычно имеют более широкое плато вулканизации, чем сернистые резины.

При повышении температуры физико-механические процессы, проходящие в веществе, обычно протекают быстрее. Установлено, что скорость вулканизации сильно зависит от температуры, причем при увеличении температуры по закону арифметической прогрессии время вулканизации уменьшается примерно по закону геометрической прогрессии.

Таким образом, если для вулканизации резины данной рецептуры при температуре t_1 требуется время τ_1 , то для получения той же степени вулканизации этой резины при температуре t_2 требуется время t_2 , которое можно определить из следующего соотношения:

$$\tau_1/\tau_2 = k^{0,1(t_2 - t_1)}, \quad (8-47)$$

где k — коэффициент скорости вулканизации, для разных резин составляет 1,5—2.

Из (8-47) имеем, что при повышении температуры на 10°C время вулканизации (при $k=2$) уменьшается вдвое.

Процесс вулканизации, как правило, начинается при $115\text{—}130^\circ\text{C}$. Для убыстрения процесса в соответствии

с вышеприведенными соображениями следует его проводить при возможно большей температуре. Однако чрезмерный нагрев может необратимо ухудшить физико-механические показатели резины из-за интенсивных процессов окисления и деструкции каучука.

Поэтому для кабельных резин на основе синтетических бутадиеновых и бутадиен-стирольных каучуков температура вулканизации не должна превышать 210—215 °С, для резин на основе натурального и изопренового каучуков — не выше 205 °С, а для резин на основе полихлоропренового каучука — не выше 185 °С.

Скорость вулканизации часто выражают в относительных или так называемых условных единицах. При этом за исходное берут время вулканизации, равное 30 мин при 143 °С, что соответствует типовому режиму вулканизации в котле.

Обозначим скорость вулканизации через i . Тогда времени вулканизации $\tau_1 = 30$ мин будет соответствовать скорость вулканизации $i = 1$ (условных единиц).

При увеличении температуры и соответственно уменьшении времени вулканизации ($\tau_2 < \tau_1$) скорость ее равна $i = \tau_1 / \tau_2$.

Во время процесса вулканизации резиновая смесь получает тепло от теплоносющей среды, в качестве кото-

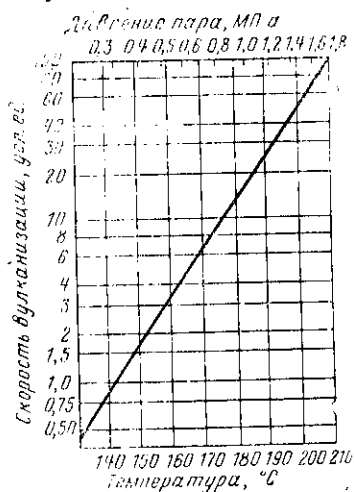


Рис. 8-19. Зависимость между скоростью вулканизации и температурой для резины.

рой могут быть горячий воздух, водяной пар, глицерин, расплавленный металл и пр. Чаще всего такой средой является насыщенный водяной пар. Применение его имеет целый ряд преимуществ перед другими теплоносителями: простота получения, удобство транспортировки, технологическая чистота. Очень важным достоинством насыщенного водяного пара является также большое теплосодержание и однозначная связь между давлением и температурой, что позволяет легко контролировать температурные условия измерением давления.

Повышенное давление пара (0,3—2 МПа) препятствует также образованию вздутий и пористости, которые могут произойти в процессе вулканизации в резиновой изоляции или оболочке.

На рис. 8-19 приведена зависимость между температурой и давлением для насыщенного водяного пара, а также связь их со скоростью вулканизации.

Вулканизация кабельных изделий чаще всего производится в вулканизационных котлах или в агрегатах непрерывной вулканизации. В первом случае провода или кабели намотаны на барабаны или уложены в специальные тарелки с тальком, во втором — изделие проходит через длинную вулканизационную трубу.

В процессе вулканизации наружные слои изоляции нагреваются быстрее, внутренние — медленнее, а так как процесс вулканизации сильно зависит от температуры, то и вулканизованы они будут в разной степени.

Количественно степень вулканизации выражается через эффект вулканизации, равный произведению скорости вулканизации при данной температуре на время вулканизации:

$$E = i\tau, \quad (8-48)$$

где E — эффект вулканизации, выражаемый в условных единицах;

i — скорость вулканизации, усл. ед.;

τ — время вулканизации, мин.

Резины, свулканизованные в одинаковой степени, должны иметь равные эффекты вулканизации. Так, чтобы получить одинаковую степень вулканизации при разных температурах (а следовательно, и разных скоростях), надо так подобрать времена вулканизации, чтобы соблюдалось условие

$$i_1\tau_1 = i_2\tau_2.$$

Пример. При температуре $t_1 = 143^\circ\text{C}$ время вулканизации $\tau_1 = 30$ мин ($i = 1$). При температуре, например, 190°C скорость вулканизации будет в 25 раз выше ($i = 25$). Таким образом, для получения той же степени (эффекта) вулканизации необходимо время вулканизации

$$\tau_2 = i_1\tau_1/i_2 = 1 \cdot 30/25 = 1,2 \text{ мин.}$$

Весьма удобно определять эффекты вулканизации графическим способом. Для этого строят зависимость $i = f(\tau)$. По оси абсцисс откладывают время в минутах, по оси ординат — температуру и соответствующую ей скорость вулканизации. При этом наиболее целесообразно

но масштаб по оси ординат выбрать так, чтобы отрезок $i=1$ соответствовал единице длины (например, 1 см).

Рассчитав и построив кривые изменения температуры для наружной и внутренней поверхностей изоляции или оболочки, определяют площади фигур, ограниченных этими кривыми и осью абсцисс. Полученные площади соответствуют эффектам вулканизации наружных (E_n) и внутренних ($E_{вн}$) слоев.

Их сравнивают с известными для данной резины значениями E_A и E_B , которые соответствуют началу (точка A , рис. 8-18) и концу (точка B) плато вулканизации.

Если значения E_n и $E_{вн}$ больше E_A , но меньше (или равны) E_B , то процесс вулканизации проведен высококачественно и нет недовулканизованных или перевулканизованных слоев резины.

Е. Агрегаты непрерывной вулканизации

Время вулканизации в котлах с учетом прогрева, охлаждения и выгрузки обычно равно 1—2 ч при 140—150 °С. Из-за пластичности невулканизованной резины часто приходится применять дополнительные меры для предотвращения деформации слоя резины во время транспортировки, загрузки и вулканизации. Такими мерами могут быть укладка в специальные тарелки с тальком, наложение защитных покровов (обмотка прорезиненной лентой, наложение временной свинцовой оболочки и пр.). Все это связано с уменьшением производительности процесса изготовления кабеля и лишними затратами.

Использование агрегатов совмещенных процессов наложения и вулканизации резиновой изоляции или оболочки (АНВ) исключает многие промежуточные операции, обеспечивает высокую производительность и рациональное использование производственных площадей.

Применение АНВ основано на использовании свойства резин резко уменьшать время, необходимое для вулканизации, при повышении температуры. Так, при 200 °С время вулканизации составляет 1—2 мин. Схема АНВ приведена на рис. 8-20.

С отдающего устройства жила сначала поступает в головку червячного пресса, где на жилу накладывается слой резины, а затем в вулканизационную камеру. Последняя представляет собой трубу длиной до 50—100 м,

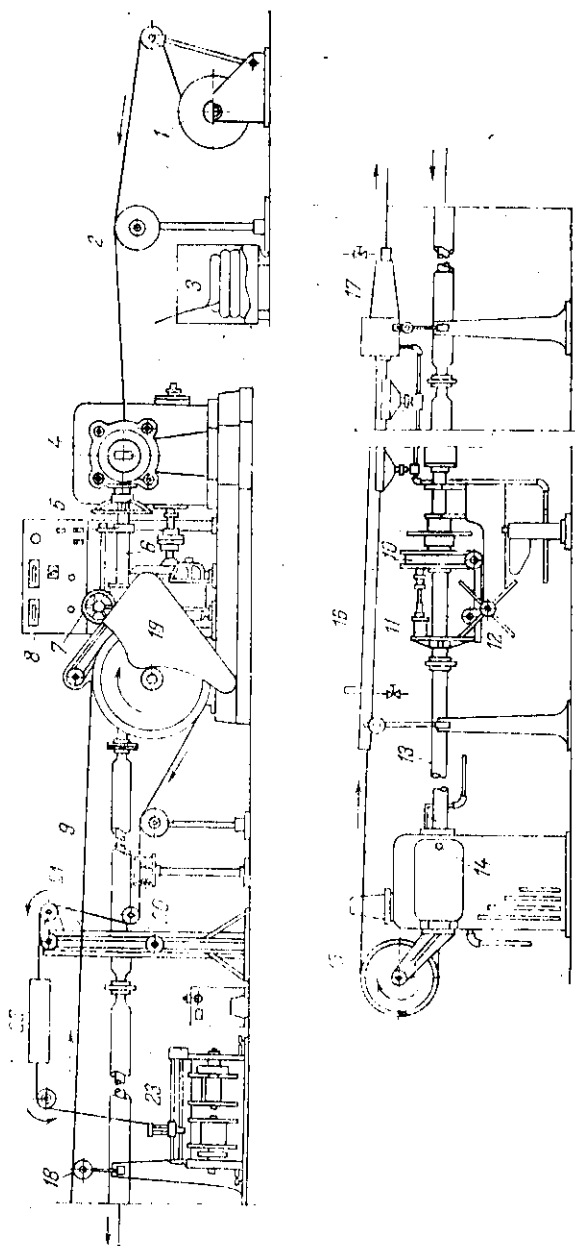


Рис. 8-20. Схема агрегата непрерывной вулканизации.

1 — откатчик с барабаном; 2 — направляющий ролик; 3 — резина для питания агрегата; 4 — червячный пресс; 5 — байонетный затвор для соединения пресса с вулканизационной камерой; 6 — запорная камера; 7 — штуцер для открывания камеры; 8 — шит управления; 9 — вулканизационная камера с рубашкой; 10 — промежуточный (паровой) затвор; 11 — пневматический цилиндр промежуточного затвора; 12 — штуцер для открывания затвора; 13 — охлаждающая камера; 14 — концевой (водяной) затвор; 15 — поворотный ролик; 16 — желоб для охлаждения провода; 17 — обдувающее устройство для удаления воды с поверхности провода; 18 — опорный ролик для провода; 19 — титовое колесо; 20 — счетчик длины; 21 — компенсатор; 22 — аппарат сухого испытания; 23 — двосенный приемник.



Рис. 8-21. Схема провеса кабеля, закрепленного в двух точках.

в которой происходят нагрев и вулканизация резиновой изоляции или оболочки при 200°C (давление около 2 МПа).

Во избежание охлаждения стенок вулканизационной трубы они хорошо теплоизолируются и подогреваются пропусканием пара в специальную рубашку или за счет индукционного нагрева. Скорость прохождения провода через трубу может достигать 100—220 м/мин.

После вулканизационной трубы изолированная жила проходит через охлаждающую камеру с холодной водой под давлением до 0,6—0,8 МПа во избежание образования пористости и вздутий в изоляции.

После охлаждающей камеры изолированная жила подвергается сушке посредством обдува воздухом, затем поступает на тяговое колесо, проходит через аппарат сухого испытания (АСИ) и поступает на приемный барабан.

В АСИ между поверхностью изоляции и жилой прикладывается напряжение, выбираемое таким образом, чтобы пробивалась лишь изоляция, имеющая явные дефекты.

При использовании АНВ встречаются трудности, связанные с изолированием или ошлангованием изделий, имеющих большую массу на единицу длины. Это вызвано тем, что при прохождении изделия в вулканизационной трубе оно имеет «точки опоры» в двух местах: головка червячного пресса и диафрагма в промежуточном затворе, соединяющем вулканизационную и охлаждающую камеры. Ввиду большой длины вулканизационной камеры кабель должен иметь определенное провисание под действием собственной силы тяжести (рис. 8-21). Стрелу провеса h можно подсчитать по формуле [Л. 1]

$$h = gl^2/8P, \quad (8-49)$$

где $P = S\sigma/k_3$ — допустимое растягивающее усилие в точке максимального провеса, МН;

g — масса единицы длины кабеля, кг/м;

l — расстояние между головкой пресса и промежуточным паровым затвором, м;

σ — предел прочности при растяжении материала, из которого сделана токопроводящая жила, МПа;

S — сечение жилы, мм^2 ;

k_3 — коэффициент запаса прочности, принимаемый равным 2—2,5.

Для выпускаемых кабелей стрелы провеса h могут достигать 6 м. Поэтому при прохождении в вулканизационной камере кабель касается ее внутренней поверхности, что приводит к образованию поверхностных дефектов («зализы») еще не вулканизированной резины.

Во избежание этого явления применяются наклонные и вертикальные АНВ (рис. 8-22).

У наклонных АНВ форма вулканизационной камеры имеет вид естественной кривой провисания опрессовываемого изделия. При правильно выбранном натяжении получается поверхность изделия без «зализов».

Однако поддержание заданного натяжения, особенно для кабелей с малым сечением токопроводящей жилы, представляет трудности.

Более удобны в эксплуатации АНВ вертикального типа, но их сооружение связано со значительными затратами.

Весьма эффективными являются АНВ наклонного типа для наложения двухслойной изоляции. Они применяются для изготовления высоковольтных кабелей с резиновой изоляцией. На этих агрегатах накладываются слои полупроводящей и изоляционной резины за один проход при помощи сдвоенных червяч-

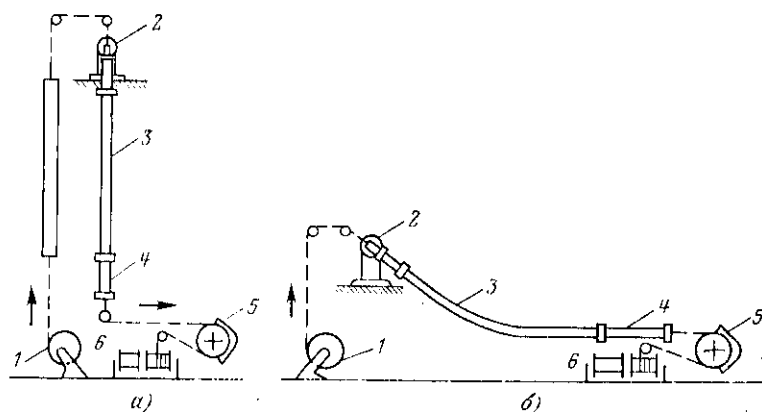


Рис. 8-22. Схемы вертикального (а) и наклонного (б) агрегатов непрерывной вулканизации.

1 — отдающее устройство; 2 — червячный пресс; 3 — вулканизационная труба; 4 — охлаждающая камера; 5 — тяговое устройство; 6 — приемное устройство.

ных прессов, которые имеют два цилиндра и одну общую головку.

Двухслойное опрессование целесообразно применять для изготовления кабелей со значительной радиальной толщиной изоляции. Поэтому такое опрессование применяют в основном на АНВ наклонного и вертикального типов.

8-6. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ И НАГРЕВА В ПРОИЗВОДСТВЕ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПЛАСТМАССОВОЙ И РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

А. Общие положения

В процессе производства кабелей и проводов с пластмассовой и резиновой изоляциями часто изготовленную изоляцию или оболочку подвергают охлаждению или нагреву по определенному режиму.

Например, после наложения на токопроводящую жилу цилиндрического слоя полиэтилена, поливинилхлоридного пластика, полиамидов, фторопласта-4М или фторопласта-40Ш и пр. обычно проводится охлаждение изделия в ваннах с водой или на воздухе. То же самое проводят и при наложении резиновой изоляции на червячных прессах при раздельном опрессовании и вулканизации.

После наложения изоляции из фторопласта-4 или фторопласта-4Д и резиновой смеси на АНВ проводят нагрев изделия для получения монолитной изоляции в первом случае (спекание фторопласта) или вулканизации резины во втором. Затем нагретое изделие подвергается охлаждению на воздухе или в охлаждающей камере.

Основной задачей расчета режимов нагрева или охлаждения является получение временной зависимости распределения температуры по сечению изоляции или оболочки.

В большинстве случаев требуется точное соблюдение максимальной температуры в процессе обработки материала. При нагреве температура, меньшая требуемой, не обеспечит высококачественного протекания процесса (запечка фторопластовой изоляции, вулканизация резины и т. п.).

Превышение температуры может вызвать необратимое ухудшение качества материала из-за тепловой де-

струкции и разложения. В обоих случаях физико-механические показатели изоляции будут неудовлетворительными. К процессу охлаждения обычно предъявляются менее жесткие требования. Многие материалы допускают достаточно резкое охлаждение. Исключением является полиэтилен, требующий постепенного охлаждения (см. § 8-4, п. Г). В процессе нагревания и охлаждения тепло передается к поверхности изоляции или оболочки или от них чаще всего газом (воздухом, паром) или жидкостью (вода). Это связано с тем, что эти процессы осуществляются для движущегося изделия («на проход»), и применение передачи тепла за счет теплопроводности при соприкосновении с нагревателями затруднено.

Таким образом, процессы нагревания или охлаждения изделия чаще всего подчиняются закономерностям конвективного теплообмена. При этом обычно наблюдается вынужденная конвекция, т. е. перемещение слоев охлаждающей (или нагревающей) жидкости (или газа) за счет приложенной извне силы.

Процесс изменения температуры по толщине изоляции или оболочки, т. е. внутри твердого тела, происходит по законам теплопроводности. Так как рассматриваются процессы охлаждения или нагревания, т. е. изменение температуры во времени, то в этом случае действуют закономерности нестационарной теплопроводности.

В результате тепловых расчетов определяется, например, время, за которое охладится (или нагреется) изделие до заданной температуры. По этому времени определяют скорость прохождения изделия через рассчитываемое устройство (производительность процесса) или при заданной скорости — его длину (производственные площади).

Б. Основные положения теории конвективного теплообмена

Процесс передачи тепла от поверхности твердого тела к жидкости (газу) или обратно называют конвекцией, или теплоотдачей. Перенос тепла осуществляется вследствие перемещения частиц жидкости или газа, а эти перемещения происходят по законам гидродинамики. Поэтому общий процесс передачи тепла подчиняется весьма сложным закономерностям, которые обычно находят экспериментальным путем.

Эти закономерности носят название критериальных уравнений. Они состоят из ряда безразмерных комплексов, носящих название критериев подобия.

При тепловых расчетах технологических процессов в кабельной технике наиболее часто используют следующие критерии подобия:

Критерии теплового подобия

Критерий Нуссельта Nu — критерий подобия, характеризующий теплообмен на границе твердое тело — жидкость (газ):

$$Nu = \alpha l / \lambda. \quad (8-50)$$

Критерий Прандтля Pr — критерий подобия, состоящий лишь из теплофизических параметров и характеризующий механизм и способность распространения тепла в среде жидкости (газа):

$$Pr = \nu c \gamma / \lambda. \quad (8-51)$$

Критерии гидродинамического подобия

Критерий Рейнольдса Re — критерий, характеризующий подобие при вынужденном движении жидкости (газа), т. е. при *вынужденной конвекции*, и определяющий характер движения:

$$Re = \nu l / \nu. \quad (8-52)$$

Критерий Грасгофа Gr — критерий, характеризующий подобие при свободном движении жидкости (газа), т. е. при *свободной конвекции*:

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t. \quad (8-53)$$

В (8-50) — (8-53) входят следующие параметры:

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

λ — коэффициент теплопроводности жидкости (газа), Вт/(м·°С);

c — теплоемкость жидкости (газа), Дж/(кг·°С);

ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости (газа), м²/с;

γ — плотность жидкости (газа), кг/м³;

β — коэффициент объемного расширения жидкости (газа), 1/°С;

ν — скорость движения жидкости (газа), м/с;

Δt — разность температур между теплоотдающей поверхностью и жидкостью (газом), °С;

l — геометрический (определяющий) размер тела, м.

Весьма важно при подсчете значений критериев правильно выбрать определяющий размер и температуру.

Наиболее часто в качестве определяющей температуры принимается средняя температура жидкости (газа). При этой температуре по таблицам определяются значения теплофизических параметров жидкости или газа λ , c , γ , β .

В качестве определяющего размера для тел или каналов цилиндрической формы принимают обычно их диаметр.

Основной целью тепловых расчетов конвективного теплообмена является определение коэффициента теплоотдачи α . Если этот параметр известен, то можно определить количество тепла Q , Дж/м, отданного при охлаждении (или полученного — при нагревании) цилиндрической поверхностью твердого тела окружающей среде (на единицу длины):

$$Q = \alpha \pi D (t_1 - t_2) \frac{l}{v}, \quad (8-54)$$

где D — диаметр тела (по изоляции или оболочке), м;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

t_1 — температура поверхности тела, °С;

t_2 — температура среды, °С;

l — длина охлаждающего устройства, м;

v — скорость движения охлаждаемого тела, м/с.

Зная количество запасенного тепла, можно определить длину охлаждающей (или нагревательной) камеры или скорость движения.

Коэффициент теплоотдачи α определяется из критериальных уравнений, которые представляются в виде зависимости определяемого критерия Nu от других критериев, определяющих данный процесс. Общий вид критериальных уравнений следующий:

$$Nu = f(Re; Pr; Gr \dots). \quad (8-55)$$

Конкретный вид этого уравнения [Л. 20] определяется на основе эксперимента и зависит от вида конвективного теплообмена (свободная или вынужденная конвекция), характера движения жидкости или газа (ламинарный, турбулентный или смешанный) и направления движения (вдоль, поперек тела).

При вынужденной конвекции характер движения и вид критериального уравнения определяет критерий Рейнольдса Re .

Параметры критериального уравнения

Режим	$(Gr \cdot Pr)_m$	c	n
Переходный	$1 \cdot 10^{-2} \text{—} 5 \cdot 10^2$	1,18	$1/8$
Ламинарный	$5 \cdot 10^2 \text{—} 2 \cdot 10^7$	0,54	$1/4$
Турбулентный	$2 \cdot 10^7 \text{—} 10 \cdot 10^{12}$	0,135	$1/3$

При значении $Re_f < 2300$ режим движения жидкости или газа будет ламинарный, при $Re_f = (2,3 \div 10) \cdot 10^3$ режим движения переходный, при $Re_f = 1 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^6$ режим турбулентный.

Индекс f означает, что значения теплофизических величин, входящих в критерий, берутся при средней температуре среды.

При свободной конвекции характер движения определяется произведением $(Gr \cdot Pr)_m$, где индекс m означает, что значения параметров соответствуют средней температуре пограничного слоя

$$t_m = 0,5(t_1 + t_2),$$

где t_1 — температура теплоотдающей поверхности;

t_2 — температура среды на достаточном удалении от поверхности.

Критериальное уравнение для свободной конвекции в неограниченном пространстве имеет вид:

$$Nu_m = c (Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (8-56)$$

где значения параметров c и n определяются из табл. 8-4 в зависимости от режима движения.

Тепловой расчет при конвективном теплообмене ведут в следующей последовательности: 1) из технологических соображений выбирают определяющую температуру, размер и определяют значения теплофизических параметров, входящих в критерии подобия; 2) определяют характер движения, а следовательно, и вид критериального уравнения (8-55) или (8-56); 3) определяют правую часть уравнения (8-55), т. е. критерий Nu ; 4) по значению критерия Nu из (8-50) определяют коэффициент теплоотдачи α ; 5) зная α и Q , определяют технологические показатели процесса — длину охлаждающего (или нагревательного) устройства или линейную скорость движения изделия.

В. Основные принципы тепловых расчетов при режиме нестационарной теплопроводности

В режиме нестационарной теплопроводности наблюдается изменение во времени температурного поля в твердом теле, т. е. в любой точке температура t является функцией времени τ .

Это происходит в том случае, когда изменяется теплосодержание тела, что происходит во время его прогрева или охлаждения.

Скорость изменения теплосодержания прямо пропорциональна способности тела проводить тепло, т. е. теплопроводности λ , и обратно пропорциональна его способности аккумулировать тепло, т. е. его объемной теплоемкости $c\gamma$ (c — коэффициент теплоемкости, γ — плотность).

В целом скорость теплового процесса при нестационарной теплопроводности определяется значением коэффициента температуропроводности:

$$a = \lambda / c\gamma. \quad (8-57)$$

Для режима нестационарной теплопроводности температура t и время τ связаны между собой дифференциальным уравнением Фурье

$$\partial t / \partial \tau = a \nabla^2 t, \quad (8-58)$$

где ∇^2 — оператор Лапласа.

Для решения этого уравнения необходимо задание следующих краевых условий: а) начальное распределение температуры в теле; б) условия на границе раздела твердое тело — окружающая среда. Эти условия в свою очередь могут быть заданы тремя способами: 1) задана температура поверхности тела t_1 ; 2) задано количество тепла, проходящего через наружную поверхность тела (при неизвестной t_1); 3) заданы коэффициент теплоотдачи α и средняя температура окружающей среды t_2 (граничное условие 3-го рода).

В практических задачах чаще встречается реализация последнего условия, причем коэффициент α определяется по критериальным уравнениям (§ 8-6, п. Б).

Если рассмотреть условие на границе раздела твердое тело — окружающая среда (жидкость, газ), то для любого момента времени количество тепла dQ_1 , поступающее к границе изнутри (например, при охлаждении

тела), равно количеству тепла, отдаваемого от границы окружающей среде dQ_2 .

Значение dQ_1 определяется в соответствии с законом теплопроводности Фурье следующим образом:

$$dQ_1 = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dS. \quad (8-59)$$

Значение dQ_2 определяется в соответствии с законом Ньютона:

$$dQ_2 = \alpha (t_1 - t_2) dS. \quad (8-60)$$

В (8-59) и (8-60) $\partial t / \partial n$ — изменение температуры тела в направлении нормали к границе раздела; dS — элемент поверхности тела.

Так как $dQ_1 = dQ_2$, то из (8-59) и (8-60) получаем:

$$-\frac{\partial t}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (t_1 - t_2). \quad (8-61)$$

Выражение (8-61) является математической записью граничного условия 3-го рода.

Совместное решение (8-58) и (8-61) обычно выражается при помощи рядов Фурье.

При расчетах нагрева или охлаждения протяженных цилиндрических тел (кабели, провода) обычно рассматривают одномерные задачи, когда температура изменяется только по одной переменной координате — радиусу r .

Для этого случая (8-58) примет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right). \quad (8-62)$$

Искомые функции, представляющие совместное решение (8-62) и (8-61) и дающие зависимость температуры от τ и r , зависят от многих величин.

Однако все эти величины обычно группируют в три безразмерных комплекса — критерии подобия, получающиеся при решении (8-61) и (8-62):

$$\text{Критерий Био: } Bi = \alpha l / \lambda. \quad (8-63)$$

$$\text{Критерий Фурье: } Fo = \alpha \tau / l^2. \quad (8-64)$$

$$\text{Геометрический критерий: } L = r / l. \quad (8-65)$$

Здесь l — определяющий размер.

Критерий Bi характеризует теплообмен на границе, критерий Fo имеет смысл безразмерного времени протекания процесса охлаждения (или нагрева).

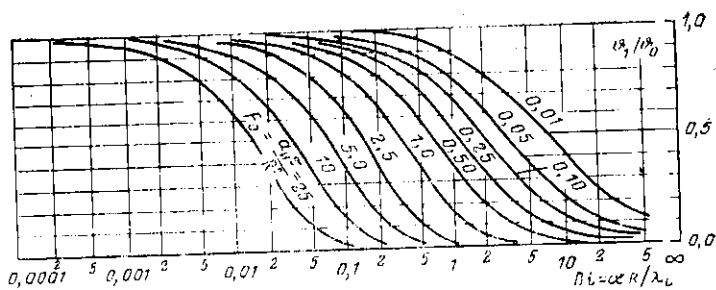


Рис. 8-23. Зависимость $\vartheta_1/\vartheta_0 = f(Bi, Fo)$ для бесконечно длинного цилиндра.

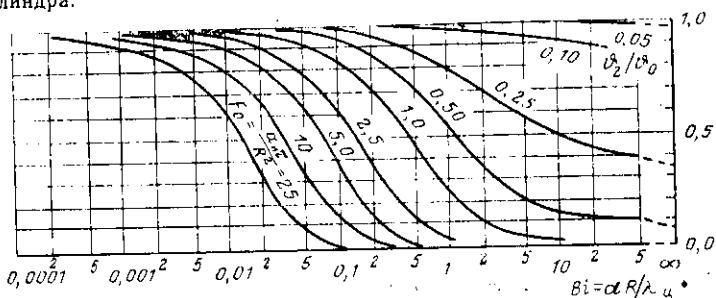


Рис. 8-24. Зависимость $\vartheta_1/\vartheta_0 = f(Bi, Fo)$ для бесконечно длинного цилиндра.

Искомая функция, обычно представляемая в виде безразмерной (относительной) температуры, имеет общий вид:

$$\vartheta/\vartheta_0 = (t_2 - t_1)/(t_2 - t_0) = f(Bi, Fo, L), \quad (8-66)$$

где t_1 — температура в искомой точке тела в любой момент времени τ ;

t_0 — температура в данной точке в начальный момент времени;

t_2 — температура окружающей среды.

Функция (8-66) обычно представляется в виде графических зависимостей.

Для однородного бесконечно длинного цилиндра радиусом R эти зависимости представлены на рис. 8-23 и 8-24, причем рис. 8-23 используется для определения температуры на поверхности цилиндра, а рис. 8-24 для определения температуры на его оси.

Эти температуры являются функцией только двух критериев: $Bi = \alpha R / \lambda_{\text{ш}}$ и $Fo = \alpha \tau / R^2$.

Г. Применение основных закономерностей теории теплообмена к расчету некоторых технологических процессов

При производстве кабелей и проводов с пластмассовой и резиновой изоляцией обычно по технологическим соображениям необходимо охлаждать или нагревать полученное изделие. Охлаждение изоляции или оболочки проводится после их наложения на червячных прессах или АНВ (после вулканизации), нагрев изоляции проводят для термообработки (сушка, спекание) при использовании фторопласта-4 или для вулканизации при изолировании резиной.

Рассмотрим общие принципы расчета процесса охлаждения или нагрева изоляции или оболочки.

а) *Расчет режима охлаждения кабельных изделий с тонкослойной изоляцией.* Если изоляция тонкослойная и жила имеет небольшой диаметр, то можно пренебречь перепадом температуры по толщине изоляции и приближенно считать, что все запасенное изделием тепло полностью отдается с поверхности охлаждающей среде.

Пусть, например, изолированная жила с тонкой изоляцией поступает из червячного пресса в охлаждающую ванну с водой, температура которой равна $t_{\text{в}}$.

Запасенное проводом тепло Q_1 можно определить по уравнению

$$Q_1 = cm(t_{\text{г}} - t_{\text{охл}}),$$

где c — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);
 m — масса материала, кг;

$t_{\text{г}}$ — температура провода при входе в ванну (температура головки пресса), °С;

$t_{\text{охл}}$ — температура, до которой следует охладить провод, °С.

Отданное с поверхности провода тепло Q_2 равно:

$$Q_2 = \alpha \pi D l (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}),$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

D — диаметр по изоляции, м;

l — длина провода (длина ванны), м.

Массу изоляции, проходящей в единицу времени через охлаждающую ванну, можно выразить следующим образом:

$$m = S v \gamma, \quad (8-67)$$

где S — площадь поперечного сечения изоляции, м^2 ;
 v — скорость прохождения провода через ванну, м/с ;
 γ — плотность материала изоляции, кг/м^3 .
 Приравняв Q_1 и Q_2 , с учетом (8-67) получим:

$$cSv\gamma(t_r - t_{\text{охл}}) = \alpha\pi D l (t_r - t_v). \quad (8-68)$$

Определив с помощью критериальных уравнений (§ 8-6, п. Б) коэффициент теплоотдачи α для данного режима охлаждения и зная технологические параметры процесса t_r , $t_{\text{охл}}$, t_v , размеры D , S и параметры материала изоляции c , γ , можно из (8-68) определить длину охлаждающей ванны l (при заданной скорости v) или скорость v , необходимую для охлаждения изоляции до температуры $t_{\text{охл}}$ при заданной длине ванны l .

Погрешность метода заключается в том, что не учитывается температурное поле в толще изоляции, а также влияние жилы на процесс охлаждения.

б) *Расчет режима охлаждения кабельных изделий с учетом изменения температуры по толщине изоляции.* Расчет в этом случае проводится на основе соотношений теории нестационарной теплопроводности с использованием графических решений (рис. 8-23 и 8-24).

Пусть требуется рассчитать длину охлаждающего устройства l , необходимую для охлаждения поверхности изоляции провода с радиусом по изоляции R (радиальная толщина изоляции Δ) до температуры t_1 . Начальная температура изоляции t_0 , температура охлаждающей среды t_v , скорость прохождения провода через охлаждающее устройство v .

Порядок расчета может быть следующий:

1. Определяются теплофизические параметры, характеризующие материал изоляции $\lambda_{\text{из}}$, $c_{\text{из}}$, $\gamma_{\text{из}}$, $\alpha_{\text{из}}$ и охлаждающую среду λ , v , c , γ , β .

Параметры среды определяются при ее средней температуре t_v . Параметры изоляции изменяются, так как температура в процессе охлаждения изменяется от t_0 до t_1 . В первом приближении можно определять значения этих теплофизических параметров при $t_{\text{ср}} = 0,5 (t_0 + t_1)$.

На рис. 8-25 приведены зависимости некоторых теплофизических параметров полиэтилена и пластифицированного поливинилхлорида от температуры [Л. 32].

2. С помощью критериальных уравнений конвективного теплообмена определяется коэффициент теплоотдачи α .

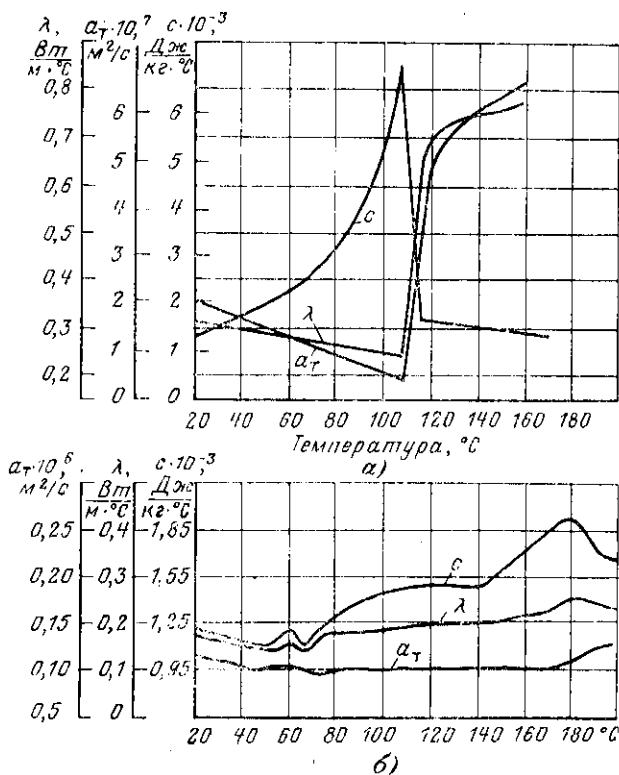


Рис. 8-25. Теплофизические характеристики термопластичных полимеров.

a — полиэтилен низкой плотности (плотность 0,916 г/см³, индекс расплава 1,48 г/10 мин при грузе 2,16 кг); b — поливинилхлорид пластифицированный (плотность 1,29 г/см³, 30% дибутилфталата); $\alpha\tau$ — коэффициент температуропроводности; c — теплоемкость; λ — теплопроводность.

3. Определяется критерий Bi :

$$Bi = \alpha R / \lambda_{из.}$$

4. Определяется (задается) безразмерная температура θ_1/θ_0 на поверхности изделия в конце охлаждающего устройства:

$$\theta_1/\theta_0 = (t_b - t_1) / (t_b - t_0). \quad (8-69)$$

5. По вычисленным Bi и θ_1/θ_0 из графического решения (8-66) для цилиндра (рис. 8-23) определяется критерий Фурье $Fo = a_{из} \tau / R^2$.

6. Зная F_0 , коэффициент температуропроводности изоляции $a_{из}$ и R , определяют время процесса охлаждения

$$\tau = F_0 R^2 / a_{из}.$$

7. Определяется длина охлаждающего устройства L при известных скорости прохождения провода v и времени τ :

$$L = v\tau.$$

В ряде случаев необходимо расчет вести по температуре внутренней поверхности изоляции или определить эту температуру при заданных длине охлаждающего устройства и режиме охлаждения.

В этом случае расчет ведется аналогично, но используются графические зависимости (рис. 8-24), связывающие критерии Bi и F_0 с безразмерной температурой на оси цилиндра:

$$\theta_2/\theta_0 = (t_B - t_2)/(t_B - t_0), \quad (8-70)$$

где t_2 — температура на оси бесконечного цилиндра в конце процесса охлаждения.

Указанный метод расчета является приближенным, так как он основан на предположении, что охлаждаемое изделие представляет собой однородный цилиндр. Наличие токопроводящей жилы изменяет характер процесса из-за отвода в нее части тепла.

Получение точного решения с учетом этого теплоотвода является весьма сложной задачей.

в) *Расчет режимов термообработки кабелей и проводов с фторопластовой изоляцией.* При расчете режимов термообработки (сушка, запечка) изоляции из фторопласта-4 и фторопласта-4Д следует задаться температурой в печи t_B , температурой, до которой следует нагреть изоляцию, t_2 и скоростью движения воздуха в печи, учитывающей наличие вентиляции.

Определяются длины L зон сушки и запечки при заданной скорости движения провода v или при заданных размерах печей определяют скорость провода.

При расчете зоны сушки в случае изолирования фторопластом-4Д $t_2 = 200 \div 250^\circ\text{C}$, при расчете зоны запечки изоляция рассчитывается на нагрев до $t_2 = 380 \div 400^\circ\text{C}$.

Фторопластовая изоляция часто используется в миниатюрных кабелях и проводах. В этом случае расчет можно вести аналогично описанному выше случаю охлаждения проводов с тонкослойной изоляцией.

Отличие заключается в том, что рассматривается процесс не охлаждения, а нагрева, и средой обычно является воздух.

При заметной толщине изоляции порядок расчета аналогичен описанному в предыдущем пункте. При этом определяется также время t , за которое внутренние слои изоляции достигнут температуры t_2 .

г) *Расчет режима вулканизации резиновых изоляций или оболочек.* При расчете режима вулканизации недостаточно определить время, за которое температура, например внутренней поверхности оболочки, достигнет определенного значения. Для правильного проведения процесса нужно знать эффекты вулканизации внутренних и наружных слоев (§ 8-5), что возможно при известной зависимости температуры в разных (по толщине изоляции) точках от времени, т. е. известной зависимости (8-66). Зная кривые изменения температуры в процессе нагрева при вулканизации и охлаждении, можно графоаналитическим методом определить нужную степень вулканизации и выбрать параметры режима.

Поэтому при расчетах режимов вулканизации (например, нахождении длины вулканизационной трубы) проводят решение уравнения (8-62) и получают результат в виде ряда, содержащего цилиндрические (бесселевы) функции.

Расчет ведется для наружных и внутренних слоев изоляции или оболочки. Рассчитанные в результате эффекты вулканизации оцениваются с учетом известного для данной резины плато вулканизации.

Подробно метод расчета вулканизации кабельных изделий с резиновой изоляцией изложен в [Л. 35].

Глава девятая

ТЕОРИЯ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

9-1. РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОЙ СВЯЗИ ПО КАБЕЛЬНЫМ ЛИНИЯМ

Электрическая связь страны на современном этапе развития базируется в первую очередь на разветвленной сети кабельных линий.

К основным достоинствам кабельных линий относятся хорошая защищенность каналов связи от атмосферных влияний и различных помех, высокая эксплуатационная устойчивость и долговечность, возможность исполь-

Таблица 9-1

Системы передачи по коаксиальным кабелям

Система	Спектр частот, МГц	Длина усилительного участка, км
<i>Кабель 2,6/9,4</i>		
К-1920	8,5	6
К-2700	12	4,5
К-3600	17	3
К-10800	60	1,5
<i>Кабель 1,2/4,6</i>		
К-300	1,3	6
К-1320	5,7	3

зования в широком диапазоне частот. Эти качества наиболее полно проявляются в технике проводной связи, что характеризуется уплотнением кабельных цепей многоканальными системами высокочастотной связи и телевидения.

Современная дальняя связь по кабельным линиям развивается по следующим направлениям: а) расширение передаваемого спектра частот и увеличение числа каналов (1000 и больше каналов по одному направлению); б) увеличение дальности связи (до 25 000 км) с выходом на международную сеть связи; в) создание автоматизированных кабельных магистралей с дистанционным электропитанием НУП (число НУП — необслуживаемых усилительных пунктов — составит 90—95%); г) передача различных видов информации (телефонирование, телеграфирование, фототелеграф, передача газетных текстов, видеотелефон, передача данных, телевидение, сигналы автоматизированных систем управления и телемеханики и пр.) едиными методами; д) максимальная автоматизация междугородной связи; е) развитие частотных и временных систем передачи с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ).

Наибольшее применение получили высокочастотные кабели коаксиальной и симметричной конструкций. Применяются главным образом два типа коаксиальных кабелей с парами 2,6/9,4 мм и малогабаритные с парами 1,2/4,6 мм. Ведутся разработки микрокоаксиальных ка-

белей (0,7/3,0 мм) и коаксиальных кабелей большого типа (7/27 и 11/40 мм).

В табл. 9-1 приведены основные данные систем передачи сигналов связи по коаксиальным кабелям среднего и малогабаритного типов.

Цифра, указанная в графе «система», означает число телефонных каналов, обеспечиваемых кабелем. Длина усилительных участков соответствует расстоянию между необслуживаемыми усилительными пунктами (НУП). В эти НУП подается дистанционно электропитание из обслуживаемых усилительных пунктов (ОУП). Расстояние между ОУП принято равным 120—240 км. Дальность действия связи по коаксиальным магистралям составляет около 12 500 км.

Наиболее широкое применение получили по кабелям среднего типа (2,6/9,4 мм) системы передачи К-1920 и К-3600. В будущем будут введены более мощные системы на 10 800 каналов. Для малогабаритных кабелей (1,2/4,6 мм) приняты системы К-300 и К-1320.

В качестве симметричных кабелей наиболее широкое применение для междугородной связи получили четырехчетверочные (4×4) и семичетверочные (7×4) конструкции кабелей с диаметром жилы 1,2 мм и стирофлексной, а также полиэтиленовой изоляцией. Для областной и сельской связи широко применяются одночетверочные кабели (1×4).

Основной системой передачи по симметричным кабелям является система К-60, работающая в диапазоне 252 кГц. Известны также и другие системы, основные данные которых приведены в табл. 9-2.

На симметричных кабелях принято дистанционное электропитание из ОУП, располагаемых через 150—250 км. Предельная дальность связи равна 12 500 км.

Таблица 9-2

Системы передачи по симметричным кабелям

Система	Спектр частот, кГц	Длина усилительного участка, км	Система	Спектр частот, кГц	Длина усилительного участка, км
К-12	60	50	К-120	552	15
К-24	108	40	К-180	800	10
К-60	252	20			

На зональных (внутриобластных) сетях связи находят широкое применение однокоаксиальные кабели с уплотнением 120 каналами (система К-120) и одночетверочные кабельные линии, оснащенные высокочастотной аппаратурой типа К-60 и пр.

Для сетей сельской связи предназначаются упрощенные конструкции одночетверочных кабелей с полиэтиленовой изоляцией (1×4) и малокабельная аппаратура уплотнения на 3, 6 и 12 телефонных каналов.

Для прокладки в морях и океанах применяются подводные коаксиальные кабели и системы передачи на 60 и 128 каналов по двухполосной схеме в диапазоне частот 552 и 1100 кГц. Известны также системы передачи по подводным кабелям на 360 и 720 каналов.

При всех системах передачи используется в качестве основного четырехкилогерцовый телефонный канал (от 0,3 до 3,4 кГц). Все другие виды передачи осуществляются путем вторичного уплотнения телефонных каналов.

Ниже приведены спектры частот и количество эквивалентных телефонных каналов 4 кГц для различных видов информации:

Радиовещание	8—12 кГц (2—3 канала)
Телевидение	6000 кГц (1500 каналов)
Видеотелефон	1200 кГц (300 каналов)
Передача газет	240 кГц (60 каналов)
Фототелеграф	4 кГц (1 канал)
Передача данных	4—60 кГц (1—12 каналов)

Для телеграфной связи по любому телефонному каналу можно организовать до 24 телеграфных каналов.

9.2. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПО КАБЕЛЯМ СВЯЗИ

А. Распространение электромагнитной энергии по кабелям

Совокупность электрического и магнитного полей, распространяющихся вдоль линии с определенной скоростью, называется электромагнитной волной.

Общая картина распределения электромагнитного поля двухпроводной цепи показана на рис. 9-1.

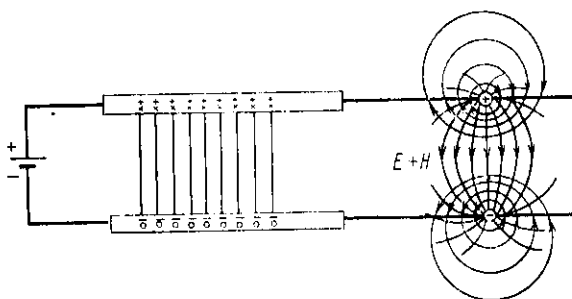


Рис. 9-1. Электромагнитное поле кабельной цепи.

На всем пути, проходимом электромагнитной волной, энергия электрического $W_э$ и магнитного W_m полей определяется выражениями:

$$W_э = CU^2/2; W_m = LI^2/2.$$

Энергия магнитного поля может переходить в энергию электрического поля, и наоборот.

Электромагнитная энергия при передаче по цепи сосредоточивается в основном в окружающей провода среде — диэлектрике. Поэтому при передаче сигналов связи по проводникам носителем высокочастотной электромагнитной энергии являются не проводники, а окружающая их среда. Проводники лишь задают направление движения энергии. Благодаря проводникам электромагнитная энергия не рассеивается во все стороны, а движется вдоль линии.

Электромагнитную волну можно представить в виде двух компонентов: волны напряжения (соответствующей электрическому полю) и волны тока (соответствующей магнитному полю). Между волной напряжения и волной тока в любой точке цепи существует определенное соотношение, зависящее от свойств цепи и имеющее размерность сопротивления (Ом). Это соотношение принято называть волновым сопротивлением:

$$Z_в = E/H = U/I, \text{ Ом.}$$

Таким образом, электромагнитная волна, распространяясь вдоль цепи, встречает во всех точках волновое сопротивление.

Скорость распространения электромагнитных волн по проводам определяется частотой тока и параметрами цепи.

Б. Эквивалент кабельной цепи

Качество передачи по кабельным линиям связи и их электрические свойства полностью характеризуются первичными параметрами кабеля: активным сопротивлением R , индуктивностью L , емкостью C и проводимостью изоляции G . Эти параметры не зависят от напряжения и передаваемого тока, а определяются лишь конструкцией кабеля, используемыми материалами и частотой тока.

По физической природе параметры кабеля аналогичны параметрам колебательных контуров, составленных из элементов R , L и C . Разница состоит лишь в том, что в контурах эти параметры (R , L и C) являются сосредоточенными, а в кабелях они равномерно распределены по всей длине цепи.

На рис. 9-2 представлена эквивалентная схема участка кабельной цепи. Параметры схемы R и L , включенные последовательно (продольные), образуют суммарное сопротивление $Z = R + j\omega L$, а параметры G и C (поперечные) — суммарную проводимость $Y = G + j\omega C$.

При прохождении сигналов связи по кабельной линии имеет место уменьшение напряжения и тока, так что мощность сигнала, пришедшего в конец линии, существенно меньше начальной.

Из указанных четырех параметров кабеля лишь R и G обуславливают потери энергии: первый — тепловые потери в токопроводящих жилах и других металлических частях кабеля (экран, свинцовая оболочка, броня), второй — потери в изоляции.

В. Основное уравнение однородной кабельной цепи

Рассмотрим однородную кабельную цепь с первичными параметрами R , L , C и G (рис. 9-3). В начале цепи

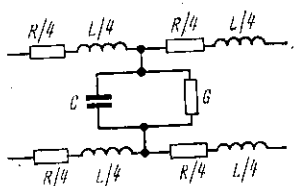


Рис. 9-2. Эквивалент кабельной цепи.

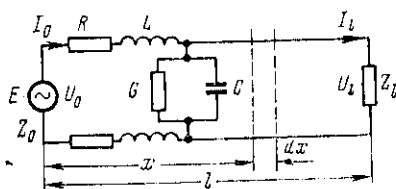


Рис. 9-3. К расчету однородной кабельной цепи.

имеется генератор с сопротивлением Z_0 , в конце — нагрузка Z_l . Обозначим напряжение и ток в начале цепи через $\dot{U}_0$ и $\dot{I}_0$, в конце — через $\dot{U}_l$ и $\dot{I}_l$.

Выделим на расстоянии x от начала цепи бесконечно малый участок dx . Обозначим ток, проходящий по элементу цепи dx , через $\dot{I}$ и напряжение между проводами через $\dot{U}$. Тогда падение напряжения на участке dx будет равно:

$$-d\dot{U}/dx = \dot{I}(R + j\omega L). \quad (9-1)$$

Утечка тока на участке

$$-d\dot{I}/dx = \dot{U}(G + j\omega C). \quad (9-2)$$

Для решения этих уравнений относительно $\dot{U}$ и $\dot{I}$ исключим сначала $\dot{I}$ из первого уравнения; взяв вторую производную, получим:

$$- \frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = \frac{d\dot{I}}{dx} (R + j\omega L).$$

Подставим в это выражение (9-2), тогда получим:

$$d^2 \dot{U}/dx^2 = \dot{U}(R + j\omega L)(G + j\omega C). \quad (9-3)$$

Обозначив

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)},$$

получим:

$$d^2 \dot{U}/dx^2 = \gamma^2 \dot{U}. \quad (9-4)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\dot{U} = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}.$$

Дифференцируя это уравнение, получим выражение для тока:

$$d\dot{U}/dx = A\gamma e^{\gamma x} - B\gamma e^{-\gamma x} = \gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}).$$

Подставив это выражение в (9-1), получим:

$$- \dot{I}(R + j\omega L) = \gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x})$$

или, обозначив

$$Z_b = (R + j\omega L)/\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}, \quad (9-5)$$

получим:

$$IZ_{\text{в}} = -Ae^{\gamma x} + B^{-\gamma x}.$$

Таким образом, имеем два уравнения с двумя неизвестными A и B :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}; \\ IZ_{\text{в}} &= -Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}. \end{aligned} \right\} \quad (9-6)$$

Для нахождения A и B воспользуемся значениями тока и напряжения в начале цепи (при $x=0$) I_0 и $\dot{U}_0$. Тогда (9-6) примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= A + B; \\ I_0 Z_{\text{в}} &= -A + B. \end{aligned}$$

Отсюда

$$A = \frac{\dot{U}_0 - I_0 Z_{\text{в}}}{2}; \quad B = \frac{\dot{U}_0 + I_0 Z_{\text{в}}}{2}. \quad (9-7)$$

Подставляя значения A и B в (9-6), получаем:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{\dot{U}_0 - I_0 Z_{\text{в}}}{2} e^{\gamma x} + \frac{\dot{U}_0 + I_0 Z_{\text{в}}}{2} e^{-\gamma x}; \\ I &= -\frac{\dot{U}_0 - I_0 Z_{\text{в}}}{2} e^{\gamma x} + \frac{\dot{U}_0 + I_0 Z_{\text{в}}}{2} e^{-\gamma x}. \end{aligned}$$

Произведя соответствующие преобразования и имея в виду, что

$$\operatorname{ch} \gamma x = (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2; \quad \operatorname{sh} \gamma x = (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2,$$

получим значения напряжения $\dot{U}_x$ и тока I_x в любой точке цепи x :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_0 \operatorname{ch} \gamma x - I_0 Z_{\text{в}} \operatorname{sh} \gamma x; \\ I_x &= I_0 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\dot{U}_0}{Z_{\text{в}}} \operatorname{sh} \gamma x. \end{aligned} \right\} \quad (9-8)$$

В конце цепи при $x=l$ получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_l &= \dot{U}_0 \operatorname{ch} \gamma l - I_0 Z_{\text{в}} \operatorname{sh} \gamma l; \\ I_l &= I_0 \operatorname{ch} \gamma l - \frac{\dot{U}_0}{Z_{\text{в}}} \operatorname{sh} \gamma l. \end{aligned} \right\} \quad (9-9)$$

Практически оказывается более удобным пользоваться выражениями, устанавливающими зависимость на-

пряжения и тока в начале цепи от напряжения и тока в конце цепи. Тогда, решая уравнения (9-9) относительно $\dot{U}_0$ и $\dot{I}_0$, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_0 &= \dot{U}_l \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_l Z_n \operatorname{sh} \gamma l; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_l \operatorname{ch} \gamma l + \frac{\dot{U}_l}{Z_n} \operatorname{sh} \gamma l. \end{aligned} \right\} \quad (9-10)$$

Уравнения (9-8) — (9-10) устанавливают взаимную связь токов и напряжений с параметрами цепи R , L , C и G или γ и Z_n и позволяют определить напряжение и ток в любой точке цепи в зависимости от значений $\dot{U}$ и $\dot{I}$ в начале или конце ее. Эти уравнения справедливы при любых нагрузках (Z_0 и Z_l) на концах цепи.

При согласованных нагрузках $Z_0 = Z_l = Z_n$ и $\dot{U}_0/\dot{I}_0 = \dot{U}_l/\dot{I}_l = Z_n$ уравнения (9-8) — (9-10) упрощаются и принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_0 e^{-\gamma x}; & \dot{U}_0 &= \dot{U}_l e^{\gamma l}; & \dot{U}_l &= \dot{U}_0 e^{-\gamma l}; \\ \dot{I}_x &= \dot{I}_0 e^{-\gamma x}; & \dot{I}_0 &= \dot{I}_l e^{\gamma l}; & \dot{I}_l &= \dot{I}_0 e^{-\gamma l}. \end{aligned} \right\} \quad (9-11)$$

Практически наиболее часто пользуются уравнениями в виде

$$\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_l} = e^{\gamma l} \quad \text{и} \quad \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_l} = e^{\gamma l}. \quad (9-12)$$

Аналогично для мощности $\tilde{P} = \dot{U}\dot{I}$ получим:

$$\tilde{P}_0/\tilde{P}_l = e^{2\gamma l}. \quad (9-13)$$

Таким образом, получены уравнения однородной кабельной цепи в общем виде при любых нагрузках по концам (9-8) — (9-10) и при согласованных нагрузках (9-11) — (9-13).

Из приведенных формул следует, что распространение энергии по линии, ток и напряжение в любой точке цепи обусловлены двумя параметрами: γ и Z_n .

Г. Волновое сопротивление

Волновое (характеристическое) сопротивление Z_n и коэффициент распространения γ являются вторичными параметрами линии и широко используются для оценки эксплуатационно-технических качеств линий связи.

Волновое сопротивление — это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной линии без отражения, т. е. при условии, что на процесс передачи не влияют несогласованности на концах линии. Оно свойственно данному типу кабеля и зависит лишь от его первичных параметров и частоты передаваемого тока.

Количественное соотношение, имеющее место между волной напряжения и волной тока в линии, и есть волновое сопротивление цепи. При этом, как следует из данного выше определения волнового сопротивления, необходимо рассматривать лишь падающую (движущуюся вперед) электромагнитную волну:

$$Z_{\text{в}} = \dot{U}_{\text{п}} / I_{\text{п}}.$$

Если в линии выделить отдельно отраженную волну, то она, двигаясь к началу линии, также будет встречать сопротивление, равное волновому:

$$Z_{\text{в}} = \dot{U}_{\text{о}} / I_{\text{о}}.$$

Волновое сопротивление рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{(R + j\omega L) / (G + j\omega C)}.$$

По своей физической природе, что также следует из приведенной формулы, значит, $Z_{\text{в}}$ не зависит от длины кабельной линии и постоянно в любой точке цепи.

В общем виде волновое сопротивление является комплексной величиной и может быть также выражено через его действительную и мнимую части:

$$Z_{\text{в}} = z_{\text{в}} e^{j\varphi_{\text{в}}} = z_{\text{в}} \cos \varphi_{\text{в}} + j z_{\text{в}} \sin \varphi_{\text{в}}.$$

Д. Коэффициент распространения

Электромагнитная энергия, распространяясь вдоль кабельной линии, уменьшается от начала к концу линии.

Уменьшение, или затухание, энергии объясняется потерями ее в цепи передачи. Следует различать два вида потерь энергии. Прежде всего имеются потери в металле. При прохождении тока по кабельной линии происходит нагревание токопроводящих жил и создаются тепловые потери энергии. С ростом частоты эти потери

увеличиваются: чем больше активное сопротивление цепи, тем больше потери энергии в металле. Затем имеют место потери в диэлектрике. Эти потери энергии обусловлены несовершенством применяемых диэлектриков (бумаги, резины и пр.) и затратами энергии на диэлектрическую поляризацию ($G_f = \omega C \operatorname{tg} \delta$). Все эти потери учитываются посредством коэффициента распространения γ .

Коэффициент распространения γ является комплексной величиной и может быть представлен в виде суммы ее действительной и мнимой частей:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}.$$

Уравнение для тока и напряжения можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_0 / \dot{U}_l = I_0 / I_l = e^{(\alpha + j\beta)l} = e^{\alpha l} e^{j\beta l} = A e^{j\varphi}.$$

Модуль этого выражения $A = e^{\alpha l}$ характеризует уменьшение абсолютного значения тока или напряжения при прохождении по линии длиной l . Угол $\varphi = \beta l$ характеризует изменение угла векторов тока или напряжения на этом же участке линии длиной l .

Аналогичные выражения для мощностей имеют вид:

$$\tilde{P}_0 / \tilde{P}_l = e^{2\alpha l} = e^{2\alpha l} e^{j2\beta l}.$$

Следовательно, действительная часть αl коэффициента распространения γl показывает уменьшение электромагнитной энергии в конце линии по сравнению с началом:

$$\frac{U_0}{U_l} = \frac{I_0}{I_l} = e^{\alpha l}; \quad \frac{P_0}{P_l} = e^{2\alpha l}.$$

Мнимая часть выражения βl показывает изменение фазы (угла) при распространении энергии по цепи:

$$\beta l = \varphi_{0U} - \varphi_{lU} = \varphi_{0I} - \varphi_{lI}; \quad 2\beta l = \varphi_{0P} - \varphi_{lP}.$$

При передаче сигналов связи параметры α и β характеризуют соответственно затухание и изменение фаз тока, напряжения и мощности на участке кабельной цепи единичной длины (например, 1 км) и называются

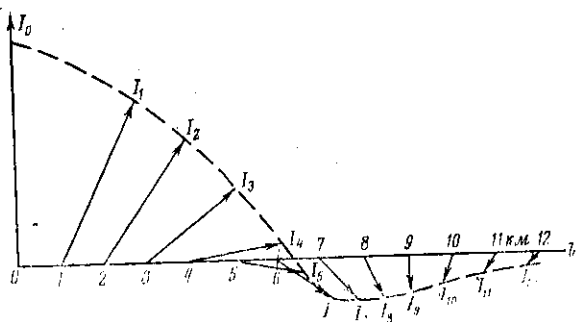


Рис. 9-4. Характер изменения тока вдоль однородной линии.

коэффициентом затухания и коэффициентом фазы.

Коэффициент распространения $\gamma = \alpha + j\beta$ одновременно определяет изменение сигнала как по абсолютному значению, так и по фазе на единице длины кабеля.

Логарифмируя обе части приведенных выше выражений, получаем формулы для расчета затухания:

$$\alpha l = \ln \left| \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_l} \right| = \ln \left| \frac{I_0}{I_l} \right|; \quad \alpha l = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\tilde{P}_0}{\tilde{P}_l} \right|.$$

До недавнего времени затухание было принято измерять в неперах (Нп), отнесенных к 1 км длины кабеля. Затухание, равное 1 Нп, представляет собой затухание такой кабельной цепи, у которой ток (напряжение) в начале ее больше, чем ток (напряжение) в конце, в 2,718 раза. Это определение следует из формулы

$$\frac{U_0}{U_l} = \frac{I_0}{I_l} = e^{\alpha l} = e^1 = 2,718.$$

В радиотехнике, электроакустике и ряде других отраслей науки затухание обычно выражают в децибелах (дБ):

$$1 \text{ Нп} = 8,69 \text{ дБ}; \quad 1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}.$$

Фазовый коэффициент измеряется в радианах на 1 км или в градусах ($1 \text{ рад} = 57,3^\circ$).

На рис. 9-4 показан характер изменения тока вдоль однородной кабельной линии.

Е. Зависимость вторичных параметров от частоты

Вторичные параметры кабельных линий γ и Z_v можно рассчитывать по сокращенным формулам.

В табл. 9-3 приведены сокращенные формулы α , β и Z_v для различных частотных диапазонов.

На рис. 9-5 приведена типовая частотная зависимость коэффициента затухания и коэффициента фазы кабеля. Коэффициент затухания α , равный при постоянном токе $\sqrt{RG}$, вначале растет резко, а затем более плавно. Коэффициент фазы β растет от нуля почти по прямолинейному закону.

Общий вид частотной зависимости волнового сопротивления цепи кабеля дан на рис. 9-6. Модуль волнового сопротивления с изменением частоты уменьшается от значения $\sqrt{R/G}$ (при $f=0$) до $\sqrt{L/C}$ и сохраняет это значение во всей области высоких частот. Угол волнового сопротивления равен нулю при $f=0$ и на высоких частотах, а на средних частотах ($f \approx 800$ Гц) име-

Таблица 9-3

Приближенные формулы для расчета вторичных параметров передачи кабелей связи

Соотношение между величинами R и ωL	Расчетные формулы			Область применения формул
	α , 8,69 дБ/км	β , рад/км	z_n , Ом	
$\omega L = 0$ $\omega C = 0$	$\sqrt{RG}$	0	$\sqrt{\frac{R}{G}}$	Постоянный ток ($f = 0$)
$\frac{R}{\omega L} > 50$	$\sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$	$\sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$	$\sqrt{\frac{R}{\omega C}} e^{-j45^\circ}$	Тональные частоты ($f = 800$ Гц)
$\frac{R}{\omega L} > 5$	$\sqrt{\frac{\omega C}{2}} \times$			
	$\times (R - \omega L)$			
$\frac{\omega L}{R} > 3,5$	$\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} +$ $+\frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$	$\omega \sqrt{LC}$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$	Высокие частоты и кабели с повышенной индуктивностью
$0,3 < \frac{R}{\omega L} < 5$	$\gamma = \alpha + j\beta =$ $= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$		$\sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$	Промежуточные частоты

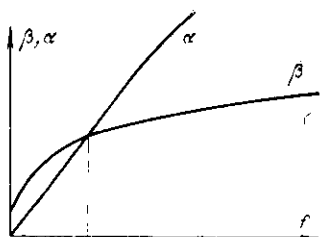


Рис. 9-5. Частотная зависимость коэффициента затухания α и коэффициента фазы β .

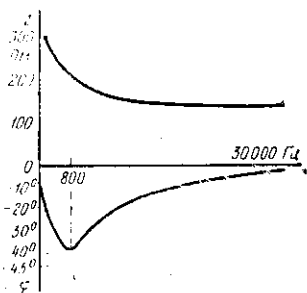


Рис. 9-6. Частотная зависимость волнового сопротивления.

ет максимальное значение. В кабельных линиях угол всегда отрицателен и по абсолютному значению не превышает 45° , что свидетельствует о преобладании емкостной составляющей и емкостном характере волнового сопротивления кабелей.

Ж. Скорость распространения электромагнитной энергии по кабелям

Электромагнитная энергия распространяется по кабельной линии с определенной скоростью. Посланный в линию сигнал достигает ее конца лишь через соответствующий промежуток времени.

Скорость передачи зависит от параметров цепи и частоты тока. Она определяется следующей формулой:

$$v = \omega / \beta.$$

Как видно из этой формулы, скорость распространения является функцией частоты $f = \omega / 2\pi$ и коэффициента фазы β , который в свою очередь зависит от первичных параметров линии.

Таким образом, если затухание цепи α определяет качество и дальность связи, то коэффициент фазы β обуславливает скорость движения энергии по линии.

В диапазоне высоких частот, когда $\beta = \omega \sqrt{LC}$, скорость не зависит от частоты и определяется лишь параметрами кабеля:

$$v = \omega / \beta = 1 / \sqrt{LC}.$$

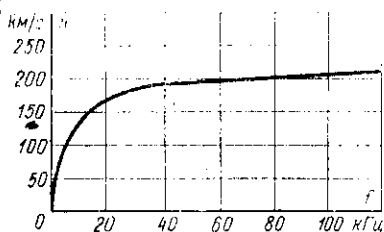


Рис. 9-7. Зависимость скорости распространения электромагнитной энергии от частоты f , кГц.

При постоянном токе:

$$v = \frac{1}{\frac{1}{2} \sqrt{LC} \left(\sqrt{\frac{LG}{RC}} + \sqrt{\frac{RC}{LG}} \right)}.$$

На рис. 9-7 представлена частотная зависимость скорости распространения электромагнитной энергии по кабельным линиям с диаметром токопроводящих жил 1,2.

Анализируя приведенные выше формулы и кривые, можно отметить, что с возрастанием частоты скорость распространения электромагнитной энергии по кабельным линиям также существенно возрастает. Скорость распространения электромагнитной энергии по линии при постоянном токе составляет примерно 10 000 км/с, а при токах высоких частот — около 200 000 км/с, приближаясь к скорости света ($c=300\,000$ км/с).

3. Свойства неоднородных линий

Явления, разобранные выше, относятся к кабельной линии, однородной по своим электрическим характеристикам на всем протяжении от генератора до приемника с нагрузкой в виде аппаратуры, имеющей сопротивление, равное волновому ($Z_r = Z_n = Z_v$). В этом случае отраженных электромагнитных волн нет, и вся передаваемая энергия полностью поглощается приемником; электрические процессы в линии описываются упрощенными уравнениями, а затухание линии определяется ее собственным затуханием.

Значительно более сложные электромагнитные процессы возникают в неоднородных линиях и при несогласованных нагрузках. В местах электрических несоответствий возникают отраженные волны, некоторая доля энергии возвращается к началу цепи, и в приемник поступает лишь часть энергии. В такой линии отраженные волны искажают частотную характеристику собственного волнового сопротивления кабеля. Присоединенный к входу линии измерительный прибор покажет уже не волновое, а ее входное сопротивление $Z_{вх}$, ха-

рактизирующее новое электрическое состояние линии. Затухание линии определяется теперь суммой собственного затухания кабеля и затухания за счет неоднородности электрических характеристик цепи. Дальность связи по такой кабельной линии будет обуславливаться не собственным затуханием линии $a = \alpha l$, а ее рабочим затуханием a_p .

Количественное соотношение между энергией, поступившей к приемнику, и отраженной энергией зависит от соотношения сопротивлений приемника $Z_{\text{п}}$ и волнового $Z_{\text{в}}$ и характеризуется коэффициентом отражения

$$p = (Z_{\text{п}} - Z_{\text{в}}) / (Z_{\text{п}} + Z_{\text{в}}).$$

При согласованной нагрузке ($Z_{\text{п}} = Z_{\text{в}}$) коэффициент отражения превращается в нуль, и энергия полностью поглощается приемником.

При замыкании конца цепи накоротко ($Z_{\text{п}} = 0$) и режиме холостого хода ($Z_{\text{п}} = \infty$) коэффициенты отражения соответственно равны -1 и $+1$.

Передача электромагнитной энергии по неоднородным линиям находится в неблагоприятных условиях, и качество связи по ним может быть совершенно неудовлетворительным.

Входным сопротивлением $Z_{\text{вх}}$ называется сопротивление, измеренное на входе линии при любом нагрузочном сопротивлении на ее конце.

Величина $Z_{\text{вх}}$ выражается отношением напряжения $\dot{U}_0$ к току $\dot{I}_0$ в начале линии и в общем виде может быть получена из уравнения

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} = z_{\text{в}} \operatorname{th}(\gamma l + n),$$

где

$$n = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{Z_{\text{в}} + Z_{\text{п}}}{Z_{\text{в}} - Z_{\text{п}}} \right| = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1}{p} \right|;$$

p — коэффициент отражения.

Рабочее затухание a_p является затуханием кабельной цепи в рабочих условиях, т. е. при любых нагрузочных сопротивлениях на концах. Оно представляет собой более общий параметр, так как, кроме собственного затухания кабеля, $a = \alpha l$ учитывает также явления, обусловленные несогласованностями на стыках кабеля $Z_{\text{в}}$ с нагрузкой $Z_{\text{г}}$ и $Z_{\text{п}}$.

Рабочее затухание (дБ/км) рассчитывается по формуле

$$a_p = 8,69 \left[\alpha l + \ln \left| \frac{Z_r + Z_n}{2 \sqrt{Z_r Z_n}} \right| + \right. \\ \left. + \ln \left| \frac{Z_n + Z_n}{2 \sqrt{Z_n Z_n}} \right| + \ln (1 - p_1 p_2 e^{-2\gamma l}) \right],$$

где $p_1 = (Z_r - Z_n) / (Z_r + Z_n)$ и $p_2 = (Z_n - Z_n) / (Z_n + Z_n)$ — коэффициенты отражения на стыках генератор — кабель и приемник — кабель.

Выражение для a_p состоит из четырех слагаемых.

Первое слагаемое — собственное затухание кабеля αl ; второе и третье слагаемые — дополнительные затухания вследствие несогласованности сопротивлений генератора и кабеля ($Z_r \neq Z_n$), приемника и кабеля ($Z_n \neq Z_n$); четвертое слагаемое — дополнительное затухание от взаимодействия несогласованностей в начале и конце линии.

Если достигнуто согласование нагрузочных сопротивлений в начале и конце линии ($Z_r = Z_n = Z_n$), то остается лишь первое слагаемое, и рабочее затухание равно собственному ($a_p = \alpha l$).

И. Методы уменьшения затухания кабельных цепей

Электрические свойства кабеля связи любого типа полностью характеризуются четырьмя первичными параметрами (R , L , C и G).

Коэффициент затухания (дБ/км) связан с этими параметрами выражением

$$\alpha = 8,69 \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = (\alpha_m + \alpha_d).$$

Условно введя в приведенное выражение параметр $X = \sqrt{RC/LG}$, получим:

$$\alpha = 8,69 \left(\frac{\sqrt{RG}}{2} X + \frac{\sqrt{RG}}{2} \frac{1}{X} \right) = 8,69 \left(\frac{\alpha_0}{2} X + \frac{\alpha_0}{2} \frac{1}{X} \right),$$

где $\alpha_0 = \sqrt{RG}$.

Отсюда нетрудно доказать, что затухание цепи имеет минимальное значение ($\alpha = \alpha_{\min}$) при $X=1$, т. е. когда ее первичные параметры находятся в соотношении

$$RC = LG. \quad (9-14)$$

Такое соотношение является оптимальным, и к нему следует стремиться при конструировании кабелей связи.

Наименьшее затухание цепи при этом равно:

$$\alpha_{\min} = 8,69 \frac{\alpha_0}{2} \left(X + \frac{1}{X} \right) = 8,69 \alpha_0 = 8,69 \sqrt{RG}.$$

На рис. 9-8 показан характер изменения коэффициентов затухания в металле α_m и диэлектрике α_d при различных значениях X . Из кривой следует, что с ростом X α_m увеличивается, а α_d резко уменьшается. При $X=1$ потери энергии в металле равны потерям в диэлектрике $\alpha_m = \alpha_d$ и затухание кабеля будет наименьшим:

$$\alpha_{\min} = \alpha_m + \alpha_d = 8,69 \alpha_0 = 8,69 \sqrt{RG}.$$

В обычных кабелях $X > 1$, так как $RC \gg LG$.

Таким образом, затухание может быть снижено либо уменьшением R и G , что крайне трудно, так как R и G регламентированы допустимым расходом меди (диаметром жилы) и качеством диэлектриков, либо уменьшением емкости цепи C , либо увеличением ее индуктивности L .

Для снижения емкости необходимо увеличить расстояние между жилами кабеля, т. е. увеличить его габариты, что явно нецелесообразно. Единственным реальным путем уменьшения затухания кабельных линий связи является искусственное увеличение индуктивности цепи. Из (9-14) видно, что оптимальная индуктивность, которой должна обладать кабельная цепь для обеспечения минимального затухания, равна $L_0 = RC/G$.

С возрастанием частоты степень несоответствия кабелей условию (9-14) существенно уменьшается. Это

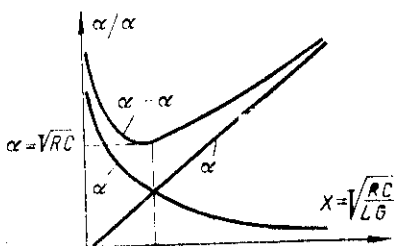


Рис. 9-8. Затухание в металле α_m и затухание в диэлектрике α_d при различных соотношениях первичных параметров. $X = \sqrt{RC/LG}$.

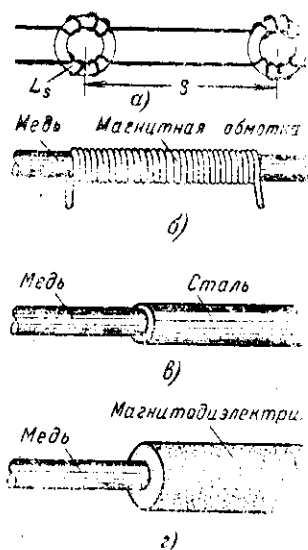


Рис. 9-9. Искусственное увеличение индуктивности кабельных цепей.

а — пупинизированная цепь; б — краупинизированный провод; в — биметаллический провод; г — провод с магнитодиэлектриком.

объясняется увеличением проводимости изоляции с возрастанием частоты, поэтому условие (9-14) выполняется на определенной частоте ω_x без искусственного повышения индуктивности. Значение ω_x можно найти из того же условия (9-14):

$$\frac{R}{L} = \frac{G}{C} = \frac{\omega_x C \operatorname{tg} \delta}{C} = \omega_x \operatorname{tg} \delta,$$

отсюда

$$\omega_x = R/L \operatorname{tg} \delta.$$

Для симметричных кабелей связи частота $f_x = \omega_x/2\pi$ лежит в пределах 200—600 кГц, и для снижения затухания в спектре фактически используемых частот приходится прибегать к искусственному увеличению индуктивности. Иногда это мероприятие оказывается экономически невыгодным даже при низких частотах.

Известно несколько различных способов искусственного увеличения индуктивности кабельных цепей связи: пупинизация, краупинизация, биметаллизация жил и, наконец, использование магнитодиэлектрика (рис. 9-9). Большее применение в кабельной технике получил способ пупинизации кабельных цепей.

Пупинизация состоит в том, что в кабель через определенные расстояния, называемые шагом пупинизации S , включаются катушки индуктивности L_s , называемые в честь их автора (ниж. Пуинна) пупиновскими (рис. 9-9, а).

Пупинизация в 2—3 раза снижает затухание в довольно широкой полосе частот. Лишь при частотах, близких к предельной f_0 и выше ее, оно резко возрастает и даже становится больше, чем для непупинизированных кабелей. Недостатками этих кабелей являются ограниченная дальность связи и сравнительно узкий частотный диапазон их использования.

Увеличить индуктивность кабельных цепей, соответственно снизив их затухание, можно также путем применения ферромагнитной обмотки на токопроводящей жиле (рис. 9-9,б) или путем применения биметаллических жил с наложением тонкого слоя стали (рис. 9-9,в).

Первый способ, называемый крапунизацией, состоит в нанесении на токопроводящую жилу тонкой проволоки или ленты из стали, пермаллоя или другого сплава с большой магнитной проницаемостью.

По второму способу на медную токопроводящую жилу наносится электролитическим путем тонкий слой стали толщиной 10—20 мкм. Благодаря этому вокруг медной жилы образуется магнитопроводящая среда, увеличивается магнитный поток и соответственно возрастает индуктивность кабеля.

Такого же эффекта увеличения индуктивности можно достигнуть путем применения магнитодиэлектрика (рис. 9-9,г). Технологически слой магнитодиэлектрика наносится на медную жилу кабеля при помощи обычного шприц-пресса.

Существует большое количество рецептов магнитодиэлектрика. Но лучшие результаты дает полиэтилен с наполнением ферритом или альсифером. Увеличение степени наполнения магнитного порошка существенно повышает магнитную проницаемость магнитодиэлектрика и одновременно снижает его удельное сопротивление. Так, например, магнитодиэлектрик имеет $\mu = 8 \div 10$ и $\rho = 10^5 \div 10^6$ Ом·м.

Указанные способы искусственного увеличения индуктивности кабельных цепей широкого распространения не получили.

9-3. ВЗАИМНЫЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖДУ КАБЕЛЬНЫМИ ЦЕПЯМИ

А. Основные параметры влияния

Помехозащищенность кабельных линий связи является важнейшим условием обеспечения надежной связи приобретающим особое значение при высокочастотном телефонировании и телеграфировании на большие расстояния. Качество и дальность связи в этом случае обуславливаются не столько собственным затуханием цепи, сколько мешающими взаимными влияниями между соседними цепями.

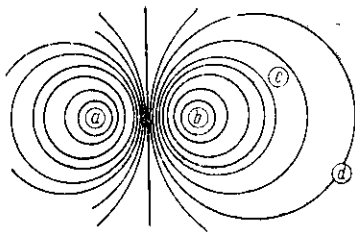
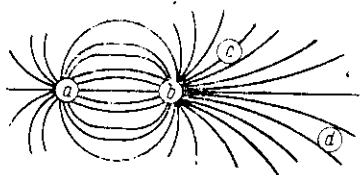


Рис. 9-10. Схема электрического влияния.

Рис. 9-11. Схема магнитного влияния.

Взаимные влияния проявляются в виде переходного разговора или шума. Переходные разговоры и шум понижают разборчивость речи.

Переход энергии с одной цепи на другую обусловлен электромагнитным взаимодействием между ними и может быть условно представлен в виде суммарного действия электрического и магнитного полей.

При прохождении тока по какой-либо цепи (влияющей), например $a-b$ (рис. 9-10), на проводниках этой цепи образуются заряды $+Q_1$ и $-Q_2$. Эти заряды создают электрическое поле, силовые линии которого частично соприкасаются с проводниками $c-d$ смежной цепи (подверженной влиянию). Вследствие этого между проводниками $c-d$ образуется разность потенциалов, которая создает в них ток, распространяющийся вдоль цепи. Наведенный ток достигает приемника, включенного на конце цепи, и проявляется в виде мешающего влияния. Влияние, обусловленное действием электрического поля, называют **электрическим влиянием**.

Наряду с электрическим влиянием одновременно действует и магнитное влияние (рис. 9-11). При прохождении тока по влияющей цепи $a-b$ вокруг проводников этой цепи образуется магнитное поле, линии индукции которого воздействуют на проводники $c-d$. Эти магнитные линии, пересекая проводники $c-d$, наводят в них э. д. с., которая создает в цепи $c-d$ ток. Этот ток, распространяясь вдоль цепи, достигает включенного на ее конце приемника, а также создает мешающее действие. Влияние, обусловленное действием магнитного поля, называется **магнитным влиянием**.

Чем выше частота передаваемого тока, тем быстрее протекает процесс изменения электрического и магнитного полей и тем больше взаимное мешающее влияние между цепями связи.

Электрическое и магнитное влияния между цепями характеризуются соответственно электрической и магнитной связями (K_{12} и M_{12}).

Электрическая связь определяется отношением тока I_2 , наведенного в цепи, подверженной влиянию, к разности потенциалов во влияющей цепи U_1 :

$$K_{12} = g + j\omega k = I_2/U_1,$$

где g — активная составляющая электрической связи; k — емкостная связь.

Магнитная связь определяется отношением наведенной э. д. с. E_2 в цепи, подверженной влиянию, к току во влияющей цепи I_1 с обратным знаком:

$$M_{12} = r + j\omega m = -E_2/I_1,$$

где r — активная составляющая магнитной связи;

m — индуктивная связь.

Электрическая связь K_{12} представлена в единицах проводимости ($1/\text{Ом}$), а магнитная (M_{12}) — в единицах сопротивления (Ом).

При учете совместного действия связей необходимо перевести их в одинаковые единицы измерения.

Имея в виду, что $U_1 = I_1 Z_{B1}$ и $I_2 = E_2/Z_{B2}$, можно выразить электрическую и магнитную связи в безразмерных единицах:

$$K_{12} = (g + j\omega k) Z_B;$$

$$M_{12} = (r + j\omega m) \frac{1}{Z_B}$$

при $Z_{B1} = Z_{B2} = Z_B$.

На рис. 9-12 показана эквивалентная схема электрической и магнитной связей между двумя цепями.

Параметры r , g , k и m называются первичными параметрами влияния. Вторичным параметром влияния является переходное затухание A , характеризующее затухание токов влияния при переходе с первой цепи на вторую. В линиях связи обычно стремятся умень-

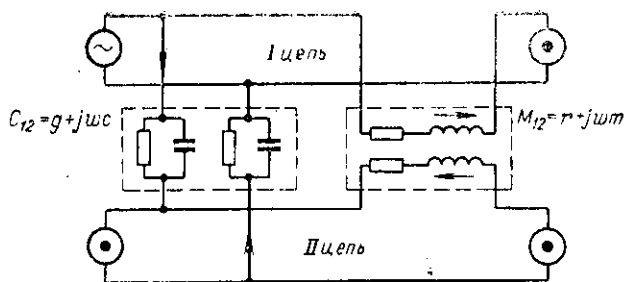


Рис. 9-12. Эквивалентная схема электрической (K_{12}) и магнитной (M_{12}) связей.

шить собственное затухание цепи и увеличить переходное затухание A .

Переходное затухание является основной мерой оценки свойств кабельных линий по взаимному влиянию между цепями и пригодности цепей для высокочастотного уплотнения.

Переходное затухание измеряется в децибелах:

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2},$$

где P_1 — мощность генератора;
 P_2 — мощность помех.

Электромагнитная связь, а следовательно, переходное затухание и соответственно степень влияния между цепями обуславливаются взаимным расположением проводов влияющей и подверженной влиянию цепей, системой связи, типом скрутки (звездная, парная, двойная, парная), степенью конструктивной однородности как по длине линии, так и по сечению и качеством применяемых материалов. Кроме того, мешающее влияние зависит от длины линии и частоты передаваемых сигналов связи. Принципиально, чем выше частота передаваемого тока и длиннее линия, тем сильнее взаимное влияние.

С целью защиты кабельных цепей от взаимных влияний и внешних помех производятся скрутка и экранирование элементов в процессе производства кабелей и симметрирование цепей при монтаже и строительстве линий.

Б. Электромагнитные связи между цепями

Рассмотрим природу и характер действия электрических ($K_{12}=g+j\omega k$) и магнитных ($M_{12}=r+j\omega m$) связей между цепями.

Емкостная связь k является результатом асимметрии частичных емкостей между жилами влияющей и подверженной влиянию цепей.

На рис. 9-13, а показаны жилы 1—2 влияющей цепи I и жилы 3—4 цепи II, подверженной влиянию. Частичные емкости между жилами c_{13} , c_{14} , c_{23} , c_{24} образуют мост.

Если мост симметричен и находится в уравновешенном состоянии, то перехода энергии (мешающего влияния) из первой цепи во вторую не будет.

Условием симметрии моста является следующее равенство:

$$Q_3 - Q_4 = 0, \text{ или } (c_{13} + c_{24}) - (c_{14} + c_{23}) = 0.$$

Между цепями не будет влияния, если суммы противоположных емкостей будут равны, т. е.

$$c_{13} + c_{24} = c_{14} + c_{23}.$$

Существующая в действительных условиях емкостная асимметрия (неуравновешенность) моста, являющаяся причиной возникновения мешающих влияний между цепями связи, и называется емкостной связью:

$$k = (c_{13} + c_{24}) - (c_{14} + c_{23}).$$

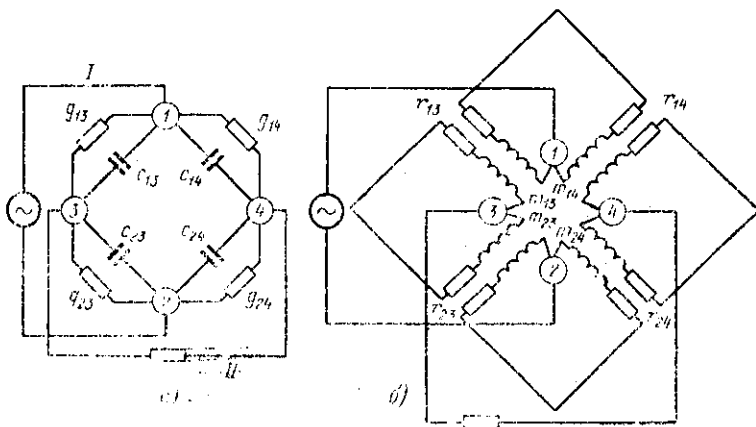


Рис. 9-13. Мосты связей.

а — электрической; б — магнитной.

Индуктивная связь m по аналогии может быть представлена мостом частичных индуктивностей, имеющих трансформаторную связь (рис. 9-13,б). В этом случае приходится иметь дело не с электрическими зарядами, а с магнитными потоками.

Активная составляющая электрической связи g обусловлена асимметрией потерь энергии в изоляции различных жил. Это нарушает симметрию моста и создает условия для взаимного перехода энергии между цепями (рис. 9-13,а).

Активная составляющая магнитной связи r , или так называемая активная связь, обусловлена вихревыми токами.

Несимметричность расположения жил одной цепи относительно жил другой и металлических оболочек кабеля, а также применение жил различных диаметров и электрических свойств приводят к асимметрии потерь энергии на вихревые токи, что проявляется в виде расстройки моста связей r_{13} , r_{14} , r_{23} , r_{24} (рис. 9-13,б).

Соотношения между электрическими и магнитными связями, их активными и реактивными составляющими могут быть различными в зависимости от характера цепей, диапазона передаваемых частот и ряда других факторов.

На рис. 9-14 приведена частотная зависимость процентного соотношения различных видов связей внутри четверки. Из кривых следует: 1) в области низких частот (тональный спектр) доминируют емкостные связи; другие составляющие связей в этом диапазоне можно не

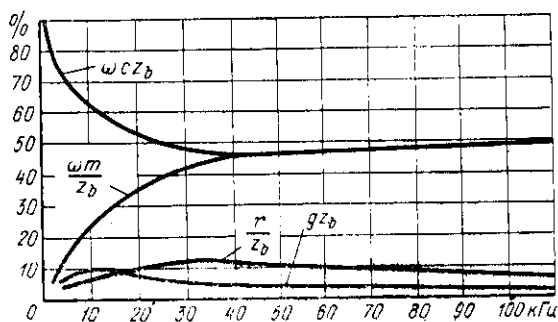


Рис. 9-14. Процентное соотношение электромагнитных связей внутри четверки.

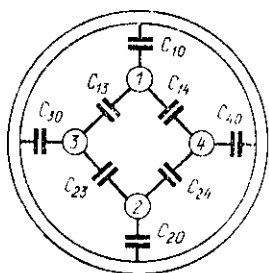


Рис. 9-15. Емкостные связи внутри четверки.

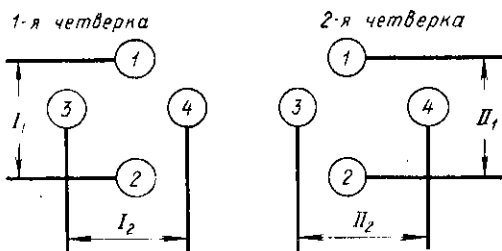


Рис. 9-16. Емкостные связи между четверками.

учитывать; 2) с возрастанием частоты увеличивается удельная значимость магнитного влияния и, начиная примерно с $f=15$ кГц, индуктивные связи становятся равными емкостным ($\omega k z_b = \omega m \frac{1}{z_b}$); 3) активные связи r/z_b и $g z_b$, будучи равными практически нулю при низких частотах и постоянном токе, в области высоких частот существенно возрастают; в среднем соотношение активных и реактивных составляющих связей

$$g/\omega k = 10 \div 15\%; \quad r/\omega m = 20 \div 40\%;$$

4) между индуктивными и емкостными связями в кабелях существует соотношение

$$m/k = z_b^2.$$

Поэтому, если известно значение k (которое обычно нормируется в технических условиях на кабели связи), то легко определить и m . Так, например, если $k=15$ пФ на строительную длину кабеля, то

$$m = k z_b^2 = 15 \cdot 10^{-12} \cdot 170^2 = 435 \text{ нГ}.$$

При высокочастотном уплотнении кабелей необходимо считаться со всеми составляющими связей. В области низких частот достаточно учитывать лишь емкостную связь.

Наиболее удобно измерять и оценивать электромагнитные связи через емкостные связи.

Параметры, характеризующие емкостную связь и асимметрию внутри четверки (рис. 9-15), определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= (c_{13} + c_{24}) - (c_{14} + c_{23}); \\ k_2 &= (c_{13} + c_{14}) - (c_{23} + c_{24}); \\ k_3 &= (c_{13} + c_{23}) - (c_{14} + c_{24}); \end{aligned} \right\} \text{коэффициенты связи;}$$

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= c_{10} - c_{20}; \quad e_2 = c_{30} - c_{40}; \\ e_3 &= (c_{10} + c_{20}) - (c_{30} + c_{40}); \end{aligned} \right\} \text{коэффициенты асимметрии.}$$

Связи между четверками учитываются через значения коэффициентов $k_9, k_{10}, k_{11}, k_{12}$ (рис. 9-16). Связи между искусственными (фактовыми) цепями учитываются коэффициентами k_4, k_5, k_6, k_7, k_8 .

В. Переходное затухание

При рассмотрении влияния между цепями связи различают два вида перехода энергии: на ближнем (передающем) и дальнем (приемном) концах (рис. 9-17).

Влияние, проявляющееся на том конце, где расположен генератор первой цепи, называется переходным влиянием на ближнем (передающем) конце A_0 . Влияние на противоположный конец второй цепи называется переходным влиянием на дальнем (приемном) конце A_l .

Переходное затухание на ближнем конце, дБ,

$$A_0 = 10 \lg P_{10}/P_{20};$$

на дальнем конце

$$A_l = 10 \lg \frac{P_{10}}{P_{2l}}.$$

Наряду с параметрами A_0 и A_l в технике связи широко используется параметр A_3 — защищенность цепей, представляющая собой половину натурального логарифма отношения мощностей полезного сигнала P_c и помех P_n в рассматриваемой точке цепи:

$$A_3 = 10 \lg \frac{P_c}{P_n}.$$

Для цепей с одинаковыми параметрами защищенность численно равна разности между переходным затуханием линии на дальнем конце и ее собственным затуханием (рис. 9-17):

$$A_3 = A_l - \alpha l.$$

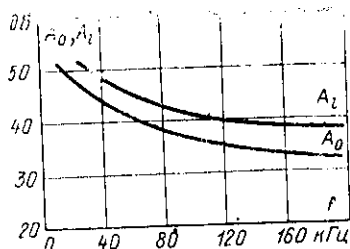
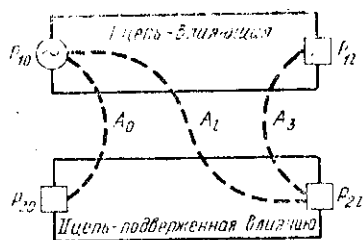


Рис. 9-17. Влияние между цепями связи.

A_0 — на ближнем конце; A_1 — на дальнем конце; A_3 — защищенность.

Рис. 9-18. Частотная зависимость переходного затухания.

Переходное затухание определяется по следующим формулам, дБ:

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{2\sqrt{4\alpha}}{N_{12} \sqrt{1 - e^{-4\alpha l}}} \right|; \quad A_1 = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12} \sqrt{l}} \right| + \alpha l.$$

Соответственно защищенность

$$A_3 = A_1 - \alpha l = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12} \sqrt{l}} \right|.$$

Для практических целей целесообразно выразить формулы расчета переходного затухания кабельной линии через параметры строительной длины кабеля, дБ:

$$A_0 = A_{0c} + 20 \lg \sqrt{\frac{4\alpha l_0}{1 - e^{-4\alpha n l_0}}};$$

$A_1 = A_{1c} - 20 \lg \sqrt{n} + \alpha(n-1)l_0$; $A_3 = A_{3c} - 20 \lg \sqrt{n}$,
где $N_{12} = K_{12}Z_B + M_{12}/Z_B$ — электромагнитная связь на ближнем конце;

$F_{12} = K_{12}Z_B - M_{12}/Z_B$ — то же на дальнем конце;

l_0 — строительная длина кабеля;

n — число строительных длин кабеля;

A_{0c} , A_{1c} , A_{3c} — соответствующие значения на одной строительной длине.

На рис. 9-18 показана частотная зависимость переходного затухания между цепями симметричного кабеля. С ростом частоты переходное затухание уменьшается, причем, как правило, $A_1 > A_0$, так как $N_{12} > F_{12}$.

9.4. СИММЕТРИЧНЫЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

А. Электрические процессы в симметричных кабелях связи

Под действием переменного поля происходит перераспределение электромагнитной энергии по сечению жил; при этом наблюдаются следующие явления: 1) поверхностный эффект; 2) эффект близости; 3) воздействие на параметры цепи окружающих металлических масс (соседних жил, экрана, брони). В симметричных кабелях связи действуют все три указанных фактора одновременно. В коаксиальных кабелях, являющихся закрытой системой, не имеющей внешнего поля, действие окружающих металлических масс не учитывается. За счет этих явлений происходит перераспределение электромагнитного поля и изменяются параметры цепей. Активное сопротивление R возрастает, индуктивность L уменьшается.

Наиболее существенно возрастает сопротивление цепи:

$$R = R_0 + R_{\text{п.э}} + R_{\text{бл}} + R_{\text{м}},$$

где R_0 — сопротивление постоянному току;

$R_{\text{п.э}}$ — сопротивление вследствие поверхностного эффекта;

$R_{\text{бл}}$ — сопротивление вследствие эффекта близости;

$R_{\text{м}}$ — сопротивление, обусловленное потерями в окружающих металлических массах.

Поверхностный эффект обусловлен действием электромагнитной волны, распространяющейся по проводнику (§ 9-8).

При высокой частоте ток вытесняется на поверхность проводника, что вызывает увеличение его активного сопротивления. Таким образом, из-за явления поверхностного эффекта переменный ток проникает в жилу лишь на небольшую глубину, называемую эквивалентной глубиной проникновения.

Коэффициент вихревых токов определяется формулой

$$k = \sqrt{\omega \mu \sigma},$$

где ω — угловая частота;

μ — магнитная проницаемость;

σ — проводимость.

Эквивалентная глубина проникновения $\theta = \sqrt{2}/k = \sqrt{2}/\omega\mu\sigma$. Для меди $k = 0,0210 \sqrt{f}$, 1/мм, а глубина проникновения $\theta = 66,68 / \sqrt{f}$, мм; для алюминия $k = 0,01635 \sqrt{f}$, 1/мм и $\theta = 86,44 / \sqrt{f}$, мм.

Эффект близости связан с взаимодействием внешних полей.

Как видно из рис. 9-19, внешнее магнитное поле H проводника a , пересекая толщу проводника b , наводит в нем вихревые токи $I_{в.т}$.

На поверхности проводника b , обращенной к проводнику a , вихревые токи совпадают по направлению с проходящим по нему основным током $(I + I_{в.т})$, а на противоположной поверхности проводника они направлены навстречу основному току $(I - I_{в.т})$.

Аналогичное перераспределение токов происходит в проводнике a .

При взаимодействии вихревых токов с основным током плотность результирующего тока на обращенных друг к другу поверхностях проводников a и b увеличивается, а на отдаленных — уменьшается. Это явление (сближение токов в проводниках a и b) носит название эффекта близости.

Из-за неравномерного распределения плотности тока увеличивается активное сопротивление цепи переменному току.

Эффект близости также прямо пропорционален частоте, магнитной проницаемости, проводимости и диаметру проводника и, кроме того, зависит от расстояния между проводниками. С приближением токопроводящих жил друг к другу действие эффекта близости возрастает в квадратичной зависимости.

Если по двум соседним проводникам токи проходят в одном направлении, то перераспределение их плотности из-за взаимодействия внешних электромагнитных полей при-

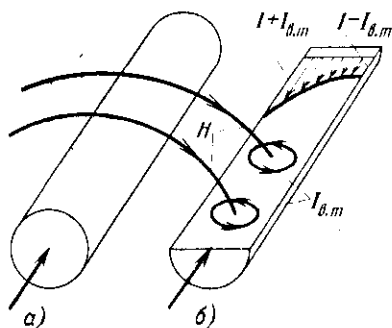


Рис. 9-19. Эффект близости в проводах кабельной цепи.

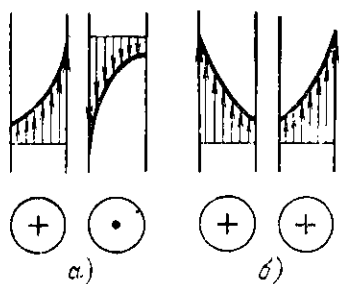


Рис. 9-20. Распределение плотности тока в проводниках.

водит к увеличению плотности токов на взаимно отдаленных поверхностях проводников *а* и *б*.

На рис. 9-20 показано распределение плотности токов в жилах симметричной цепи для случаев, когда токи в проводниках *а* и *б* направлены противоположно и в одну сторону.

Окружающие металлические массы за счет отражения от них электромагнитного поля воздействуют на параметры цепи. Магнитное поле *H*, создаваемое током, проходящим по жилам цепи, наводит вихревые токи $I_{в.т}$ в соседних жилах кабеля, окружающем экране, металлической оболочке, броне и т. п.

Вихревые токи нагревают металлические части кабеля и создают дополнительные тепловые потери энергии, что выражается как бы в отсасывании некоторой доли передаваемой энергии, причем больше они воздействуют на близко расположенные к рассматриваемой цепи металлические части кабеля. Кроме того, эти токи создают поле обратного действия, которое воздействует на жилы цепи и изменяет их параметры.

Перераспределение электромагнитного поля влечет за собой изменение параметров цепи линий связи. Активное сопротивление *R* и емкость *C* возрастают, а индуктивность *L* уменьшается.

Б. Расчет электрических параметров симметричных кабелей связи

Сопротивление, Ом/км, цепи постоянному току определяется по формуле

$$R_0 = \rho \cdot 8 \cdot 10^{-6} / \pi d^2,$$

где *d* — диаметр проводника, мм;
 ρ — удельное сопротивление, Ом·м.

Вследствие скрутки жил сопротивление цепи увеличивается пропорционально коэффициенту укрутки, зна-

Таблица 9-4

Коэффициент укрутки

Диаметр по повиву, мм	До 30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80
Коэффициент укрутки	1,010	1,016	1,025	1,037	1,050	1,070

Таблица 9-5

Сопротивления медных цепей постоянному току

Диаметр медной жилы, мм	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
Сопротивление, Ом/км	190,0	131,6	96,0	72,2	57,0	47,0	31,9	23,8

чения которого в зависимости от диаметра кабеля приведены в табл. 9-4.

Сопротивления постоянному току кабельных двухпроводных цепей из меди имеют значения, приведенные в табл. 9-5.

Пересчет сопротивления жил при температуре t , отличной от 20°C , производится по формуле

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ)],$$

где R_{20} — сопротивление при $t = 20^\circ\text{C}$;

α — температурный коэффициент сопротивления.

Активное сопротивление R , Ом/км, кабельной цепи переменному току без учета R_m определяется по формуле

$$R = \kappa R_0 \left[1 + F(x) + \frac{\rho G(x) \left(\frac{d}{a} \right)^2}{1 - H(x) \left(\frac{d}{a} \right)^2} \right],$$

где первый член учитывает сопротивление постоянному току, второй обуславливает увеличение сопротивления вследствие поверхностного эффекта, а третий — вследствие эффекта близости;

a — расстояние между центрами проводников, мм;

d — диаметр проводника, мм;

κ — коэффициент укрутки, значения которого приведены в табл. 9-4;

p — коэффициент, учитывающий характер скрутки; для пары жил $p=1$; для звезды $p=5$.

Функции $F(x)$, $G(x)$ и $H(x)$ даны в табл. 9-6. Значение x для медных цепей определяется по формуле

$$x = 0,0105d \sqrt{f};$$

для алюминиевых цепей

$$x = 0,0082d \sqrt{f}.$$

В этих формулах d измеряется в миллиметрах, а f в герцах.

Дополнительное сопротивление, Ом/км, обусловленное потерями на вихревые токи в соседних жилах и свинцовой оболочке, определяется по формуле

$$R_m = R_m^* \sqrt{f/200\,000},$$

где R_m^* — сопротивление потерь в смежных четверках или свинцовой оболочке при $f=200\,000$ Гц, значения которого приведены в табл. 9-7.

Таблица 9-6

Функции F , G , H и Q для различных значений x

x	$F(x)$	$G(x)$	$H(x)$	$Q(x)$
0	0	$\frac{x^4}{64}$	0,01417	1,0
0,5	0,000326	0,000975	0,042	0,9998
1,0	0,00519	0,01519	0,053	0,997
1,5	0,0258	0,0691	0,092	0,987
2,0	0,0782	0,1724	0,169	0,961
2,5	0,1756	0,295	0,263	0,913
3,0	0,318	0,405	0,348	0,845
3,5	0,492	0,499	0,416	0,766
4,0	0,678	0,584	0,466	0,686
4,5	0,862	0,669	0,503	0,616
5,0	1,042	0,755	0,530	0,556
7,0	1,743	1,109	0,596	0,400
10,0	2,799	1,641	0,643	0,282
$>10,0$	$(\sqrt{2}x-3)/4$	$(\sqrt{2}x-1)/8$	0,750	$2\sqrt{2}/x$

Дополнительное сопротивление R , Ом/км, вследствие потерь в окружающих металлических массах

Число четверок в кабеле	Потери смежных четверок			Потери внутри свин- цовой оболочки			Потери внутри алю- миневой оболочки		
	0	—	—	22	—	—	8,1	—	—
1	8	7,5	—	1,5	5,5	—	0,6	2	—
1+6	8	7,5	7,5	0	0	1	0	0	0,4

Эти потери нужно учитывать, начиная с частоты $f = 30$ кГц и выше.

Для кабеля с диаметром $d = 1,2$ мм при $f = 108$ кГц удельное значение различных составляющих сопротивления характеризуется следующими данными: $R_0 = 31,6$ Ом/км; $R_{п.о} = 22,9$ Ом/км; $R_{бл} = 8,2$ Ом/км; $R_m = 6,15$ Ом/км. Полное сопротивление цепи $R = 68,85$ Ом/км.

Индуктивность цепи L состоит из двух частей: наружной межпроводниковой индуктивности L_n и внутренней индуктивности L_v .

Индуктивность, Г/км, двухпроводной кабельной цепи определяется по формуле

$$L = \kappa \left[4 \ln \frac{2a - d}{d} + Q(x) \right] \cdot 10^{-4},$$

где a — расстояние между центрами проводников, мм;

d — диаметр проводника, мм;

κ — коэффициент укрутки (табл. 9-4);

$Q(x)$ — коэффициент (табл. 9-6).

Наибольшее значение имеет наружная индуктивность. Внутренняя индуктивность значительно меньше и с ростом частоты существенно снижается.

Индуктивность цепей для различных типов кабелей составляет $(0,6 \div 0,7) \cdot 10^{-3}$ Г/км.

Емкость цепи C , Ф/км, определяется по формуле

$$C = \frac{\kappa \varepsilon \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left(\frac{2a}{d} \phi \right)},$$

где a — расстояние между центрами проводников, мм;

d — диаметр проводника, мм;

κ — коэффициент укрутки (табл. 9-4);

ϵ — эквивалентная диэлектрическая проницаемость комбинированной изоляции;

ψ — поправочный коэффициент, характеризующий близость проводников к заземленной оболочке и другим проводникам (значение ψ для различных видов скрутки составляет 0,6—0,65).

Эквивалентная диэлектрическая проницаемость зависит от типа изоляции, соотношения твердого диэлектрика и воздуха в изоляции кабеля и определяется выражением

$$\epsilon = (\epsilon_d S_d + \epsilon_v S_v) / (S_d + S_v),$$

где ϵ_d и ϵ_v — диэлектрические проницаемости соответственно изоляции и воздуха (табл. 9-8);

S_d и S_v — площади поперечного сечения изоляции и воздуха.

Емкость кабелей равна $(40 \div 50) \cdot 10^{-9}$ Ф/км для городских телефонных кабелей и $(24 \div 27) \cdot 10^{-9}$ Ф/км для кабелей дальней связи.

Проводимость изоляции G . Так же, как активное сопротивление характеризует потери в металлических частях, параметр G характеризует потери энергии в изоляции кабеля.

Проводимость изоляции, См/км, определяется по формуле

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta.$$

При постоянном токе $G = 1/R_{из}$, где $R_{из}$ — сопротивление изоляции, обычно нормируемое значением 10^7 Ом·км.

Для симметричных кабелей $\operatorname{tg} \delta$ определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = (\epsilon_d \operatorname{tg} \delta_d S_d + \epsilon_v \operatorname{tg} \delta_v S_v) / (\epsilon_d S_d + \epsilon_v S_v),$$

Таблица 9-8

Эквивалентные значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ изоляции симметричных высокочастотных кабелей

Тип изоляции	ϵ	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ при частоте, кГц			
		10	100	250	550
Воздушно-бумажная	1,6—1,7	70	—	—	—
Кордельно-бумажная	1,3—1,4	55	113	160	280
Кордельно-стирофлексная	1,2—1,3	3	7	12	20
Полиэтиленовая (сплошная)	1,9—2,1	2	6	8	14
Пористо-полиэтиленовая	1,4—1,5	3	8	12	20
Баллонно-полиэтиленовая	1,2—1,3	2	6	8	12

где ϵ_d и ϵ_v — диэлектрическая проницаемость диэлектрика и воздуха;

$\operatorname{tg} \delta_d$ и $\operatorname{tg} \delta_v$ — тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика и воздуха (табл. 9-8);

S_d и S_v — площадь поперечного сечения диэлектрика и воздуха.

Вторичные параметры симметричных кабелей (α , β , z_v , v) рассчитываются по формулам, приведенным в § 9-2.

В. Методы защиты кабельных цепей от взаимных и внешних помех

Важнейшим условием осуществления многоканальной высокочастотной связи на большие расстояния является защита цепей от взаимных и внешних помех.

Основными способами защита кабельных цепей от взаимных и внешних влияний являются скрутка, экранирование и симметрирование цепей.

Скрутка цепей в группы и чповивы осуществляется на заводе в процессе изготовления кабеля.

Экранирование производится в заводских условиях путем наложения на отдельные кабельные группы или кабель в целом тонких металлических оболочек — экранов.

Симметрирование выполняется, как правило, в процессе монтажа и строительства кабельных линий. Оно состоит в компенсации электромагнитных связей путем скрещивания цепей и включения контуров противосвязи.

В симметричных кабелях используются все три указанных способа защиты от помех. В коаксиальных кабелях требуемый эффект достигается путем электромагнитного экранирования.

Ниже рассматриваются процессы скрутки и экранирования кабелей связи.

Г. Скрутка кабелей связи

Взаимное влияние между кабельными цепями и значения электромагнитных связей обусловлены взаимным расположением токопроводящих жил, зависящим от способа их скрутки, и неоднородностями в кабеле (отклонение диаметров жил, неоднородная изоляция и т. п.), практически не поддающимися предварительному учету.

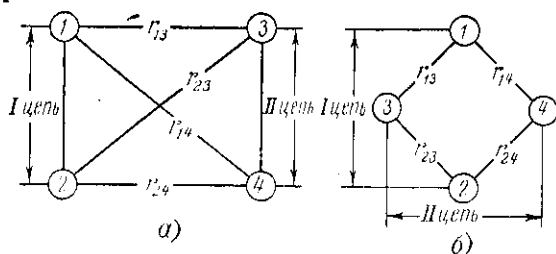


Рис. 9-21. Расположение влияющей и подверженной влиянию цепей в кабеле.

а — общий случай; б — звездная четверка.

Скрутка в группы и повивы уменьшает электромагнитные связи и взаимное влияние между кабельными цепями.

Различают внутригрупповые связи (связи между цепями одной и той же группы) и межгрупповые связи (связи между цепями различных групп).

Емкостная и индуктивная связи выражаются через расстояния между влияющей (1—2) и подверженной влиянию (3—4) цепями r_{14} , r_{13} , r_{24} , r_{23} (рис. 9-21).

Условием отсутствия емкостной и индуктивной связей является:

$$\ln (r_{14}r_{23}/r_{13}r_{24}) = 0.$$

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы соблюдалось следующее равенство:

$$r_{14}r_{23} = r_{13}r_{24} \text{ или } r_{14} = r_{13} = r_{23} = r_{24}.$$

Эти условия выполняются при звездной скрутке, когда влияющая цепь (жилы 1—2) и цепь, подверженная влиянию (жилы 3—4), расположены на взаимно перпендикулярных осях. При этой скрутке связи внутри группы обуславливаются лишь допусками и неоднородностями производственного характера.

Связи между звездными четверками зависят главным образом от соотношения шагов скрутки четверок.

При всех других разновидностях скрутки (ДП, ДЗ и П) расстояния между жилами цепей, влияющей и подверженной влиянию непрерывно изменяются вдоль кабеля и, чтобы влияние как внутри групп, так и между группами было минимальным, необходимо специальное согласование шагов скрутки.

Каждая кабельная цепь скручивается с иным шагом скрутки.

Наиболее приемлемым для групп является шаг скрутки примерно 100—300 мм, а для повивов 400—600 мм. Каждый последующий повив скручивается в обратную сторону по отношению к предыдущему. Подбор и согласование шагов скрутки различных цепей и кабельных групп производится по участкам, называемым секциями симметрии.

Секция симметрии связана с шагами скрутки следующим соотношением:

$$l_s = h_1 h_2 / D,$$

где D — общий наибольший делитель для h_1 и h_2 .

Например, если имеются две цепи, скрученные с шагом $h_1 = 40$ мм и $h_2 = 50$ мм, то общий наибольший делитель $D = 10$ и $l_s = 40 \cdot 50 / 10 = 200$ мм. Для исключения действия неуравновешенной длины и обеспечения требуемой компенсации связей необходимо, чтобы $l_s = (h_1 + h_2) / D$ было нечетным числом. В рассматриваемом примере $l_s = (40 + 50) / 10 = 9$.

Необходимо также соблюдать условие, по которому секция симметрии не должна превышать $1/8$ длины волны высшей передаваемой частоты тока ($l_s < \lambda/8$).

На рис. 9-22, где показан характер изменения расстояний между жилами двух цепей на отрезке кабеля длиной l_s , видно, что эти расстояния являются функцией длины кабеля l , причем функция $r_{14}(l)$, взятая на отрезке l , обнаруживает такие же изменения, как функция $r_{24}(l)$ на отрезке l' . Функция $r_{13}(l)$ в интервале l равна функции $r_{23}(l)$ в интервале l' . В середине секции защиты, в точке A , происходит взаимная перемена расстояний между жилами. Следовательно, на участке кабеля длиной l_s выполняется соотношение между функциями

$$r_{14}(l) r_{23}(l) = r_{24}(l) r_{13}(l),$$

т. е. $\ln(r_{14} r_{23} / r_{24} r_{13})$ и емкостные k - и магнитные m -связи отсутствуют, а мешающее влияние между цепями I и II сводится к минимуму.

Магнитное поле проникает и в отдаленные группы кабеля. Влияние электрического характера сказывается

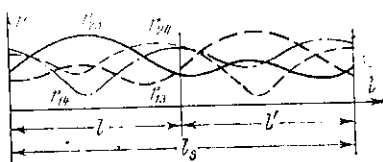


Рис. 9-22. Изменение расстояния между проводами двух цепей на отрезке кабеля l_s .

лишь между близлежащими группами, так как электрическая связь более отдаленных групп в силу электростатического экранирования ничтожно мала. Поэтому в низкочастотных кабелях, в которых взаимное влияние между цепями обусловлено практически емкостными связями, можно согласовывать шаги скрутки лишь для соседних групп кабеля. В этом случае достаточно принять два различных согласованных шага скрутки и чередовать их. Так, например, в повиве с десятью группами пять групп с нечетными номерами скручиваются с шагом h_1 , а остальные (с четными номерами) — с шагом h_2 . Для нечетного числа групп в повиве необходимо иметь еще третий согласованный шаг скрутки (для последней группы).

В кабелях дальней связи, предназначенных для высокочастотного уплотнения, большое значение имеют магнитные связи, поэтому необходимо производить согласование каждой группы кабеля с другой.

Расчет и согласование шагов скрутки производятся по формулам:

а) для цепей парной скрутки (П), расположенных в одном повиве,

$$h_1/h_2 = (2\omega \pm 1)/2v;$$

б) для цепей звездной скрутки (З), расположенных в одном повиве,

$$h_1/h_2 = (4\omega \pm 1)/4v,$$

где h_1 и h_2 — шаги скрутки согласуемых групп;

ω и v — целые числа.

Если необходимо согласовать шаги скрутки групп, расположенных в различных повивах кабеля, то, кроме приведенных выше соотношений, необходимо соблюдать также следующее дополнительное условие:

$$h_1 v = \frac{H_1 H_2}{H_1 \pm H_2} m,$$

где H_1 и H_2 — соответственно шаги скруток первого и второго повивов;

v и m — целые числа.

Указанные формулы позволяют согласовать шаги скрутки лишь двух групп (h_1 и h_2 или повивов H_1 и H_2). В действительности кабель состоит из большого числа групп, и все они должны быть взаимно согласованы и защищены от помех. Для этого задаются каким-либо шагом скрутки первой группы повива и, подставив раз-

личные значения ω , v , m , рассчитывают значительное число шагов и выбирают соответствующие шаги скруток для каждой группы.

Д. Экранирование кабелей связи

Наиболее радикальным способом защиты кабельных цепей от помех является их экранирование. При экранировании влияющие и подверженные влиянию цепи разделяются при помощи металлических перегородок (экранов). Кабельные экраны имеют цилиндрическую форму и чаще всего выполняются в виде спирально наложенной обмотки из плоских лент или в виде оплетки из тонких проволок. В качестве материала для экранов применяются главным образом сталь, медь или алюминий, а также биметаллические и многослойные комбинированные экраны, где указанные материалы чередуются в наивыгоднейшей комбинации.

Электромагнитные экраны являются составным элементом конструкции кабелей связи и особенно кабелей с пластмассовой оболочкой. Большинство радиочастотных кабелей антенного назначения снабжено экранами (оплетка из медных проволок), повышающими их помехозащищенность.

По принципу действия экраны подразделяют на электростатические, магнитостатические и электромагнитные.

Электростатические и магнитостатические экраны, действующие по принципу замыкания соответствующих полей, из-за повышенных электрической и магнитной проводимостей их материалов эффективны лишь в области низких частот. В области высоких частот требуемый эффект достигается за счет электромагнитных экранов.

Действие электромагнитных экранов основано на явлении отражения электромагнитных волн от поверхности экрана и затухания высокочастотной энергии в металлической толще экрана.

Затухание энергии в экране обусловлено тепловыми потерями на вихревые токи в металле. Чем выше частота и толще экран, тем больше затухание.

Отражение энергии связано с несоответствием волновых характеристик диэлектрика и металла. Чем больше различаются волновые сопротивления диэлектрика и металла, тем сильнее сказывается эффект экранирования за счет отражения. Это объяснение соответствует физи-

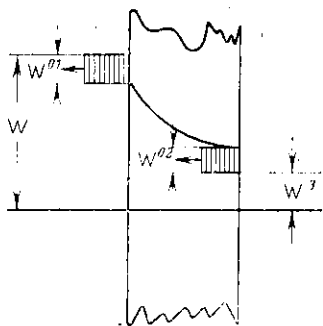


Рис. 9-23. Процесс прохождения электромагнитной энергии через экран.

W — поле помех; W^{01} и W^{02} — отраженные поля; W^3 — поле за экраном.

ческой сущности рассматриваемого процесса экранирования.

Электромагнитная энергия поля помех W , достигнув экрана (рис. 9-23), частично проходит через него, соответственно затухая при этом в толще экрана, а частично отражается от него: W^{01} (граница диэлектрик — экран). На второй границе (экран — диэлектрик) происходит вторичное отражение энергии W^{02} , и лишь остаток энергии проникает в заэкранированное пространство W^3 .

В результате прохождения через экран энергия уменьшается с W до W^3 . Здесь явление

отражения представлено упрощенно. В действительности имеет место процесс многократного отражения энергии от границ диэлектрик — экран — диэлектрик.

Действие экрана определяется коэффициентом экранирования S , представляющим собой отношение напряженности электромагнитного поля в какой-либо точке пространства при наличии экрана (E^3 и H^3) к напряженности поля в той же точке без экрана (E и H):

$$S = E^3/E = H^3/H.$$

Коэффициент экранирования S изменяется в пределах $1-0$, характеризуя в последнем случае наивысший экранирующий эффект.

В технике связи экранирующий эффект принято выражать, оценивая вносимое экраном затухание поля помех. В соответствии с этим эффективность экрана можно также выражать через затухание экранирования A_3 , дБ:

$$A_3 = 20 \lg \frac{1}{S} = 20 \lg \frac{E}{E^3} = 20 \lg \frac{H}{H^3}.$$

Чем меньше коэффициент экранирования S , тем больше затухание экранирования A_3 .

Формула для расчета электромагнитного экрана имеет вид:

$$S = S_n S_0 = \frac{1}{\operatorname{ch} \sqrt{j} kt} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_n}{Z_m} + \frac{Z_m}{Z_n} \right) \operatorname{th} \sqrt{j} kt},$$

где $S_n = \frac{1}{\operatorname{ch} \sqrt{j} kt}$ — экранирование поглощения;

$$S_0 = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_n}{Z_m} + \frac{Z_m}{Z_n} \right) \operatorname{th} \sqrt{j} kt} \text{ — экранирование от-}$$

ражения,

t — толщина экрана,

причем Z_n — волновое сопротивление диэлектрика;

Z_m — волновое сопротивление металла.

Соответственно затухание экранирования, характеризующее затухание, вносимое экраном и выраженное в децибелах, составляет:

$$A_s = 20 \lg \frac{1}{S} = 20 \lg \frac{1}{S_n S_0} = A_n + A_0,$$

где $A_n = 20 \lg \frac{1}{S_n} = 20 \lg (\operatorname{ch} \sqrt{j} kt)$ — затухание экранирования поглощения;

$A_0 = 20 \lg \frac{1}{S_0} = 20 \lg \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_n}{Z_m} + \frac{Z_m}{Z_n} \right) \operatorname{th} \sqrt{j} kt \right]$ — затухание экранирования отражения.

Экранирование поглощения A_n обусловлено тепловыми потерями на вихревые токи в экране. Чем выше частота f и больше толщина t экрана, тем больше эффект экранирования.

Из приведенных уравнений также следует, что чем больше магнитная проницаемость μ и проводимость σ экрана, тем лучше экранирующий эффект. Поэтому эффект экранирования магнитных экранов существенно больше, чем немагнитных.

Экранирующее действие экрана вследствие отражения A_0 предопределяется главным образом несоответствием волновых сопротивлений диэлектрика Z_n и металла Z_m , из которого изготовлен экран.

Наиболее эффективными являются составные многослойные экраны типа медь — сталь или медь — сталь — медь. Положительными особенностями таких экранов являются высокая экранирующая способность из-за дополнительных отражений энергии на стыках различных металлов и малые потери вследствие нахождения медного слоя вблизи источника энергии.

9-5. КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

А. Электрические процессы в коаксиальных кабелях связи

По сравнению с другими кабелями коаксиальные кабели наиболее полно отвечают требованиям высокочастотной связи и междугородного телевизионного вещания. По коаксиальному кабелю можно передавать очень широкий спектр частот при сравнительно малых потерях энергии; кабель этот хорошо защищен от влияния соседних цепей и внешних помех, и такая система связи в целом более экономична.

Взаимодействие электромагнитных полей внутреннего и внешнего проводников коаксиального кабеля таково, что его внешнее поле равно нулю. Результирующее магнитное поле коаксиального кабеля представлено на рис. 9-24, где показан характер изменения напряженностей магнитного поля H_φ^a и H_φ^b каждого проводника (a и b) в отдельности.

В металлической толще проводника магнитное поле H_φ^a возрастает, а вне его оно уменьшается по закону

$$H_\varphi^a = I/2\pi r,$$

где r — расстояние от центра проводника до точки, в которой определяется напряженность поля.

Внутри полого цилиндра магнитное поле H_φ^b отсутствует, а вне его оно выражается таким же уравнением, как и для сплошного проводника:

$$H_\varphi^b = I/2\pi r,$$

где r — также расстояние от центра полого проводника.

Токи в проводниках a и b равны по значению и обратны по знаку, поэтому магнитные поля внутреннего и внешнего проводников H_φ^a и H_φ^b в любой точке простран-

ства вне кабеля также равны по значению и направлены в противоположные стороны. Следовательно, результирующее магнитное поле вне кабеля равно:

$$H_{\varphi} = H_{\varphi}^a + H_{\varphi}^b = I/2\pi r + (-I/2\pi r) = 0.$$

Таким образом, линии магнитной индукции поля коаксиального кабеля располагаются в виде концентрических окружностей внутри него. Вне кабеля магнитное поле отсутствует.

Электрическое поле также замыкается внутри коаксиального кабеля по радиальным направлениям между проводниками a и b , и поэтому вне кабеля это поле равно нулю.

На рис. 9-25 показана конфигурация линий электрического и магнитного полей коаксиальной цепи; как видим, все поле сконцентрировано внутри кабеля и отсутствует вне его.

В коаксиальном кабеле из-за отсутствия внешнего поля потерь в окружающих его металлических массах нет, вся энергия распространяется только внутри кабеля и более эффективно передается по цепи.

Рассмотрим действие поверхностного эффекта и эффекта близости в коаксиальных кабелях и определим характер распределения плотности токов в проводниках при различных частотах.

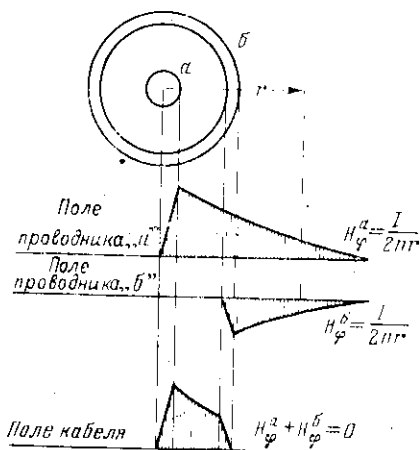


Рис. 9-24. Магнитное поле коаксиальной цепи.

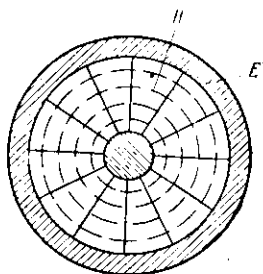


Рис. 9-25. Электромагнитное поле коаксиальной цепи.

Распределение плотности тока в проводнике *a* определяется действием поверхностного эффекта. Перераспределение плотности тока по сечению проводника обусловлено эффектом близости к нему другого проводника.

На рис. 9-26, *a* показано переменное магнитное поле, создаваемое током проводника *a*, которое наводит в металлической толще полого проводника *б* вихревые токи ($I_{в.т.}$). На внутренней поверхности проводника *б* вихревые токи совпадают по направлению с основным током ($I + I_{в.т.}$), а на наружной поверхности они движутся в противоположном основному току направлении ($I - I_{в.т.}$). В результате ток в проводнике *б* перераспределяется таким образом, что плотность его возрастает в направлении к внутренней поверхности. Следовательно, токи в проводниках *a* и *б* как бы смещаются и концентрируются на обращенных друг к другу поверхностях проводников (рис. 9-26, *б*). Чем выше частота тока, тем сильнее эффект смещения тока на внешнюю поверхность проводника *a* и внутреннюю поверхность проводника *б*. При очень высоких частотах энергия как бы вытесняется из металлической толщи проводников и сосредоточивается внутри коаксиального кабеля в диэлектрике, а проводники задают лишь направление распространению волн электромагнитной энергии.

Рассмотрим особенности электромагнитного влияния в коаксиальных цепях и их помехозащищенность от внешних и взаимных влияний.

В симметричных кабельных цепях взаимное влияние обусловлено наличием поперечных радиальных и танген-

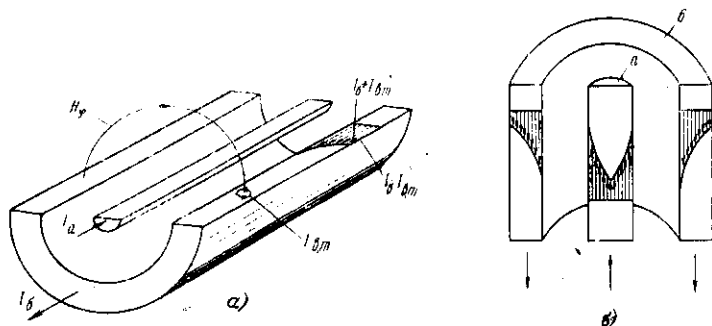


Рис. 9-26. Распределение плотности тока.

a — во внешнем проводе; *б* — концентрация токов на взаимообращенных поверхностях проводников кабеля.

циальных электромагнитных полей E_r , E_ϕ , H_r , H_ϕ , которые наводят в расположенной рядом цепи мешающие токи. Коаксиальная цепь не имеет внешних поперечных электромагнитных полей типа E_r , E_ϕ и H_r , H_ϕ (рис. 9-25, 9-26). Поэтому коаксиальная цепь II, расположенная рядом с коаксиальной цепью I (рис. 9-27), по которой передается энергия, в случае идеальной конструкции не испытывает воздействия поперечных электромагнитных полей радиального и тангенциального направлений.

В действительности расположенные рядом коаксиальные цепи все же влияют друг на друга и восприимчивы к посторонним источникам помех (радиостанции, линии электропередачи и т. п.).

Подверженность коаксиальных кабелей взаимным и внешним помехам обусловлена продольной составляющей электрического поля E_z , направленной вдоль оси коаксиального кабеля.

Влияние между двумя коаксиальными цепями I и II осуществляется через третью промежуточную цепь, образованную из внешних проводников этих цепей. При взаимном влиянии коаксиальных кабелей участвуют три цепи (рис. 9-27): I — влияющая цепь; II — цепь, подверженная влиянию; III — промежуточная цепь, состоящая из внешних проводников цепей I и II. Физическую сущность влияния между двумя коаксиальными кабелями можно объяснить следующим образом. По внешнему проводнику (цепь I) влияющего коаксиального кабеля проходит ток, в связи с чем на его внешней поверхности создается падение напряжения и действует продольная

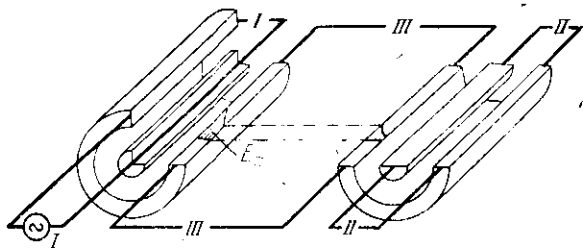


Рис. 9-27. Особенности электромагнитного влияния в коаксиальных цепях.

I — влияющая цепь; II — цепь, подверженная влиянию; III — промежуточная цепь.

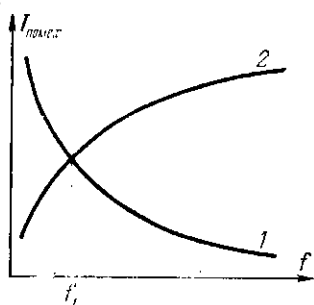


Рис. 9-28. Частотная зависимость влияния в кабелях. 1 — коаксиальном; 2 — симметричном.

составляющая электрического поля E_z . Она вызывает ток на поверхности внешнего проводника (цепь II) кабеля, подверженного влиянию. Таким образом, из двух внешних проводников кабелей создается промежуточная цепь тока III, в которой действует э. д. с., равная E_z , на внешней поверхности внешнего проводника влияющего кабеля. Ток, проходящий во внешнем проводнике подверженного влиянию кабеля, вызывает падение напряжения, создающее помехи в его цепи.

Частотная зависимость влияния в коаксиальных цепях имеет другой характер, чем в симметричных. В симметричных цепях с ростом частоты возрастает скорость изменения электромагнитных линий, и поэтому возрастает взаимное мешающее влияние между цепями. В коаксиальных цепях в отличие от симметричных с ростом частоты взаимное влияние уменьшается и улучшается защищенность от внешних помех (рис. 9-28). Из-за эффекта близости плотность тока во внешнем проводнике коаксиального кабеля увеличивается по направлению к его внутренней поверхности, причем с ростом частоты ток концентрируется на внутренней поверхности внешнего проводника, а на внешней поверхности плотность тока уменьшается.

Поэтому с увеличением частоты уменьшается напряженность поля E_z на внешней поверхности внешнего проводника и возрастает эффект самоэкранирования коаксиального кабеля.

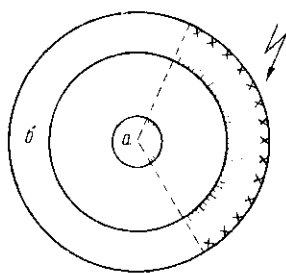
При очень высоких частотах, когда почти все электромагнитное поле сконцентрировано внутри коаксиального кабеля, напряженность поля E_z вне кабеля приближается к нулю, экранирующий эффект достигает максимума, и взаимное влияние между цепями теоретически отсутствует.

Мешающее электромагнитное поле высокой частоты, создаваемое соседними цепями передачи или другими источниками помех, действуя на внешнюю оболочку (проводник б) коаксиальной цепи, распространяется не

по всему сечению кабеля, а лишь по его наружной поверхности. Таким образом, внешний проводник коаксиального кабеля является обратным проводником цепи передачи (проводник b) и защищает (экранирует) передачу, ведущую по кабелю, от мешающих влияний. Основной ток передачи концентрируется на внутренней поверхности проводника b коаксиального кабеля, а ток помех — на наружной стороне проводника b (рис. 9-29).

Основной ток и ток помех проникают в толщу проводника лишь на глубину, определяемую коэффициентом вихревых токов. При этом чем выше частота, тем больше отдаляются друг от друга основной ток и ток помех, и, следовательно, кабель лучше защищен от действия посторонних помех. Таким образом, в отличие от всех других кабелей в коаксиальных кабелях при высоких частотах защита от помех обеспечивается их конструкцией.

Для защиты от помех в низкочастотном диапазоне (до 60—100 кГц) коаксиальный кабель экранируется стальными лентами толщиной 0,15—0,20 мм, накладываемыми в два слоя. В малогабаритных кабелях применяются также трехслойные экраны конструкции медь — сталь — медь толщиной соответственно 0,02—0,1—0,02 мм. Как и в симметричных цепях, влияние в коаксиальных цепях выражается и нормируется при помощи задания переходных затуханий A_0 и A_1 и защищенности A_3 . В качестве первичного параметра влияния оперируют с сопротивлением связи Z_{12} .



— — — — — Рабочий ток

x x x x x Ток помех

Рис. 9-29. Рабочий ток и ток помех в коаксиальной цепи.

Б. Расчет параметров передачи коаксиальных кабелей связи

Коаксиальные кабели обычно применяются в диапазоне частот свыше 60 кГц, для которого могут быть использованы следующие формулы.

Таблица 9-9

Значения $V\sqrt{\mu f/\sigma}$ для различных металлов

Металл	$V\sqrt{\mu f/\sigma}$	Металл	$V\sqrt{\mu f/\sigma}$
Медь	0,132	Сталь	3,72
Алюминий	0,171	Свинец	0,47

Активное сопротивление R , Ом/км, состоит из сопротивлений внутреннего проводника R_d и внешнего (полого) проводника R_D :

$$R = R_d + R_D = \left(\sqrt{\frac{\mu_d f}{\sigma_d}} \frac{2}{\sqrt{10}} \frac{1}{d} + \sqrt{\frac{\mu_D f}{\sigma_D}} \frac{2}{\sqrt{10}} \frac{1}{D} \right),$$

где σ_d , σ_D и μ_d , μ_D — электропроводимости и магнитные проницаемости внутреннего и внешнего проводников соответственно;

d — диаметр внутреннего проводника, мм;

D — внутренний диаметр внешнего проводника, мм; значения $V\sqrt{\mu f/\sigma}$ для различных металлов могут быть подсчитаны по данным табл. 9-9.

Применительно к коаксиальному кабелю с медными проводниками приведенная формула принимает вид:

$$R = R_d + R_D = 0,0835 \sqrt{f} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right).$$

При общепринятых габаритных соотношениях проводников коаксиального кабеля $D/d = 3,6$ около 80% сопротивления падает на внутренний проводник и лишь 20% — на внешний.

Индуктивность цепи L , Г/км, складывается из внутренней индуктивности проводников (L_d и L_D) и наружной междупроводниковой индуктивности L_n . Для кабелей с медными проводниками индуктивность L равна:

$$L = L_n + L_d + L_D = \left[2 \ln \frac{D}{d} + \frac{133,3}{Vf} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \right] \cdot 10^{-4}.$$

Значение внутренней индуктивности существенно меньше, чем наружной, причем с ростом частоты оно все

более уменьшается. Поэтому индуктивность коаксиальной цепи можно рассчитывать по формуле

$$L = L_{\text{н}} = 2 \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-4}.$$

Емкость C , Ф/км, определяется по формуле

$$C = \varepsilon \cdot 10^{-9} / 18 \ln \frac{D}{d},$$

где ε — эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Проводимость изоляции G , См/км, определяется по формуле

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс эквивалентного угла диэлектрических потерь.

Для коаксиального кабеля с наиболее распространенной прерывистой изоляцией шайбового типа эквивалентные значения ε и $\operatorname{tg} \delta$ можно определить по следующим формулам:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{в}} b + \varepsilon_{\text{д}} a}{a + b}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_{\text{д}} a \operatorname{tg} \delta_{\text{д}}}{\varepsilon_{\text{в}} b + \varepsilon_{\text{д}} a},$$

где b — расстояние между шайбами;
 a — толщина шайбы.

Расчет электрических характеристик комбинированной изоляции непрерывного типа производится путем замены действительной изоляции эквивалентной и приведения ее к одному из видов двухслойной изоляции. При этом имеется в виду представленная на рис. 9-30 комбинация слоев в радиальном направлении по r и в тангенциальном направлении по φ .

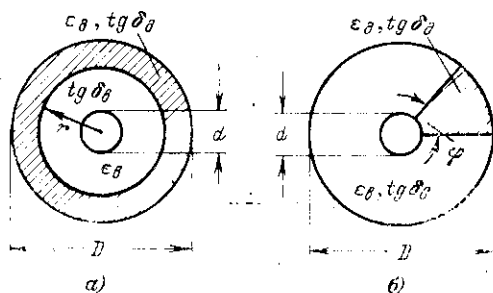


Рис. 9-30. К расчету двухслойной изоляции коаксиального кабеля. a — слои в радиальном направлении; b — слои в тангенциальном направлении.

Для радиально-комбинированной изоляции из воздуха и диэлектрика эквивалентные значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ равны:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_n \epsilon_d \ln \frac{D}{d}}{\epsilon_d \ln \frac{d_r}{d} + \epsilon_n \ln \frac{D}{d_r}}; \operatorname{tg} \delta_r = \frac{\operatorname{tg} \delta_d \epsilon_n \ln \frac{D}{d_r} + \operatorname{tg} \delta_n \epsilon_d \ln \frac{d_r}{d}}{\epsilon_d \ln \frac{d_r}{d} + \epsilon_n \ln \frac{D}{d_r}},$$

где d_r — диаметр разграничения различных диэлектрических сред.

Для двухслойной тангенциально-комбинированной изоляции из воздуха и диэлектрика эквивалентные значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ определяются из следующих выражений:

$$\epsilon_\varphi = \epsilon_n + (\epsilon_d - \epsilon_n) \frac{\varphi}{2\pi}; \operatorname{tg} \delta_\varphi = \frac{\epsilon_d \varphi}{2\pi \epsilon_n + (\epsilon_d - \epsilon_n) \varphi} \operatorname{tg} \delta_d,$$

где φ — угол, характеризующий долю диэлектрика в общем сечении кабеля.

Таблица 9-10

Эквивалентные значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$

Соотношения диаметров проводников	Изоляция		$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ при частоте, МГц		
			1	5	10
5/18	Спираль из полистирола	1,19	0,75	0,8	1,0
2,6/9,4	Шайбы из полиэтилена	1,10	0,5	0,5	0,6
2,6/9,4	Кордельно-полиэтиленовая	1,38	0,8	1,0	1,4
1,2/4,4	Бамботно-полиэтиленовая	1,25	0,5	0,6	0,6
1,2/5,3	Пористая полиэтиленовая	1,45	3	4	5

В табл. 9-10 приведены эквивалентные значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ для наиболее распространенных типов изоляции коаксиальных кабелей.

Вторичные параметры рассчитываются по формулам:

коэффициент затухания, дБ/км:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = 8,69 \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right);$$

коэффициент фазы $\beta = \omega \sqrt{LC}$, рад/км;

волновое сопротивление $z_n = \sqrt{L/C}$, Ом;

скорость распространения $v = 1/\sqrt{LC}$, км/с;

α — затухание, дБ/км.

Однако вторичные параметры коаксиальных кабелей целесообразно выражать непосредственно через размеры d и D и качество исходных материалов (ϵ и $\operatorname{tg} \delta$).

Коэффициент затухания α , дБ/км, находится после подстановки в формулу $\alpha = \alpha_m + \alpha_d$ первичных параметров и проведения соответствующих преобразований:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = \frac{6 \sqrt{f \epsilon} \left(1 + \frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-3}}{D \ln \frac{D}{d}} + 28,8 \pi f \sqrt{\epsilon} \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-6}.$$

Первое слагаемое учитывает затухание вследствие потерь в металле α_m , а второе — вследствие потерь в изоляции (диэлектрике) α_d . Потери в металле α_m изменяются пропорционально $\sqrt{f}$, а потери в диэлектрике α_d связаны с частотой линейным законом и с увеличением f возрастают значительно быстрее.

В спектре частот уплотнения коаксиальных кабелей (до 8 МГц), используемом на практике, при современных кабельных диэлектриках значение α_d незначительно и составляет 2—3%.

Коэффициент фазы β , рад/км, коаксиальной цепи определяется из уравнения

$$\beta = \omega \sqrt{LC}.$$

Коэффициент фазы, рад/км, можно выразить также через

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon} / c,$$

где c — скорость света, равная 300 000 км/с.

Скорость распространения v , км/с, электромагнитной энергии по коаксиальным цепям равна:

$$v = \omega / \beta = c / \sqrt{\epsilon}.$$

Скорость передачи энергии по коаксиальным кабелям выше, чем по кабелям других типов, и приближается к скорости распространения электромагнитных волн в воздухе ($c = 300\,000$ км/с).

Волновое сопротивление $z_{\text{в}}$ вычисляется по формуле

$$z_{\text{в}} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d}.$$

В кабелях со сплошной изоляцией из полиэтилена ($\epsilon=2,3$) $z_{\text{в}}=50$ Ом, а в кабелях с комбинированной изоляцией ($\epsilon=1,1$) волновое сопротивление составляет примерно $z_{\text{в}}=75$ Ом.

В. Наивыгоднейшее соотношение диаметров проводников коаксиального кабеля

При конструировании коаксиальных кабелей необходимо в первую очередь выбрать диаметры внутреннего и внешнего проводников и установить их соотношение при использовании различных кабельных материалов (медь, алюминий, свинец).

Затухание коаксиального кабеля, дБ/км, с современным высококачественным диэлектриком в практически используемом спектре частот (до 8—12 МГц) может быть определено по следующей формуле (без учета потерь в диэлектрике):

$$\alpha = \alpha_{\text{м}} = 8,69 \frac{R}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{6 \sqrt{f \epsilon} \left(1 + \frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-3}}{D \ln \frac{D}{d}}.$$

Выразим отношение D/d через X .

Из данного выражения следует, что с увеличением X его числитель растет линейно, а знаменатель возрастает по логарифмическому закону. Исследовав данную формулу на минимум затухания в зависимости от X ($\partial \alpha / \partial X = 0$), получим, что α минимально при соотношении $\ln(D/d) = 1 + d/D$. Таким образом, оптимальная конструкция кабеля будет иметь место при $X=3,6$. Это соотношение справедливо для кабелей с одинаковыми (медными) проводниками. Если проводники изготовлены из различных металлов, то минимальное затухание определяется из выражения

$$\ln \frac{D}{d} = 1 + \frac{d}{D} \sqrt{\frac{\sigma_d}{\sigma_D}},$$

где σ и σ — соответственно проводимости металлов внешнего и внутреннего проводников.

Оптимальные соотношения диаметров проводников
коаксиального кабеля

Материал внешнего проводника	Медь	Алюминий	Сталь	Свинец	Цинк
Соотношение диаметров проводников D/d	3,6	3,9	4,2	5,2	4,3

Оптимальные отношения D/d для различных материалов внешнего проводника приведены в табл. 9-11, причем во всех случаях принято, что внутренний проводник изготовлен из меди, а внешний из материала, указанного в табл. 9-11.

Нарушение оптимального соотношения в меньшую сторону связано с довольно резким возрастанием затухания (рис. 9-31).

Поэтому в ряде случаев целесообразно принять отношение D/d больше оптимального.

При конструировании коаксиального кабеля приходится также отступать от оптимального отношения D/d , если волновое сопротивление кабеля строго нормировано (например, $z_{\text{в}}=75$ Ом). В этом случае отношение D/d определяется по формуле

$$D/d = e^{\frac{z_n}{60} \sqrt{\epsilon}}$$

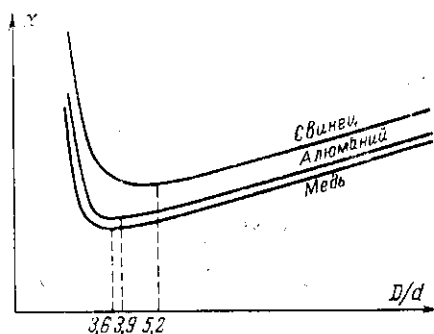


Рис. 9-31. Зависимость затухания коаксиальных кабелей с внешними проводниками из различных металлов от изменения отношения D/d .

Г. Конструктивные неоднородности в коаксиальных кабелях

При изготовлении кабеля может возникнуть деформация в виде эксцентриситета в расположении проводников, нарушается их форма, постоянство взаимного расположения и т. п. В результате изменяются параметры и кабель перестает быть однородным по длине.

Различают два вида неоднородностей: внутренние — в пределах строительной длины кабеля — и стыковые, обусловленные различием характеристик соединяемых строительных длин.

Стыковые неоднородности, как правило, превышают внутренние.

Неоднородность кабеля сказывается главным образом на его волновом сопротивлении, которое на участках неоднородностей отличается от номинального.

Неоднородности цепи учитываются через коэффициент отражения

$$\rho = (Z'_n - Z_n) / (Z'_n + Z_n) = \Delta Z_n / 2Z_n,$$

где Z_n и Z'_n — волновые сопротивления соседних однородных участков кабеля.

Соответственно отклонение волнового сопротивления определяется равенством

$$\Delta Z_n = 2Z_n \rho.$$

Волновое сопротивление кабеля зависит от трех факторов: ϵ , d и D . Если иметь в виду, что неоднородность параметров $\Delta\epsilon$, Δd и ΔD сравнительно невелика, отклонение волнового сопротивления от среднего значения (волнистость) может быть выражено уравнением

$$\Delta z_n = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \left(\frac{\Delta D}{D} - \frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta \epsilon}{2\epsilon} \ln \frac{D}{d} \right).$$

Наибольшее влияние на колебания волнового сопротивления оказывают отклонения размеров внешнего проводника и неоднородность изолирующих материалов, вызывающая колебания значений диэлектрической проницаемости. Внутренний проводник, представляющий собой сплошную проволоку, может быть изготовлен с большой точностью.

Реальный коаксиальный кабель можно рассматривать как неоднородную цепь, составленную из отдельных од-

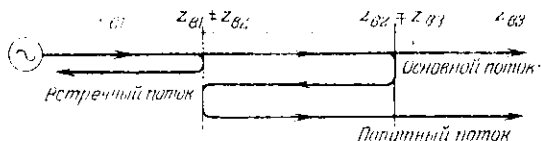


Рис. 9-32. Схема отраженных потоков в неоднородном коаксиальном кабеле.

нородных участков. Электромагнитная волна, распространяясь по такому кабелю и встречая на своем пути неоднородность, частично отражается от нее и возвращается к началу линии. При наличии нескольких неоднородных участков волна претерпевает серию частичных отражений и, циркулируя по линии, вызывает дополнительное затухание и искажение характеристик цепи.

Неоднородности в кабеле приводят к появлению двух дополнительных потоков энергии в цепи: встречного потока энергии, состоящего из суммы элементарных отраженных волн в местах неоднородностей и движущегося к началу цепи, и попутного потока энергии, возникающего из-за двойных отражений и движущегося к концу цепи совместно с основной энергией, передаваемой по кабелю (рис. 9-32).

Попутный поток возникает вследствие того, что первоначально отраженные волны, движущиеся к началу цепи, встречают места неоднородностей и частично отражаются, направляясь к концу линии.

Входное сопротивление кабеля $Z_{вх}$, периодически изменяется за счет встречного потока, и поэтому характеристика $Z_{вх}$ имеет волнообразный характер (рис. 9-33).

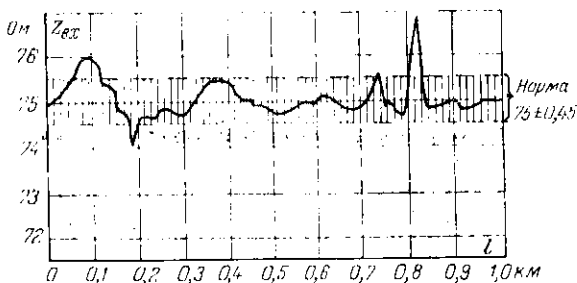


Рис. 9-33. Изменение входного сопротивления неоднородной коаксиальной цепи в зависимости от ее длины.

Это затрудняет согласование кабеля с аппаратурой на концах линии и приводит к искажениям в цепи передачи.

Попутный поток, распространяясь вместе с основным, искажает форму передаваемого сигнала и также создает помехи передаче. Особенно страдает от попутного потока качество телевизионной передачи, для которой фазовое соотношение передаваемых и принимаемых сигналов является решающим фактором. Для осуществления нормальной передачи телевизионных сигналов попутный поток должен составлять не более 1% основного.

Для обеспечения высококачественной телефонной передачи необходимо отсутствие амплитудных искажений в цепи передачи и в первую очередь постоянство $Z_{вх}$. Для обеспечения требуемого качества связи и телевизионной передачи по коаксиальному кабелю необходимо, чтобы отклонение волнового сопротивления $\Delta z_{в}$, обусловленное отражениями, не превышало 0,45 Ом, что соответствует коэффициенту отражения

$$\rho = \Delta z_{в} / 2z_{в} = 0,45(2 \cdot 75) = 0,003.$$

С целью повышения однородности электрических характеристик коаксиальных магистралей производится специальное группирование строительных длин кабелей перед их прокладкой с таким расчетом, чтобы отклонения волнового сопротивления двух смежных строительных длин не превышали 0,3 Ом. При этом строительные длины располагают так, чтобы волновые сопротивления постепенно нарастали от начала усилительного участка к его середине и спадали от середины к его концу.

Исследование неоднородностей коаксиальных кабелей производится преимущественно импульсным методом с использованием прибора большой чувствительности, который позволяет наблюдать на экране степень однородности волнового сопротивления кабеля по его длине и устанавливать место и характер повреждения.

Д. Переходное затухание в коаксиальных кабелях

Переходное затухание и защищенность (дБ) в коаксиальных цепях рассчитываются по формулам:

переходное затухание на ближнем конце

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{4Z_{12}Z_{11}\gamma}{Z_{12}^2(1 - e^{-2\gamma l})} \right|;$$

переходное затухание на дальнем конце

$$A_l = A_3 + \alpha l = 20 \lg \left| \frac{2Z_0 Z_3}{Z_{12}^2 l} \right| + \alpha l;$$

защищенность на дальнем конце

$$A_3 = 20 \lg \left| \frac{2Z_0 Z_3}{Z_{12}^2 l} \right|,$$

где Z_{12} — сопротивление связи, представляющее собой отношение напряжения, возбуждаемого на внешней поверхности внешнего проводника коаксиального кабеля E_z^c , к току, протекающему в коаксиальной цепи I (рис. 9-27):

$$Z_{12} = E_z^c / I.$$

С ростом частоты ток вытесняется внутрь внешнего проводника, уменьшаются напряжение E_z^c , сопротивление связи Z_{12} и соответственно снижаются мешающие влияния в коаксиальных цепях.

Сопротивление связи, Ом/км, определяется по следующей формуле:

$$Z_{12} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\sqrt{I} k}{\sigma} \frac{1}{\operatorname{sh} \sqrt{I} k t}.$$

Параметр Z_3 характеризует полное сопротивление третьей промежуточной цепи, состоящей из полных сопротивлений внешних проводников обеих коаксиальных пар и индуктивного сопротивления образованной из них цепи:

$$Z_3 = 2Z + j\omega L_3,$$

где Z — сопротивление внешнего проводника.

Из приведенных формул расчета A_0 , A_l , A_3 следует, что с увеличением частоты снижается сопротивление связи Z_{12} и возрастает переходное затухание между коаксиальными цепями. Поэтому если в симметричных цепях с ростом частоты помехи возрастают, то в коаксиальных цепях, наоборот, высокочастотные каналы находятся в более благоприятных условиях по сравнению с низкочастотными (рис. 9-28).

9-6. РАДИОЧАСТОТНЫЕ КАБЕЛИ

А. Расчет электрических параметров радиочастотных коаксиальных кабелей

Активное сопротивление. Приведенные выше формулы справедливы для расчета коаксиальных кабелей со сплошными проводниками. Радиочастотные кабели часто имеют гибкие многопроволочный внутренний проводник и внешний проводник в виде оплетки из тонких круглых или плоских проволок.

Активное сопротивление, Ом/км, радиочастотного коаксиального кабеля с медными проводниками определяется формулой

$$R = R_d + R_p = 0,0835 \sqrt{f} (k_c k_p / d + k_o k_p / D),$$

где k_c — фактор скрутки, учитывающий форму внутреннего проводника и представляющий собой отношение сопротивления гибкого многопроволочного проводника к сопротивлению сплошного проводника;

k_o — фактор оплетки, учитывающий форму внешнего проводника и представляющий собой отношение сопротивления внешнего проводника, выполненного в виде оплетки, к сопротивлению сплошной цилиндрической трубки;

k_p — коэффициент, учитывающий материал антикоррозионного покрытия проводников (олово, серебро и т. п.).

Коэффициенты k_c и k_o имеют значение больше единицы, так как сопротивление гибких проводников, скрученных из отдельных проволок или стренг, больше, чем сопротивление сплошных проводников.

Указанные коэффициенты трудно поддаются аналитическому расчету, и на практике часто пользуются опытными значениями k_c и k_o .

Фактор скрутки для наиболее распространенных конструкций гибких проводников приведен в табл. 9-12.

Коэффициент k_o зависит от плотности заполнения и конструкции оплетки, шага наложения ее и типа проволок, из которых она изготовлена. В практических условиях фактор оплетки принимается в пределах 1,7—4 в зависимости от конструкции оплетки и диаметра кабеля (табл. 9-13).

Таблица 9-12

Фактор скрутки k_c

Число проволок в пропалке	k_c
Сплошной проводник	1
Многопроволочный проводник:	
из 7 проволок	1,1—1,2
из 12 проволок	1,3—1,4
из 19 проволок	1,5—1,6

Коэффициент k_p учитывает изменение активного сопротивления за счет применения антикоррозионного покрытия. В ряде случаев с целью защиты от коррозии для изготовления внешнего и внутреннего проводников коаксиального кабеля применяется медная проволока, луженая оловом. Иногда применяется серебрение проволоки.

Покрытие серебром приводит к снижению сопротивления проводников, причем с ростом частоты эффект серебрения возрастает. Поэтому для коаксиальных кабелей, используемых в области сверхвысоких частот, целесообразно применять медные проводники с тонким покрытием серебром.

В табл. 9-14 приведены значения $\sqrt{R_{\text{медн}}/\rho}$, показывающие, во сколько раз изменяется активное сопротивление

Таблица 9-13

Фактор оплетки k_0

Диаметр кабеля по изоляции, мм	2	4	6	8	12	16	20	24	26
Значение k_0	1,7	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,2	3,6	4,0

Таблица 9-14

Значения параметра $\sqrt{R_{\text{медн}}/\rho}$

Металл	Медь	Алюминий	Свинец	Серебро
$\sqrt{R_{\text{медн}}/\rho}$	1	1,3	3,54	0,96

кабеля, если для изготовления проводников применяется не медь, а другой металл.

Индуктивность коаксиального кабеля рассчитывается по формуле, приведенной в § 9-5. Однако, учитывая спектр частот, передаваемый по радиокабелям, можно пренебречь внутренней индуктивностью и учитывать лишь межпроводниковую индуктивность, Г/км,

$$L = 2 \ln \frac{D}{d_0} \cdot 10^{-4},$$

где d_0 — эквивалентный диаметр внутреннего проводника, равный при семипроволочной скрутке $0,934d$.

Емкость, Ф/км, радиочастотного коаксиального кабеля определяется формулой

$$C = \epsilon \cdot 10^{-9} / 18 \ln \frac{D}{d_0}.$$

Проводимость изоляции, См/км, рассчитывается по формуле

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta.$$

Эквивалентные значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ для различных типов изоляции и метод их расчета приведены в § 9-5.

Коэффициент затухания, дБ/км, вычисляется по формуле

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = 8,69 \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right)$$

или непосредственно по габаритным размерам кабеля d и D и качеству исходных материалов:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = \frac{6 \sqrt{\epsilon} (1 + D/d) \cdot 10^{-3}}{D \ln \frac{D}{d}} + 28,8 f \pi \sqrt{\epsilon} \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3},$$

где первый член учитывает затухание за счет потерь в металле, а второй член — за счет потерь в изоляции.

Волновое сопротивление, Ом, определяется формулой

$$z_B = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d}.$$

Для радиочастотных коаксиальных кабелей стандартизованы три значения волновых сопротивлений: 50, 75 и 100 Ом.

Коэффициент фазы, рад/км, выражаемый через скорость света,

$$\beta = \omega \sqrt{LC} = \omega \sqrt{\epsilon} / c.$$

Скорость распространения энергии, км/с,

$$v = \omega / \beta = c / \sqrt{\epsilon}.$$

Коэффициент укорочения волны. В радиочастотной технике для оценки скорости распространения электромагнитной энергии широко используется коэффициент укорочения волны ξ . Этот коэффициент характеризует степень уменьшения скорости распространения энергии в кабеле по сравнению со скоростью в воздухе:

$$\xi = c / v = \sqrt{\epsilon},$$

т. е. чем больше диэлектрическая проницаемость изоляции, тем больше коэффициент укорочения. В кабелях со сплошной полиэтиленовой изоляцией $\epsilon = 2,3$, а коэффициент укорочения $\xi = 1,52$; следовательно, скорость распространения энергии в таком кабеле в 1,52 раза меньше, чем в воздухе.

Коэффициент укорочения волны может быть также определен по формуле

$$\xi = \lambda / \lambda_k,$$

где λ — длина волны в свободном пространстве;
 λ_k — длина волны в кабеле.

Б. Оптимальное соотношение диаметров проводников радиочастотного коаксиального кабеля

При конструировании кабелей стремятся получить оптимальную конструкцию, обеспечивающую наилучшие электрические характеристики при наименьшем расходе проводниковых и изоляционных материалов.

В коаксиальных кабелях дальней связи исходным критерием является достижение минимального затухания. В этом случае, как показано в § 9-5, п. В, наивыгод-

Оптимальные конструкции кабелей

D/d	$z_n = \sqrt{L/C}$	Достоинство конструкции
3,6	$76,6/\sqrt{\epsilon}$	Минимум затухания (наибольшая дальность связи)
2,72	$60/\sqrt{\epsilon}$	Максимум электрической прочности
1,65	$30/\sqrt{\epsilon}$	Максимум передаваемой мощности

нейшим отношением диаметров медных проводников является $D/d=3,6$. Там же показано, что при других металлах это отношение будет увеличиваться.

При конструировании коаксиальных кабелей радиочастотного назначения в ряде случаев определяющим требованием является не затухание, а максимум электрической прочности или передаваемой мощности. В этом случае оптимальная конструкция коаксиального кабеля будет при другом соотношении D и d .

В табл. 9-15 приведены оптимальные соотношения внешнего и внутреннего проводников коаксиального кабеля с учетом различных требований к кабелю и даны значения волнового сопротивления.

При конструировании коаксиальных кабелей и выборе соотношений диаметров проводников следует учитывать, какое из требований является определяющим: минимум затухания, максимум электрической прочности или максимум передаваемой мощности.

В. Тепловой расчет коаксиальных кабелей

Важнейшей характеристикой мощных радиочастотных кабелей является допустимая мощность высокочастотной энергии, которая может быть по ним передана при различных условиях эксплуатации.

Возможность передачи по кабелю максимальной мощности лимитируется его нагреванием и связана с процессами выделения тепла с поверхности оболочки кабеля. Поэтому при конструировании мощных радиочастотных кабелей в первую очередь производится их тепловой расчет. Максимальная мощность, которую

можно передавать по кабелю, определяется следующим образом:

$$P = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{ср}}}{(2\alpha_d + \alpha_{\text{из}}) S_{\text{из}} + 2\alpha (S_{\text{об}} + S_{\text{ср}})}$$

где $t_{\text{вн}}$ — максимально допустимая температура кабеля;

$t_{\text{ср}}$ — температура окружающего кабель воздуха;

α_d , $\alpha_{\text{из}}$, α — коэффициенты затухания внутреннего проводника, изоляции и общий коэффициент затухания кабеля;

$S_{\text{из}}$ — тепловое сопротивление изоляции, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}/\text{Вт}$:

$$S_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi} \ln \frac{D}{d};$$

$S_{\text{об}}$ — тепловое сопротивление защитной оболочки:

$$S_{\text{об}} = \frac{\sigma_{\text{об}}}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1};$$

$S_{\text{ср}}$ — тепловое сопротивление рассеянию тепла в окружающую среду (воздух):

$$S_{\text{ср}} = \frac{1}{\pi h D_2}; \quad h = 0,12 + 0,14 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2);$$

D_2 — наружный диаметр кабеля, м;

D_1 — диаметр под наружной оболочкой, м.

Из изложенного следует, что максимально допустимая мощность, которую можно передавать по кабелю, является функцией максимальной температуры, допустимой для кабеля выбираемой конструкции.

Для полиэтиленовой изоляции максимальная температура, которая может быть допущена в кабеле, составляет 85°C ; для фторопласта она равна 200°C .

При тепловых расчетах радиочастотных кабелей температура окружающего воздуха обычно принимается равной 40°C . Тогда допустимый температурный перепад в кабелях $t_{\text{вн}} - t_{\text{ср}}$ будет составлять при полиэтиленовой изоляции 45°C и при фторопластовой изоляции 160°C .

Если по условиям эксплуатации температура среды (воздуха), окружающей кабель, имеет меньшее значение, то температурный перепад в кабеле увеличивается, и кабель допускает передачу большей мощности.

Г. Расчет электрических параметров радиочастотных симметричных кабелей

Конструкции симметричных радиочастотных кабелей РД рассмотрены в гл. 1.

Электрические параметры симметричных экранированных кабелей РД определяются по следующим формулам:

1. Активное сопротивление для медных проводников и экрана, Ом/км:

$$R = 0,167 \sqrt{f} \left(\frac{k_c}{d} + \frac{4k_0}{D_0} \frac{a^2 D_0^2}{D_0^4 - a^4} \right),$$

где k_c и k_0 — факторы скрутки и оплетки;

a — расстояние между проводниками, мм;

d — диаметр проводника, мм;

D_0 — диаметр экрана, мм.

2. Индуктивность, Г/км:

$$L = 4 \ln \frac{2a}{d} \frac{D_0^2 - a^2}{D_0^2 + a^2} \cdot 10^{-4}.$$

3. Емкость, Ф/км:

$$C = \frac{\epsilon \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{2a}{d} \frac{D_0^2 - a^2}{D_0^2 + a^2}}.$$

4. Проводимость изоляции, См/км:

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta.$$

5. Волновое сопротивление, Ом:

$$z_0 = \frac{L}{C} = \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{2a}{d} \frac{D_0^2 - a^2}{D_0^2 + a^2}.$$

Таблица 9-16

Оптимальные конструкции разночастотных кабелей

Конструкция кабеля	a/D	D/d	a/d
Коаксиальный кабель	—	3,6	—
Неэкранированная пара	—	—	2,3
Экранированная пара	0,46	5,4	2,48
Пара с овальным (плоским) экраном	0,47	3,7	—
Экранированная четверка	0,49	6,8	3,33

Коэффициент затухания и коэффициент фазы рассчитываются по обычным формулам.

В табл. 9-16 приведены оптимальные размеры различных конструкций радиочастотных кабелей, которые соответствуют лучшим электрическим характеристикам и наименьшему расходу материалов на их изготовление.

Сравнивая симметричный кабель с коаксиальным, можно отметить, что при одинаковых наружных размерах коаксиальный кабель имеет в 1,5 раза меньшее затухание, чем симметричный.

Глава десятая

ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

10-1. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Испытания кабельных изделий разделяются на два основных вида: контрольные (приемо-сдаточные испытания) и типовые. Контрольным испытаниям подвергается каждая строительная длина кабеля. Таким образом проверяется отсутствие в кабелях тех или иных дефектов, которые могли возникнуть при их изготовлении.

Типовые испытания производятся на коротких отрезках кабеля, причем в этом случае кабельные изделия подвергаются более расширенным испытаниям, чем при контрольных испытаниях.

Кроме того, существуют углубленные стендовые испытания, которые обычно производятся при разработке новых конструкций кабельных изделий, при применении новых материалов или существенном изменении технологии.

Обмоточные, монтажные провода и другие кабельные изделия, которые подвергать отдельным испытаниям по всей длине практически невозможно, контролируются выборочно путем отбора определенной части изделий или отрезков их определенной длины для установленных испытаний.

В целях повышения надежности качества кабельных изделий, в особенности тех, которые нельзя испытать по всей длине, в отдельных случаях устанавливаются определенные технологические критерии и показатели, выполнение которых с высокой степенью достоверности может гарантировать и качество изготавливаемых изделий.

Основными документами, в которых приводятся технические требования к кабельным изделиям, в СССР являются государственные стандарты (ГОСТ), отраслевые стандарты (ОСТ) и межреспубликанские технические условия (МРТУ); ОСТ и МРТУ обычно утверждаются отраслевыми министерствами. На кабельные изделия эти документы утверждаются Министерством электротехнической промышленности.

В настоящее время ГОСТ, ОСТ и МРТУ не регламентируют порядок и количество образцов, подлежащих проверке отделом технического контроля предприятия-изготовителя. Количество их устанавливается самими предприятиями, которые должны гарантировать соответствие кабельных изделий ГОСТ, ОСТ или МРТУ. Количество проверяемых из партий изделий и порядок испытаний устанавливаются только для контрольных проверок (по требованию заказчиков).

Ниже приводятся только те методы испытаний кабельных изделий, которые не рассматриваются подробно в технической литературе.

10-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Измерения диаметра круглых металлических проводов, обмоточных и монтажных проводов обычно производятся с помощью микрометра соответствующей точности в двух взаимно перпендикулярных направлениях, причем за результат измерения принимается среднее арифметическое значение.

Существенное значение имеет определение наружного диаметра эмалированных проводов и толщины эмалевой изоляции. Эти измерения производятся в трех местах на расстоянии не менее 250 мм также в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и за результат принимается среднее арифметическое значение.

Иногда диаметр крупных кабельных изделий вычисляется по предварительно измеренному периметру. Для этого на практике применяется так называемая мерная лента. В любом месте на намотанной встык ленте делается отметка двух краев, между которыми после выпрямления ленты проводят прямую, равную длине окружности измеряемого изделия.

Аналогичным образом может определяться эквивалентный диаметр секторных и других фасонных жил.

Толщина изоляции таких жил определяется как половина разности эквивалентных диаметров по изоляции и голой жилы.

Надежность конструкции кабельного изделия и применяемой при его изготовлении технологии часто характеризует минимальная толщина пластмассовой и резиновой изоляции и металлических оболочек. Соответствующие измерения должны производиться с обоих концов строительной длины кабеля на предварительно выпрямленных образцах. Минимальная толщина определяется визуально по срезу, а потом измеряется микрометром с закругленной пяткой (губкой).

Для измерения диаметра изолируемой проволоки и контроля постоянства его по длине иногда применяются фотоэлектрические приборы, в которых при изменении диаметра изменяется освещенность рабочего фотосопротивления и в ранее настроенной (при номинальном диаметре проволоки) в равновесное состояние схеме появляется ток, пропорциональный изменению диаметра. С помощью усилителя этот ток приводит в действие регистрирующий прибор, показывающий отклонение диаметра от номинального значения.

Для проверки толщины эмалевой изоляции, а также толщины пластмассового шланга, наложенного на металлическую оболочку по всей длине провода или кабеля, существуют емкостные приборы, в которых кабельное изделие проходит между двумя электродами, с помощью которых можно контролировать толщину изоляции. Здесь также схема настраивается в равновесное состояние при номинальной толщине изоляции. Изменение толщины, а следовательно, и емкости контролируемого участка изоляции выводит схему из равновесия, что и регистрируется через усилитель соответствующим прибором.

10-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Определение сопротивления разрыву и относительного удлинения голой медной или алюминиевой проволоки производится на разрывной машине на образцах с расчетной длиной 200 мм.

Проверка свинцовых и алюминиевых оболочек на растяжение производится насадкой образца длиной 150 мм на конус с отношением диаметра основания

к высоте 1:5 и постепенным растягиванием оболочки до требуемого диаметра.

Предел прочности при разрыве, относительное и остаточное удлинения изоляционной резины на проводах при сечении токопроводящих жил до 10 мм² включительно и шланговой резины диаметром по шлангу до 4 мм определяют на образцах в виде трубок, снятых с кабеля или провода.

Для проводов и резиновых шлангов больших размеров из снятых трубок вырубается двусторонние лопаточки определенных размеров, которые подвергаются растягиванию до разрыва. Исследования механических характеристик вновь разрабатываемых изоляционных и шланговых резин и пластмасс обычно также производят на образцах в виде двусторонних лопаточек, вырубаемых из полотна исследуемых материалов.

Эластичность эмалевой изоляции у проводов диаметром до 0,35 мм включительно определяется растяжением провода до разрыва провода или определенного удлинения, а у проводов более крупных сечений — навиванием провода на стержень диаметром определенной кратности диаметра круглой проволоки; на проводах не должно быть растрескивания и отслаивания эмали. Примерная деформация (растяжение) эмалевой изоляции характеризуется уравнениями (1-4) и (1-5). Аналогичные испытания навиванием предусматриваются действующими стандартами и для обмоточных проводов с волокнистой и бумажной изоляцией. Эластичность изоляции обмоточных проводов прямоугольных сечений испытывается изгибанием провода в трех местах вокруг стержня установленного диаметра. Кабели с пропитанной бумажной изоляцией испытываются также навиванием на цилиндр определенного диаметра с последующим выпрямлением испытываемого образца. После такого трехкратного повторного испытания образец подвергается испытаниям повышенным напряжением.

Судовые кабели с резиновой изоляцией испытывают 10-кратным изгибанием в противоположные стороны на угол 180° на цилиндре диаметром, равным пятикратному диаметру кабеля.

Изоляцию телефонных и коммутаторных шнуров испытывают многократным изгибанием в противоположные стороны (для отдельных конструкций — с одновременным закручиванием их),

Механическую прочность различной изоляции обмоточных проводов испытывают на скребковом приборе с возвратно-поступательным движением стальной иглы диаметром 0,40—0,60 мм, которая с определенным усилием прижимается к испытываемому проводу.

Шланговые провода и кабели подвергаются дополнительным испытаниям шланговой оболочки и изоляции (испытания на раздавливание, стойкость к ударным нагрузкам и т. п.).

10-4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Герметичность свинцовых, алюминиевых и пластмассовых оболочек, когда это предусматривается ГОСТ или ТУ, проверяется заполнением их сжатым газом или сухим воздухом (давление соответственно 0,3 и 0,1 МПа). Водостойкость лаковых покрытий авиационных и автотракторных проводов проверяется погружением образцов в воду на 24 ч при 15—25 °С с последующей проверкой наличия следов воды на внутренней стороне оплетки. Аналогичным путем проверяется поведение этих покрытий в минеральном масле автол. Лакированная оплетка, кроме того, не должна набухать после этих испытаний.

Стойкость поливинилхлоридной изоляции к растрескиванию определяется путем намотки на стержень изолированных жил или проводов двумя—шестью витками (в зависимости от наружных диаметров образца и стержня) с плотным прилеганием витков друг к другу. Навитые образцы выдерживаются в течение 1 ч при 150 ± 2 °С, и после охлаждения до комнатной температуры у них проверяется наличие трещин, видимых без увеличительных приборов. Аналогичным образом определяется и стойкость поливинилхлоридных оболочек к растрескиванию, причем для выполнения испытаний из оболочки вырезаются полоски шириной 4 мм и наматываются в зависимости от толщины оболочки на стержни диаметром 5—15 мм.

Усадка поливинилхлоридной изоляции определяется после выдержки образцов проводов длиной 200 мм в течение 15 мин также при 150 ± 2 °С.

Испытание стойкости эмалевой изоляции к воздействию различных растворителей, минерального масла и воды производится путем выдержки образцов эмалиро-

важных проводов в течение 30 мин в бензоле и толуоле при $60 \pm 5^\circ\text{C}$, а также в кипящей дистиллированной воде, 24 ч в бензине при $25 \pm 10^\circ\text{C}$ и минеральном масле при $100 \pm 2,5^\circ\text{C}$, 5 мин в кипящей спирто-толуоловой смеси. После такой выдержки в жидкостях у эмалированной пленки проверяется механическая прочность истиранием стальной иглой или термопластичность продавливанием. Состояние эмалированной пленки после пребывания в кипящей спирто-толуоловой смеси или в воде проверяется внешним осмотром.

Холодостойкость кабельных изделий обычно проверяется изгибанием при комнатной температуре образцов через 30 мин после пребывания их при соответствующей температуре в холодильной камере. Эластичность изоляции некоторых изделий проверяется в самой холодильной камере.

Для определения длительной нагревостойкости эмалированных проводов МЭК и ранее существовавший ГОСТ 10519-63 рекомендуют методику, в основе которой лежит уравнение Аррениуса, выражающее зависимость логарифма скорости реакции k от обратного значения абсолютной температуры:

$$\ln k = A + B/T, \quad (10-1)$$

где A и B — постоянные.

При этом Аррениус связывал постоянную B с энергией активации вещества E уравнением

$$E = BR,$$

где R — газовая постоянная.

Из последнего уравнения следует, что скорость реакции изменяется более резко в тех случаях, когда энергия активации больше.

Сущность методики, рекомендуемой МЭК и ГОСТ 10519-72, сводится к циклическому воздействию повышенной температуры и электрического напряжения, сравнимого с испытательным. Испытание проводят до пробоя образцов минимум при трех температурах и по полученным данным строят графики зависимости логарифма срока службы от параметра $1/T$ с экстраполяцией в область рабочих температур. На рис. 10-1 приведены примерные прямые, соответствующие нагревостойкости эмалированных проводов различных классов. В ГОСТ 10519-72 предусмотрена оценка результатов после соот-

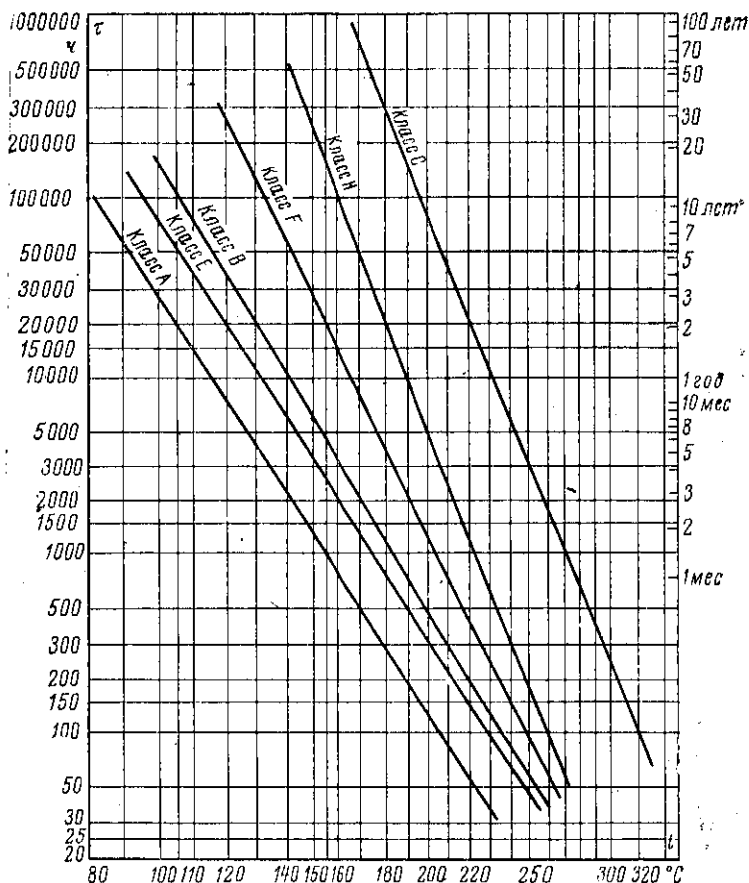


Рис. 10-1. Примерная зависимость срока службы эмалированных проводов различных классов по нагревостойкости от температуры.

ветствующих испытаний не менее 50 образцов, что затрудняет проведение таких испытаний и требует длительного времени.

В последнее время отдельными зарубежными странами предлагается сократить число таких образцов до 10—20 и считать за результат данные, соответствующие времени выдержки среднего (соответственно 5-го или 10-го образца). В этом случае время проведения испытаний значительно сокращается. Целесообразно полученные результаты сравнивать с результатами исследования ана-

логических образцов в части термопластичности, потери массы и толщины эмалистой изоляции при длительном пребывании в условиях повышенной температуры.

10-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ

Определение электрического сопротивления токопроводящих жил от 2 Ом и более может быть выполнено с помощью обычного одинарного моста. Здесь нужно только учитывать, что некоторую погрешность вносит сопротивление проводов, которые соединяют измеряемое сопротивление с мостом. Эту погрешность можно учесть, если отдельно измерить сопротивление подводящих проводов, соединив их накоротко перемычкой.

Существуют одинарные мосты с четырехзажимной схемой, в которых соединительные провода r_1 и r'_1 входят в плечи моста (рис. 10-2), и таким образом практически исключается их влияние на точность измерения. Таким мостом можно измерять сопротивление от 0,1 Ом и более.

Сопротивление менее 0,1 Ом на кабельных заводах обычно измеряется с помощью двойного моста, принци-

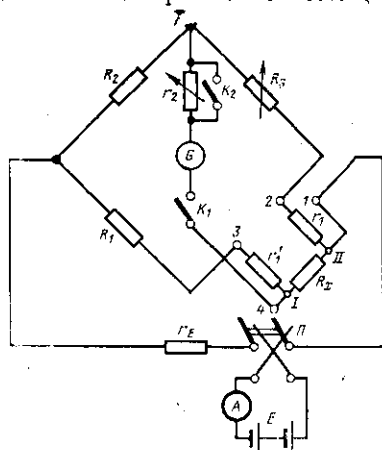


Рис. 10-2. Четырехзажимная схема измерения сопротивления одинарным мостом.

I, II — зажимы измеряемого сопротивления; $1-4$ — зажимы четырехзажимного моста; R_1 и R'_1 — сопротивления двух соединительных проводов, входящих в плечи одинарного моста при четырехзажимной схеме измерения.

пиальная схема которого приведена на рис. 10-3. В этой схеме R_x и R_N — измеряемое и эталонное сопротивления; R_1 и R'_1 — магазины сопротивлений, рычажные переключатели которых жестко попарно соединены друг с другом, так что R_1 и R'_1 всегда одинаковы. Штепсельные магазины R_2 и R'_2 также устанавливают равными друг другу. При равновесии моста ток через гальванометр не протекает и, следовательно, $I_1 = I'_1$ и $I_2 = I'_2$. Так как потенциалы точек C и D при равновесии одинаковы, а сопротивлением соединительных проводов $1, 2, 3$

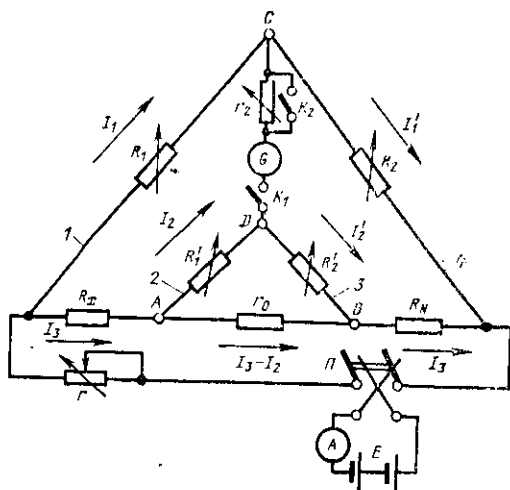


Рис. 10-3. Принципиальная схема измерения малых сопротивлений двойным мостом.

и 4 можно пренебречь в сравнении с сопротивлениями R_1 , R'_1 , R_2 и R'_2 , которые всегда не менее 10 Ом, мы можем написать следующие равенства:

$$I_3 R_x + I_2 R'_1 = I_1 R_1; \quad I_3 R_N + I'_2 R'_2 = I'_1 R_2;$$

$$(I_3 - I_2) r_0 = I_2 R'_1 + I'_2 R'_2.$$

Решая эти уравнения относительно R_x , имеем:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N + \frac{R'_2 r_0 (R_1/R_2 - R'_1/R'_2)}{R'_1 + R'_2 + r_0}. \quad (10-2)$$

Так как в двойном мосте $R_1/R_2 = R'_1/R'_2$, уравнение (10-2) упрощается и приводится к следующему виду:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N. \quad (10-3)$$

Таким образом, при применении двойного моста сопротивление провода r_0 , соединяющего образцовое и измеряемое сопротивления, не влияет заметно на результаты измерений. Если класс точности двойного моста 0,5 и выше в соответствии с ГОСТ 7229-67, значение r_0 не должно превышать суммы образцового и измеряемого сопротивлений и быть не более 0,3 этой суммы, если класс точности прибора ниже 0,5.

Существуют двойные мосты повышенной точности и чувствительности, в которых для этой цели применяется дифференциальный фотоэлемент. Он состоит по существу

из двух фотоэлементов, соединенных между собой разноименными полюсами и освещаемых пучком света, отражаемым от зеркала гальванометра. Схема будет в состоянии равновесия при одинаковой освещенности обоих фотоэлементов, когда э. д. с., возникающие в них, равны между собой. Если под действием напряжения рамка гальванометра вместе с зеркальцем начнет отклоняться и перераспределять световой поток, падающий на фотоэлементы, через микроамперметр, который при равновесии показывает нуль, потечет соответствующий ток.

10-6. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Измерения сопротивления изоляции кабельных изделий обычно выполняются на схемах путем сравнения отклонений светового указателя гальванометра при протекании токов поочередно через образцовое сопротивление и изоляцию кабельного изделия.

Эти измерения должны производиться при напряжении 90—500 В постоянного тока на схемах, обеспечивающих получение результатов с погрешностью не более 10% при измерении сопротивлений до 10^{10} Ом и не более 25% при больших сопротивлениях. Отсчеты обычно производятся через 1 мин с момента приложения напряжения. При повторных измерениях сопротивления изоляции токопроводящие жилы предварительно должны быть заземлены на время не менее 2 мин.

Принципиальная схема измерительной установки (рис. 10-4) состоит из батареи B , гальванометра G с шунтом $R_{ш}$, эталонного сопротивления R и сопротивления испытуемого изделия или образца R_x . Последнее может быть замкнуто накоротко при помощи ключа K_1 .

Измерения производятся следующим образом: включают батарею и, замыкая ключ K_1 , пропускают ток через эталонное сопротивление R . Допустим, что отклонение гальванометра при этом равно α_0 , а шунтовое число равно N_0 . Затем замыкают ключ K_1 и подбира-

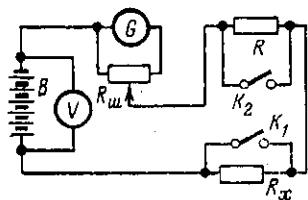


Рис. 10-4. Принципиальная схема измерения сопротивления изоляции методом сравнения.

ют шунтовое число N_x так, чтобы гальванометр дал достаточное отклонение α_x .

Ток в первом случае при замкнутом ключе K_1

$$I_a = A\alpha_a N_a.$$

Во втором случае, когда ключ K_1 разомкнут и ток проходит через изоляцию кабельного изделия или образца,

$$I_x = A\alpha_x N_x.$$

Токи, как известно, обратно пропорциональны сопротивлениям:

$$I_a/I_x = (R_x + R)/R = A\alpha_a N_a/A\alpha_x N_x,$$

откуда

$$R_x = (\alpha_a N_a / \alpha_x N_x - 1) R.$$

Если $\alpha_a N_a$ значительно больше $\alpha_x N_x$ ($R_x > 1 \cdot 10^8$, Ом), можно считать, что

$$R_x = \frac{\alpha_a N_a}{\alpha_x N_x} R. \quad (10-4)$$

Отсчет показаний гальванометра обычно производится через 1 мин после включения тока. Следует учитывать, что в результате приложения к кабелю напряжения постоянного тока, помимо тока проводимости, в кабеле возникают зарядный ток и ток абсорбции. Значение зарядного тока изменяется в соответствии с уравнением

$$I_c = \frac{U}{R} e^{-t/RC}, \quad (10-5)$$

где R — сопротивление, включенное последовательно с испытуемым кабелем, Ом;

C — емкость кабеля, Ф;

U — напряжение, В;

t — время, с.

Обычно зарядный ток очень быстро снижается, и лишь в отдельных случаях при больших мощностях и при измерениях сразу после включения напряжения этот ток может несколько искажать результаты измерений.

Ток абсорбции спадает значительно медленнее, чем зарядный ток, и поэтому при измерении через 1 мин после приложения напряжения учитывается и некоторая часть тока абсорбции. Быстрота спада тока абсорбции может, в частности, характеризовать качество сушки бумажной изоляции.

Относительное сопротивление изоляции эмалированных проводов обычно определяется между двумя слоями

намотанного провода, при этом длина провода определяется по формуле

$$L = \pi(D + d)n, \quad (10-6)$$

где D — диаметр стержня, на который производится намотка;

d — диаметр эмалированного провода;

n — число витков верхнего слоя, намотанных на нижний слой.

Если измерение сопротивления изоляции у проводов и кабелей с резиновой или пластмассовой изоляцией производится после пребывания изделий в течение определенного времени в воде, необходимо предусмотреть, чтобы концы кабельного изделия выступали из воды на длину не менее 100 мм.

При измерениях в условиях повышенной влажности концы изделия должны быть выведены из влагостата так же, как и при испытании в воде.

При измерении очень большого сопротивления изоляции часто встречаются затруднения из-за недостаточной чувствительности схем сравнения. В этом случае более удобным является применение тераомметров.

Принцип работы последних заключается в том, что измеряемое сопротивление R_x включается последовательно с образцовым сопротивлением R_0 .

Таким образом, образуется делитель напряжения, от нижней ступени которого напряжение U_0 подается на двухкаскадный усилитель постоянного тока, при помощи которого определяется измеряемое сопротивление (рис. 10-5). Обычно тераомметры являются многопредельными приборами, причем изменение предела измерения осуществляется изменением образцового сопротивления с помощью переключателя. В качестве примера ука-

жем, что тераомметр типа Е6-3 имеет девять образцовых сопротивлений от 10^3 до 10^9 Ом, что обеспечивает измерение сопротивлений от 2 Ом до 100 ТОм ($1 \text{ ТОм} = 10^{12} \text{ Ом}$).

Для измерения емкости методом сравнения берется эталонный конденсатор (емкостью 0,1—

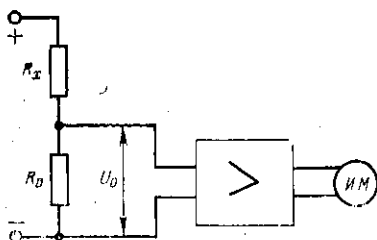


Рис. 10-5. Принципиальная схема измерения сопротивления изоляции с помощью тераомметра.

0,5 мкФ) и заряжается в течение 0,5—1 мин постоянным током. После этого производится разряд конденсатора на гальванометр (с шунтом) и отмечается максимальное отклонение α_0 ; такой же процедуре подвергается испытуемое кабельное изделие, и если принять, что напряжение батареи при обоих измерениях неизменно, то отклонение гальванометра прямо пропорционально измеряемым емкостям:

$$C_x/C_0 = \alpha_x N_x / \alpha_0 N_0,$$

откуда

$$C_x = C_0 \frac{\alpha_x N_x}{\alpha_0 N_0}, \quad (10-7)$$

где C_x — емкость кабельного изделия;

C_0 — емкость эталонного конденсатора;

α_0 и α_x — отклонения гальванометра при включении эталонного конденсатора и кабельного изделия;

N_0 и N_x — шунтовые числа при измерении емкости эталонного конденсатора и изделия.

Емкость единицы длины изделия в этом случае определяется с помощью уравнения

$$C_x = C_0 \frac{\alpha_x N_x}{\alpha_0 N_0} \frac{1}{l},$$

где l — длина испытываемого кабельного изделия.

Измерения емкости кабельных изделий можно производить и на переменном токе с помощью мостовых схем. Следует только иметь в виду, что при измерениях различными методами возможно значительное расхождение получаемых результатов, в частности, за счет явления абсорбции зарядов, которое в кабелях с пропитанной бумажной изоляцией особенно сказывается при повышенных температурах.

10-7. ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ИЗОЛЯЦИИ

Измерение диэлектрических потерь представляет собой один из важнейших видов испытания многих кабельных изделий. На кабельных заводах для этой цели часто применяют мост типа МДП (рис. 10-6).

Сопротивление R_3 и конденсатор C_4 регулируются таким образом, чтобы гальванометр не имел отклонений.

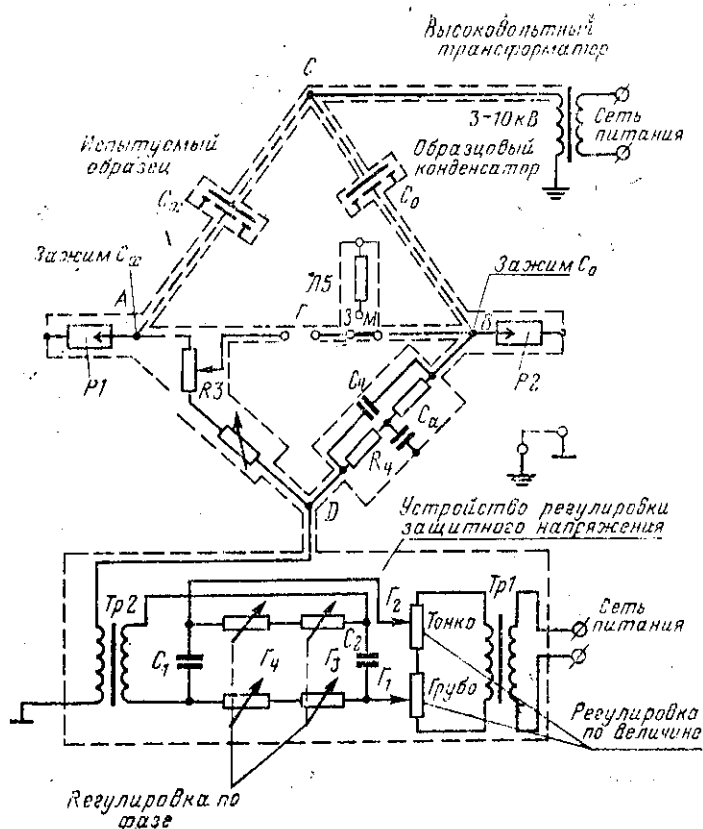


Рис. 10-6. Принципиальная схема моста для измерения диэлектрических потерь в изоляции с устройством регулировки защитного напряжения.

В этом случае, как известно, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь определяются по уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= 2\pi f C_4 R_4; \\ C_x &= C_0 \frac{R_4}{R_s} \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \end{aligned} \right\} \quad (10-8)$$

где f — частота переменного тока, питающего схему.

Так как обычно $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, то $1 + \operatorname{tg}^2 \delta \approx 1$ и, следовательно, $C_x = \frac{R_4}{R_s} C_0$. Постоянное сопротивление R_s вы-

бирается равным $10\,000/\pi$ Ом. В этом случае при частоте 50 Гц

$$\operatorname{tg} \delta = C_4.$$

Если измерение производилось при частоте f' , несколько отличной от 50 Гц,

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{f'}{50} C_4.$$

В этих уравнениях C_4 выражено в микрофарадах.

Нулевым указателем моста является вибрационный гальванометр типа М501. Диапазон резонансных частот такого гальванометра находится в пределах 30—100 Гц, постоянная гальванометра по току при частоте 50 Гц не более $10 \cdot 10^{-8}$ А/мм и по напряжению не более $1,5 \times 10^{-5}$ В/мм, активное сопротивление около 40 Ом.

Когда измерение $\operatorname{tg} \delta$ производится на небольших отрезках кабеля или на образцах изоляционных материалов, ввиду их малой емкости необходимо применение электронных усилителей. Для этой цели применяется усилитель типа Ф-50-1 с кратностью усиления около 60 и с входным сопротивлением около 800 Ом.

Между средней точкой сопротивления R_4 включен конденсатор C_a в основном для компенсации начальной емкости магазина C_4 .

Для устранения влияния паразитных емкостей применяется так называемое защитное напряжение, регулируемое по значению и по фазе. Это напряжение должно быть равным падению напряжения в сопротивлении R_3 и быть противоположным по фазе. В этом случае точки А и В имеют потенциал земли, и таким образом исключаются возможные утечки в R_3 и R_4 , а также на экран в подводящих проводах. Это симметрирование моста целесообразно производить при каждом измерении тангенса угла диэлектрических потерь.

Уравновешивание моста производится путем многократного поочередного регулирования элементов защитного напряжения, для чего индикатор равновесия моста включают то в диагональ моста (клемма М), то между экраном и диагональю (клемма З). Равновесие моста будет достигнуто при отсутствии тока при обоих включениях.

В настоящее время вместо мостов типа МДП выпускаются более усовершенствованные мосты типа Р-525.

Обычно эти мосты предназначены для измерений при напряжениях 3—10 кВ, но в случае необходимости рабочее напряжение может быть повышено (с применением соответствующего образцового конденсатора и повысительного трансформатора). Принципиальная электрическая схема моста типа Р-525 и устройства защитного напряжения приведены на рис. 10-7. Последнее состоит из фазовращающегося моста с активными сопротивлениями и емкостями в противоположных плечах. Связь со схемой основного моста осуществляется через трансформатор *Tr2*. В момент равновесия моста его диагональ с указателем находится под потенциалом земли без прямого с ней соединения, что должно исключить появление токов в цепи указателя равновесия.

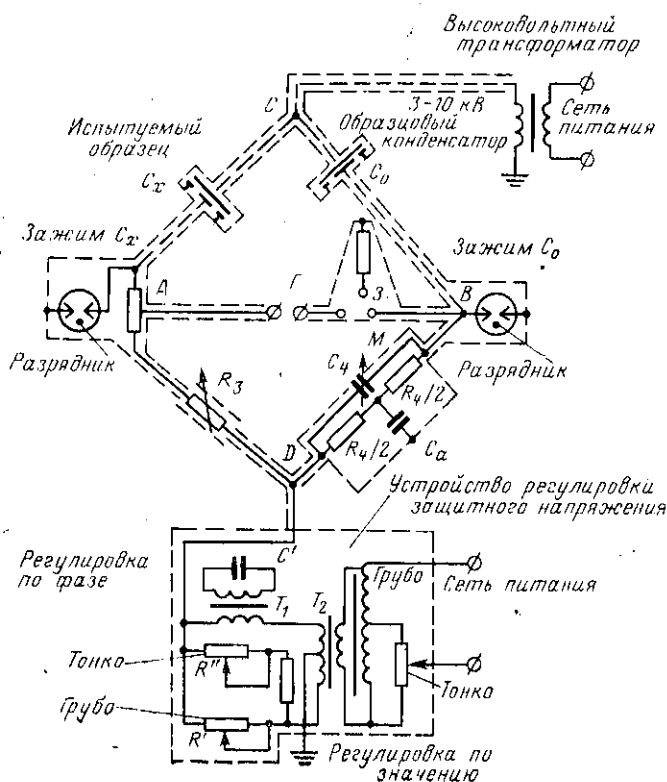


Рис. 10-7. Принципиальная схема моста Р-525,
 Γ — нулевой прибор (вибрационный гальванометр);

Описанные схемы применяются для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости у образцов различных изоляционных материалов и у кабелей с незаземленной свинцовой или алюминиевой оболочкой. Если металлическая оболочка заземлена, то измерение можно производить по схеме, приведенной на рис. 10-8. Особенностью этой схемы является не заземление второго конца высоковольтной обмотки трансформатора, а присоединение его к точке D . Кроме того, благодаря заземлению точка B имеет незначительный потенциал по отношению к земле, что позволяет производить необходимые измерения.

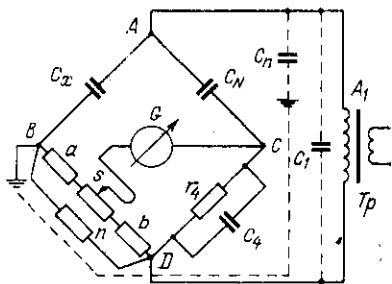


Рис. 10-8. Схема измерения диэлектрических потерь в изоляции силового кабеля при заземленной металлической оболочке.

10-8. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Испытание напряжением кабелей и проводов на номинальное напряжение до 35 кВ включительно должно производиться на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 10-9. Следует учитывать, что для кабельных изделий на номинальное напряжение до 35 кВ включительно испытательное напряжение в соответствии с действующими нормами должно быть измерено с погрешностью не более 1,5%. При испытании кабельных изделий на более высокое номинальное напряжение погрешность должна быть не более $\pm 3\%$.

Схемы присоединения кабелей и проводов к трансформатору высокого напряжения приведены в табл. 10-1. Для кабельных изделий, испытываемых в воздухе, рекомендуется температура помещения $20 \pm 15^\circ\text{C}$ с относительной влажностью воздуха не более 90%.

При определении кратковременной электрической прочности изоляции кабельных изделий напряжение должно плавно повышаться до пробоя его скоростью не более 2 кВ/с, или за время не менее 60 с. При длительных испытаниях первоначально приложенное напряже-

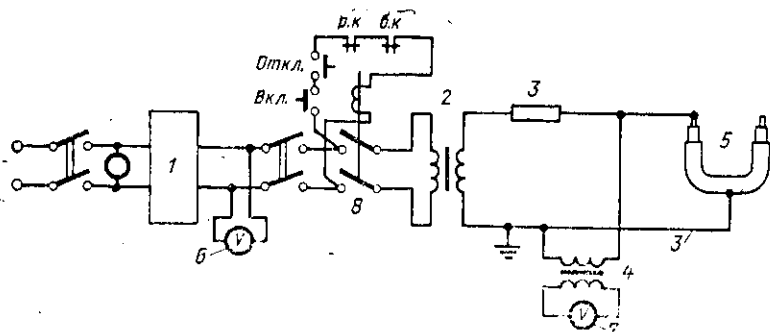


Рис. 10-9. Принципиальная схема установки для испытания напряжением силовых кабелей на номинальное напряжение до 35 кВ включительно.

1 — регулирующее устройство; 2 — повысительный трансформатор; 3 — защитное сопротивление; 4 — измерительный трансформатор напряжения; 5 — испытуемый кабель; 6 — вольтметр, установленный после регулирующего устройства; 7 — вольтметр класса точности 0,5 во вторичной цепи измерительного трансформатора; 8 — выключатель с максимальным автоматом и с блокировкой дверей испытательного поля.

ние должно быть не более 40% испытательного. Повышение напряжения до испытательного должно производиться плавно при любой скорости. При испытании кабелей высокого напряжения в больших строительных длинах требуются испытательные установки большой мощности, так как емкостный ток в этом случае получается значительным. Для испытания кабелей 35 кВ трансформатор должен быть мощностью около 700 кВ·А. При испытании кабелей напряжением 110 и 220 кВ мощность испытательных трансформаторов может составлять несколько тысяч киловольт-ампер. Для уменьшения мощности трансформатора и регулирующего устройства емкостный ток компенсируют индуктивным током от дроссельных катушек, присоединяемых параллельно с испытуемым кабелем. При равенстве I_C и I_L трансформатор должен быть нагружен только током от электрических потерь.

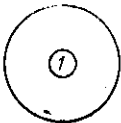
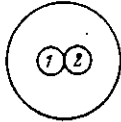
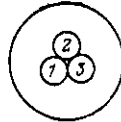
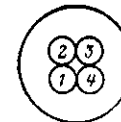
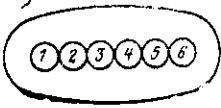
Равенство I_C и I_L будет при условии

$$U\omega C = U/\omega L$$

или

$$L = \frac{1}{\omega C}$$

Схемы испытания кабельных изделий напряжением

Количество жил кабельного изде- лия	Схема кабельного изделия	Схема испытания	
		Кабельные изделия, не имеющие общей металлической оболоч- ки, экрана, брони и не снабженные спе- циальным электродом	Кабельные изделия, имеющие общую ме- таллическую оболочку, экран, броню или снабжение специаль- ным электродом
1		—	1 против специально установленного элек- трода
2		1 против 2	а) 1 против 2+0 б) 2 против 1+0
3		а) 1 против 2+3 б) 2 против 1+3	а) 1 против 2+3+0 б) 2 против 1+3+0 в) 3 против 1+2+0 или а) 1+2 против 3+0 б) 1+3 против 2+0
4		а) 1 против 2+3+4 б) 2 против 1+3+4 в) 3 против 1+2+4 или а) 1+2 против 3+4 б) 1+4 против 2+3	а) 1 против 2+3+4+0 б) 2 против 1+3+4+0 в) 3 против 1+2+4+0 г) 4 против 1+2+3+0 или а) 1+2 против 3+4+0 б) 1+4 против 2+3+0 в) 1+2+3+4 против 0
5 и более		Все нечетные жилы против всех четных жил	а) Все нечетные жи- лы против всех чет- ных жил, соединенных с общей металлической оболочкой, экраном, броней или специаль- ным электродом; б) Все четные жилы против всех нечетных жил, соединенных с общей металлической оболочкой, экраном, броней или специаль- ным электродом

Если выразить C в микрофарадах, а L в генри, получаем:

$$L = 10^6 / 314^2 C \approx 10 / C.$$

Дроссели обычно выполняются на напряжение 50—100 кВ, и для получения индуктивности требуемой мощности и напряжения отдельные дроссели на изолирующих подставках собирают в группы путем их параллельного и последовательного соединения.

Для испытания повышенным напряжением силовых кабелей напряжением 110—500 кВ применяются специальные установки высокого напряжения в виде каскадов трансформаторов. Для этих испытаний существенно важными являются форма синусоиды напряжения и ее стабильность. Поэтому питание установки производится от специального двигатель-генератора, что одновременно обеспечивает надежность проводимых испытаний.

Для этой цели применяются резонансные трансформаторы, в которых вторичную обмотку трансформатора присоединяют к дросселю с регулируемой индуктивностью. Последнюю устанавливают так, чтобы имел место резонанс напряжений в схеме: емкость кабеля — суммарная индуктивность резонансного трансформатора. В этом случае мощность питающего трансформатора и регулирующего устройства резко снижается, а при пробое изоляции установка мгновенно выходит из резонанса, благодаря чему разрушения в изоляции оказываются небольшими, что облегчает изучение механизма пробоя изоляции.

Высоковольтные кабели подвергаются также импульсным испытаниям с помощью генераторов импульсных напряжений (сокращенно ГИН). В СССР в качестве стандартной принята волна, фронт которой равен 1,5 мкс (с допуском $\pm 15\%$) и длина 40 мкс (волна 1,5/40). Пробивные импульсные напряжения при отрицательной полярности на жиле на 10—15% ниже, чем при положительной полярности. При нагреве кабеля и снижении вязкости пропитывающей массы импульсная прочность изоляции снижается. При определении импульсной прочности образец длиной не менее 5 м обычно подвергается воздействию 50 импульсов при различных соединениях и напряжениях. В табл. 10-2 приведены уровни импульсной прочности кабелей высокого напряжения, рекомендуемые МЭК.

Рекомендуемые МЭК уровни импульсной прочности кабелей высокого напряжения

Максимально допустимое напряжение сети, кВ	Уровни импульсной прочности, кВ		
	Минимально допустимый уровень, когда кабель не подвергается атмосферным перенапряжениям	Кабель непосредственно соединен с воздушной линией	
		с уменьшенной изоляцией воздушной линии	с полной изоляцией воздушной линии
123	380	450	550
145	450	550	650
170	550	650	750
245	825	900	1050
300	1050	1175	—
420	1300	1550; 1425	1675
525	1425	1675; 1550	1800

После прокладки силовые кабели подвергаются испытаниям напряжением постоянного тока. В частности, силовые кабели на напряжения 1—10 и 20—35 кВ должны выдерживать в течение 10 мин соответственно напряжения $6U_n$ и $5U_n$ для каждого способа присоединения (см. табл. 10-1). Примерное испытательное напряжение постоянного тока для кабелей напряжением 110—220 кВ

$$U_{исп} = 6U_{\phi} + 40 \text{ кВ,}$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение.

Длительность приложения напряжения составляет 15 мин.

Изолированные жилы кабелей и проводов с пластмассовой и резиновой изоляцией подвергаются испытанию напряжением при пребывании в воде или пропускаются со скоростью не более 210 м/мин через аппарат сухого испытания; при этом токопроводящая жила заземляется, а высокое напряжение подводится к электроду из металлических шариков, располагаемых в электроде так, что испытываемый провод касается шариков по всей поверхности изоляции.

Круглые провода с эмалевой и волокнистой изоляцией скручиваются на длине 125 мм с определенным числом круток и подвергаются потом испытанию напряжением при плавном подъеме последнего до пробоя.

Прямоугольные провода испытываются напряжением в заземленной металлической ванне с металлическими шариками диаметром 2—3 мм.

Эмалированные провода диаметром 0,02—0,04 мм испытываются напряжением при навивании образцов в виде двух восьмерок вокруг цилиндров диаметром 30 мм, причем расстояние между осями этих цилиндров обычно составляет 55 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабели и провода, т. I, II и III (под общей редакцией В. А. Привезенцева, Н. И. Белоруссова и др.), М., Госэнергоиздат, 1959—1964. 558, 527 и 470 с.
2. Основы кабельной техники. Под общей редакцией В. А. Привезенцева. М., «Энергия», 1967. Авт.: В. А. Привезенцев, И. И. Гроднев, С. Д. Холодный, И. В. Рязанов.
3. Оборудование для кабельной промышленности. Каталоги под редакцией И. В. Каптелова и В. Х. Камбурова, т. II и III. Информ-стандартэлектро, 1965 и 1968, 88 и 58 с.
4. Сорочкин А. Е., Чудаков П. И., Шарле Д. Л. Сборник задач по расчету и конструированию кабелей и проводов. М., Госэнергоиздат, 1963. 96 с.
5. Вопросы высоковольтной кабельной техники на XX сессии Международной конференции по крупным энергосистемам, ВНИИЭМ МЭИ, 1965. 268 с.
6. Третьяков В. М. Исследование технологического процесса сушки кабелей высокого напряжения (канд. диссертация). МЭИ, 1968.
7. Белоруссов Н. И., Гроднев И. И. Радиочастотные кабели. М., «Энергия», 1973. 327 с.
8. Белоруссов Н. И. Электрические кабели и провода. М., «Энергия», 1971. 512 с.
9. Гроднев И. И. Кабели связи. М., «Энергия», 1965. 279 с.
10. Майофис И. М. Химия диэлектриков. М., «Высшая школа», 1970. 332 с.
11. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М., «Энергия», 1973. 326 с.
12. Привезенцев В. А. Производство силовых кабелей. М., Госэнергоиздат, 1956. 486 с.
13. Привезенцев В. А., Пешков И. Б. Обмоточные и монтажные провода. Изд. 4-е. М., «Энергия», 1971. 552 с.
14. Городецкий С. С., Лакерник Р. М. Испытания кабелей и проводов. Изд. 2-е. М., «Энергия», 1971. 272 с.
15. Сканапи Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М., Физматгиз, 1958. 908 с.
16. Бронгулеева М. Н., Городецкий С. С. Кабельные линии высокого напряжения. М., «Энергия», 1963. 512 с.
17. Брагин С. М. Электрический и тепловой расчет кабеля. М., Госэнергоиздат, 1960. 328 с.
18. Кулакова Р. В. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией. М., Госэнергоиздат, 1963. 95 с.

19. Привезенцев В. А., Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М., «Энергия», 1970. 424 с.
20. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1956. 392 с.
21. Пошерстник М. С., Салютина М. С. Тепловой расчет судовых кабелей. М.—Л., «Судостроение», 1964. 238 с.
22. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). М., «Энергия», 1966. 464 с.
23. Электрический пробой и разряд в вакууме. М., «Наука», 1966. 282 с. Авт.: Н. Н. Сливков, Н. И. Сидоров, В. И. Михайлов, А. И. Настяха.
24. Фастовский В. Г., Петровский Ю. В., Ровинский А. С. Криогенная техника. М., «Энергия», 1967. 415 с.
25. Кейс В. М. Конвективный тепло- и массообмен. М., «Энергия», 1972. 448 с.
26. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967. 599 с.
27. Бачелис Д. С., Белоруссов Н. И., Саакян А. Е. Электрические кабели, провода и шнуры (справочник). Изд. 3-е. М., «Энергия», 1971. 704 с.
28. Берихардт Э. Переработка термопластических материалов. М., Госхимиздат, 1962. 532 с.
29. Монтажные провода для радиоэлектронной аппаратуры. М., «Энергия», 1973. 295 с. Авт.: А. Л. Гольдберг, В. П. Иноземцев, Л. И. Кранихфельд, И. М. Орлович, В. А. Маковский.
30. Кранихфельд Л. И., Рязанов И. Б. Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов. М., «Высшая школа», 1972. 384 с.
31. Пени В. Технология переработки синтетических каучуков. М., Госхимиздат, 1964. 404 с.
32. Самойлов А. В. Исследование тепловых процессов при экструзии термопластичных полимеров (автореферат канд. диссертации). Киевский политехнический институт, 1966.
33. Тагер А. А. Физикохимия полимеров. М.—Л., Госхимиздат, 1963. 528 с.
34. Производство электрических кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией. М., «Высшая школа», 1972. 384 с. Авт.: И. Д. Троицкий, Л. С. Лахман, О. Ш. Бабицкий, И. Ш. Берин.
35. Чудаков П. И. Наложение резиновой изоляции и оболочек на провода и кабели. М., «Энергия», 1966. 144 с.
36. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс. М., Госхимиздат, 1962. 467 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i>	3
Глава первая. Классификация и характеристики основных видов кабельных изделий	5
1-1. Неизолированные провода для воздушных линий электропередачи	5
1-2. Силовые кабели с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 1—10 кВ	8
1-3. Кабели с радиальным электрическим полем на напряжения 20 и 35 кВ	12
1-4. Кабели для вертикальных прокладок	13
1-5. Кабели высокого напряжения	14
А. Маслонаполненные кабели низкого и среднего давления	15
Б. Маслонаполненные кабели высокого давления	17
В. Газонаполненные кабели	18
Г. Кабели высокого напряжения постоянного тока	19
1-6. Криогенные (криорезистивные и сверхпроводящие) кабели	20
1-7. Кабели с натриевыми жилами	23
1-8. Кабели и провода с пластмассовой и резиновой изоляцией	23
А. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией	23
Б. Силовые кабели с резиновой изоляцией	25
В. Шланговые кабели (кабели в резиновой оболочке)	26
Г. Кабели судовые	29
Д. Кабели высокого напряжения для рентгеновских установок	30
Е. Установочные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией	31
1-9. Монтажные провода	33
1-10. Кабели связи	38
1. Классификация и маркировка кабелей связи	38
2. Элементы конструкций кабелей связи	41
А. Симметричные кабели	41
Б. Коаксиальные кабели	43
В. Построение сердечника кабеля	45
Г. Оболочки и защитные покровы	46
3. Магистральные коаксиальные кабели	47
4. Междугородные симметричные кабели	53
5. Зоновые (внутриобластные) кабели	56
6. Городские телефонные кабели	58
7. Кабели сельской связи	60
8. Кабели для соединительных линий и вставок	62
9. Подводные кабели	64
10. Радиочастотные кабели	68

А. Область применения и виды радиочастотных кабелей	68
Б. Радиочастотные коаксиальные кабели	69
В. Радиочастотные симметричные кабели	70
Г. Радиочастотные спиральные кабели	71
1-11. Обмоточные провода	72
А. Провода с эмалевой изоляцией	72
Б. Обмоточные провода с волокнистой и пленочной изоляцией	75
Глава вторая. Электрический расчет кабеля	78
2-1. Общие задачи и порядок расчета силовых кабелей	78
2-2. Общие уравнения электрического и теплового полей в кабеле	79
2-3. Радиальное электрическое и тепловое поля в одножильном кабеле	80
2-4. Градирование изоляции	85
2-5. Электрическое поле в кабеле постоянного тока	89
2-6. Приближенный расчет кабелей с нерадиальным электрическим полем	91
2-7. Пробой изоляции и виды пробоя	94
2-8. Электрическое поле в неоднородной изоляции	95
2-9. Влияние тонких пленок газов и масла на пробой кабельной изоляции	100
2-10. Разряды в воздушных включениях при постоянном и переменном напряжениях	102
2-11. Зависимость электрической прочности изоляции от вида приложенного напряжения и длительности его действия	103
2-12. Выбор расчетных напряжений	107
2-13. Особенности расчета изоляции кабелей различных конструкций	109
2-14. Магнитное поле в кабеле	113
2-15. Потери в металлических оболочках кабелей	117
Глава третья. Тепловой расчет кабеля	125
3-1. Общие понятия о тепловом расчете кабеля	125
3-2. Расчет теплового сопротивления одножильного кабеля и учет диэлектрических потерь	127
3-3. Расчет теплового сопротивления многожильных кабелей	130
3-4. Тепловое сопротивление кабелей в трубопроводе с маслом или газом под давлением	133
3-5. Тепловое сопротивление среды, окружающей кабель	135
3-6. Расчет допустимого тока нагрузки	145
3-7. Повышение мощности, передаваемой по кабелям	153
3-8. Криогенные кабели	159
3-9. Определение тепловой неустойчивости кабеля	172
3-10. Нагревание и охлаждение кабеля	174
3-11. Нагревание однородного провода, проложенного в воздухе	175
3-12. Нагревание кабеля с изоляционным слоем большой толщины	177
3-13. Нагревание кабеля, проложенного в земле	179
3-14. Расчет нестационарных процессов нагревания кабелей методом сосредоточенных теплосмкостей	181
	469

Глава четвертая. Теория и основы технологии скрутки токопроводящих жил силовых кабелей	186
4-1. Общие сведения о конструкциях токопроводящих жил силовых кабелей	186
4-2. Простая правильная скрутка токопроводящих жил	187
4-3. Деформация отдельных проволок при скрутке токопроводящих жил	191
4-4. Уплотненные круглые жилы	198
4-5. Сплошные секторные жилы	200
4-6. Уплотненные секторные жилы	201
4-7. Особенности конструкций токопроводящих жил высоковольтных кабелей	204
4-8. Современные конструкции крутильных машин	205
4-9. Автоматизация и механизация процесса скрутки токопроводящих жил	211
Глава пятая. Теория и основы технологии изолирования силовых кабелей	214
5-1. Основы теории изолирования бумажными лентами кабелей напряжением 1—35 кВ	214
5-2. Основы теории скрутки многожильных кабелей	219
5-3. Особенности технологии изолирования жил кабелей высокого напряжения	221
5-4. Конструкции бумагообмотчиков изолировочных машин	224
5-5. Изолировочные машины	228
5-6. Машины для скрутки изолированных жил	230
5-7. Машины для изолирования кабелей высокого напряжения	233
Глава шестая. Основы теории и технологии сушки и пропитки силовых кабелей	236
6-1. Современные пропиточные кабельные составы (массы)	236
6-2. Физические процессы во время сушки бумажной изоляции	243
6-3. Основы теории пропитки бумажной изоляции	246
6-4. Технологические режимы сушки и пропитки кабелей напряжением 1—35 кВ	255
6-5. Сушка и пропитка высоковольтных кабелей	257
6-6. Оборудование и автоматизация технологических процессов в сушильно-пропиточных отделениях	260
6-7. Особенности оборудования для сушки и пропитки кабелей высокого напряжения	263
Глава седьмая. Кабельные оболочки и защитные покровы	267
7-1. Характеристика свинца и свинцовых сплавов	267
7-2. Характеристика алюминия и алюминиевых оболочек	269
7-3. Толщины свинцовых и алюминиевых оболочек	270
7-4. Свинцовые прессы	273
7-5. Алюминиевые прессы и особенности технологии наложения алюминиевых оболочек	282
7-6. Основы технологии и автоматизации процесса наложения свинцовых оболочек	288
7-7. Защитные покровы и основы технологии их наложения	291
Глава восьмая. Кабели и провода с пластмассовой и резиновой изоляцией	295
8-1. Общие свойства и перспективы применения высокомолекулярных соединений в кабельной технике	295

8-2. Основные виды и свойства пластмасс, применяемых в кабельной промышленности	301
8-3. Основные виды и свойства резин, применяемых в кабельной промышленности	314
8-4. Основные способы производства проводов и кабелей с пластмассовой изоляцией	326
8-5. Технология производства кабелей и проводов с резиновой изоляцией	352
8-6. Основные принципы расчета режимов охлаждения и нагрева в производстве кабельных изделий с пластмассовой и резиновой изоляцией	368
Глава девятая. Теория кабелей связи	380
9-1. Развитие современной связи по кабельным линиям	380
9-2. Передача энергии по кабелям связи	383
9-3. Взаимные влияния между кабельными цепями	399
9-4. Симметричные кабели связи	408
9-5. Коаксиальные кабели связи	422
9-6. Радиочастотные кабели	438
Глава десятая. Испытания кабельных изделий	445
10-1. Виды испытаний кабельных изделий	445
10-2. Определение геометрических размеров кабельных изделий	446
10-3. Определение механических характеристик кабельных изделий	447
10-4. Физико-химические испытания	449
10-5. Определение электрического сопротивления токопроводящих жил	452
10-6. Измерение электрического сопротивления и емкости изоляции	454
10-7. Измерение диэлектрических потерь в изоляции	457
10-8. Методы определения электрической прочности кабельной изоляции	461
Список литературы	466
Алфавитный указатель	472

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизация процесса скрутки 211
Агрегат непрерывной вулканизации 364
Алюминий 269
Влияния взаимные 399
Вулканизация 360
Выбор расчетных напряжений 107
Герметичность оболочек 449
Головка пресса 274
— штока пресса 276
Градирующие изоляции 85
Деформация проволок при скрутке 191
Емкость цепи 413
Жилы высоковольтных кабелей 201
— круглые уплотненные 198
— секторные сплошные 200
— — уплотненные 261
Затухание кабельной цепи 336
— переходное 406, 436
Ингредиенты резиновых смесей 322
Индуктивность цепи 413
Испытания кабельных изделий 445
Кабель высокого напряжения постоянного тока 19
— газонаполненный 18
— для вертикальных прокладок 13
— рентгеновских установок 30
— сельской связи 60
— криорезистивный 21, 159
— радиочастотный коаксиальный 69
— — симметричный 70
— — спиральный 71
— сверхпроводящий 22
— связи 38
— — подводный 64
— — симметричный 41
— телефонный 58
Каучуки 314
Коэффициент затухания 391
— фазы 391
— распространения 383
Критерий Био 374
— геометрический 374
— Грасгофа 370
— Нуссельта 370
— Прандтля 370
— Фурье 374
Масло изоляционное 239
Машина для изолирования кабелей высокого напряжения 233
— — скрутки изолированных жил 230
— изолирующая 228
— крутильная быстроходная 208
— — жесткорамная 210
— — клетчатая 205
Мост двойной 453
— одинарный 452
Нагревание кабеля в земле 179
— провода в воздухе 175
Неустойчивость тепловая кабеля 172
Оболочки алюминиевые 269
— кабельные 267
— свинцовые 270
Освинцованные кабели 288
Основы теории изолирования 214
— — скрутки изолированных жил 214
Пленки фторопластовые 350
Покровы защитные 267, 291
Поле магнитное в кабеле 113
— тепловое в кабеле 80
— электрическое в кабеле 80
Поливинилхлорид 307
Полиизобутилен 306
Полипропилен 304
Полистирол 309
Полиэтилен 231
Потери в оболочках 117
Пресс алюминиевый 282
— свинцовый 273
— — прямоточный 277
Пресс червячный 372
Пробой изоляции 94
Провод контактный 5
— монтажный 33
— неизолированный 5
— обмоточный с волокнистой изоляцией 75
— — — эмалевой изоляцией 72
— — сталалюминиевый 5
— установочный 31
Разряды в воздушных включениях 102
Расчет допустимых нагрузок кабеля 145
— кабеля тепловой 125
— — электрический 78
— нестационарных процессов нагревания кабеля 181
— параметров кабелей связи 410
Режимы сушки и пропитки 255
Резина 314, 324
Связи электромагнитные 403
Скрутка простая правильная 185
Смеси резиновые 354
Сопротивление волновое 388, 395
— тепловое изоляции 130
— — окружающей среды 135
Составы маслосиликоновые 236
— нестекающие 238
— синтетические 238
Структура высокомолекулярных соединений 297
Сушка изоляции 243
— — высоковольтных кабелей 257
Схема испытания кабельных изделий напряжением 463
— сушильно-пропиточной установки 264
Теория конвективного теплообмена 369
— пропитки силовых кабелей 246
Тераомметр 456
Технология изолирования кабелей высокого напряжения 221
Толщина оболочек 270
Фторопласты 310
Эквивалент кабельной цепи 385
Экранирование кабелей связи 419