

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

*ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ*

«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л. А. КОВРИГИН

ОСНОВЫ КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140611 – «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника», направления подготовки дипломированных специалистов 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»

*Издательство
Пермского государственного технического университета
2006*

УДК 621.315
K56

Рецензенты:

генеральный директор ОАО «Камкабель» кандидат технических наук

В.В. Смильгевич

заведующий кафедрой «Электроизоляционная и кабельная техника» Томского политехнического университета кандидат технических наук, доцент

А.Н. Дудкин

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Томского политехнического университета

В.М. Аникеенко.

Ковригин, Л.А.

K56 Основы кабельной техники: учеб. пособие /Л.А. Ковригин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.

ISBN 5-88151-530-7

Рассмотрены конструкции токопроводящих жил и расчет секторных жил. Изложена теория силовых электрических кабелей переменного и постоянного тока, приведен их электрический расчет. Представлен тепловой расчет кабелей, проложенных в земле и на воздухе, с учетом потерь полезной мощности в экранах и изоляции. Дана характеристика и маркировка различных конструкций кабелей. В учебное пособие не вошел материал, который изучается в дисциплинах «Технология производства кабелей», «Технология производства проводов», «Оптические и электрические кабели связи».

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140611 – «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника».

УДК 621.315

ISBN 5-88151-530-7

© ГОУ ВПО «Пермский государственный технический университет», 2006

© Л.А. Ковригин, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Токопроводящие жилы.....	6
1.1. Скрученные токопроводящие жилы.....	7
1.2. Параметры скрутки.....	11
1.3. Конструкции токопроводящих жил.....	16
1.4. Секторные токопроводящие жилы.....	20
2. Электрическое поле в кабеле.....	25
2.1. Распределение напряженности электрического поля и напряже- ния по толщине изоляции в кабеле переменного тока.....	27
2.2. Расчет толщины изоляции кабеля переменного тока с круглой жилой и цилиндрическим экраном.....	30
2.3. Регулирование электрического поля с помощью диэлектриче- ской проницаемости.....	36
2.4. Электрическое поле в кабеле с тремя круглыми жилами.....	41
2.5. Электрическое поле в кабеле с секторными жилами.....	43
2.6. Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля постоянного тока.....	44
3. Магнитное поле в кабеле.....	51
3.1. Потери полезной мощности в металлических оболочках небро- нированных кабелей.....	51
3.2. Потери полезной мощности в металлических оболочках брони- рованных кабелей.....	56
3.3. Сопротивление токопроводящей жилы переменному току.....	57
4. Тепловой расчет кабеля.....	63
4.1. Расчет допустимого тока нагрузки при отсутствии источников тепла в изоляции и оболочках кабеля.....	63
4.2. Расчет допустимого тока нагрузки при наличии диэлектриче- ских потерь в изоляции.....	66
4.3. Расчет допустимого тока нагрузки с учетом потерь в металличе- ских оболочках.....	70
4.4. Расчет допустимого тока нагрузки трехжильного кабеля.....	71
4.5. Тепловое сопротивление среды, окружающей кабель.....	71
4.6. Нагрев и охлаждение кабеля.....	77
4.7. Определение тока перегрузки.....	81
4.8. Расчет тока короткого замыкания токопроводящей жилы.....	82
4.9. Расчет тока короткого замыкания проволочного экрана.....	85
5. Конструкции силовых кабелей.....	86
Список литературы.....	93

ВВЕДЕНИЕ

Электрический кабель содержит следующие элементы (рис. В.1): токопроводящую жилу 1, изоляцию 2, электрический экран 3, защитный покров 4. Электрическое поле в кабеле, как правило, находится между жилой и экраном. Функцию экрана может выполнять герметичная металличе-

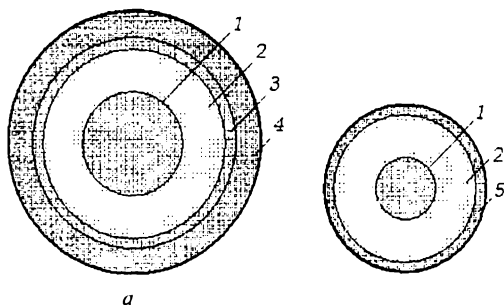


Рис. В.1. Конструкция кабеля (а) и провода (б): 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция; 3 – электрический экран; 4 – защитный покров; 5 – легкий защитный покров

ческая оболочка, обмотка металлической лентой, обмотка или оплетка проволоками и т.д. Высоковольтный кабель обязательно имеет экран. Кабель защищен от воздействия окружающей среды защитным покровом, поэтому он может быть проложен под землей, под водой и на открытом воздухе.

Провод содержит: токопроводящую жилу 1, изоляцию 2 и легкий за-

щитный покров 3. Электрическое поле в проводе, как правило, выходит за пределы геометрических размеров провода. Исключением являются экранированные провода. Провод слабо защищен от воздействия окружающей среды, поэтому применяется в аппаратуре, закрытых помещениях и т.д.

Шнур – это провод повышенной гибкости, служащий для присоединения к подвижным устройствам.

Существует несколько видов классификации кабельной продукции: по назначению, по области применения, по виду изоляции и т.д. По назначению выделяют:

1. Силовые кабели – для передачи электроэнергии на промышленной частоте 50 Гц (Европа) и 60 Гц (Америка).

2. Кабели связи (электрические или оптические) – для передачи информации.

3. Радиочастотные кабели – для передачи информации и энергии на высокой частоте.

4. Контрольные кабели и кабели управления – для передачи маломощных сигналов.

По виду изоляции выделяют кабели с резиновой, полиэтиленовой; поливинилхлоридной и другой изоляцией.

По области применения кабельные изделия классифицируют:

- 1) на авиационные, автомобильные и тракторные;
 - 2) аэродромные;
 - 3) геофизические;
 - 4) контрольные, сигнализации и блокировки на железных дорогах;
 - 5) судовые;
 - 6) шахтные;
 - 7) управления для подвижных механизмов;
- а также предназначенные:
- 8) для горных разработок и землеройных работ;
 - 9) нефтяных промыслов;
 - 10) электросварки;
 - 11) подвижного состава (электрический транспорт).

Для кабельных заводов наиболее удобно классифицировать кабельные изделия *по группам однородной продукции*, т.е. по технологии производства: 1) провода неизолированные для воздушных линий электропередачи; 2) провода самонесущие изолированные; 3) провода неизолированные контактные; 4) провода неизолированные гибкие; 5) кабели силовые для стационарной прокладки на напряжение менее 1 кВ; 6) кабели силовые для стационарной прокладки на напряжение 1 кВ и выше; 7) кабели силовые для нестационарной прокладки на напряжение 1 кВ; 8) провода силовые для электрических установок; 9) провода силовые бытового назначения; 10) провода автотракторные; 11) провода и шнуры осветительные; 12) провода для выводов обмоток электрических машин; 13) провода силовые общего назначения; 14) провода для взрывных работ; 15) провода и кабели нагревательные; 16) провода и кабели подвижного состава; 17) кабели управления; 18) кабели контрольные; 19) кабели сигнально-блокировочные; 20) кабели и провода термоэлектродные; 21) кабели с минеральной изоляцией; 22) кабели дальней связи; 23) кабели связи телефонные; 24) кабели зоновой связи; 25) кабели связи стационарные и распределительные; 26) провода связи телефонные распределительные и радиотрансляционные; 27) провода и кабели связи полевые; 28) шнуры слаботочные; 29) кабели для компьютерных сетей; 30) провода и кабели монтажные; 31) провода и кабели бытовые; 32) кабели и провода для геофизических работ; 33) кабели судовые; 34) кабели волоконно-оптические; 35) кабели радиочастотные; 36) провода обмоточные с эмалевой изоляцией; 37) провода обмоточные с волокнистой и другими видами изоляции; 38) прокат цветной.

1. ТОКОПРОВОДЯЩИЕ ЖИЛЫ

Токосоводящие жилы могут быть однопроволочными или многопроволочными (рис. 1.1); чем больше проволока в жиле, тем больше ее гибкость.

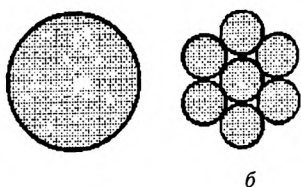


Рис. 1.1. Конструкции токосоводящих жил: *a* – однопроволочные; *b* – многопроволочные

По форме токосоводящие жилы подразделяют на круглые, секторные и сегментные (рис. 1.2).

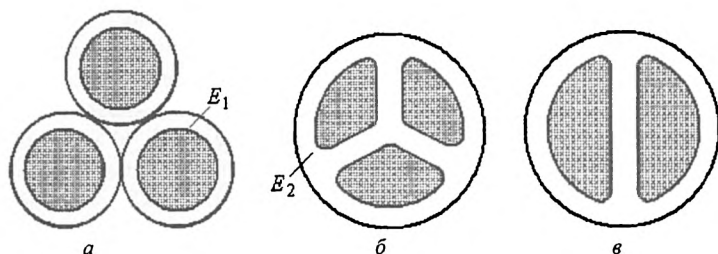


Рис. 1.2. Формы токосоводящих жил: *a* – круглые; *b* – секторные; *в* – сегментные; E_1 , E_2 – напряженность электрического поля на жиле и ребре сектора

Кабель с секторными жилами имеет меньший диаметр, чем кабель с круглыми жилами при том же сечении токосоводящих жил. Однако на ребрах сектора напряженность электрического поля E_2 выше, чем на поверхности круглой жилы E_1 , поэтому сектор можно применить только до напряжения 10 кВ. Широкое распространение получили кабели с тремя секторными жилами, с пропитанной бумажной изоляцией в алюминиевой оболочке, которая служит нулевым проводом. В кабелях с полимерной изоляцией используют четыре сектора.

Кабель с сегментными жилами нашли применение для передачи электроэнергии при постоянном напряжении.

1.1. Скрученные токопроводящие жилы

Проволоки скручивают в жилу, а изолированные жилы в кабель для придания изделию устойчивой формы. Существует две системы скрутки жил: *повивная* (правильная) и *пучковая* (шнуровая) (рис. 1.3). При повивной скрутке проволоки в жиле располагаются в строгом порядке – повивами. Центральная проволока считается за первый повив.

Скрутка может быть левой и правой (рис. 1.4). Если проволоки идут снизу справа вверх налево (как буква S) – это *левая скрутка*; снизу слева вверх направо (как буква Z) – *правая скрутка*.

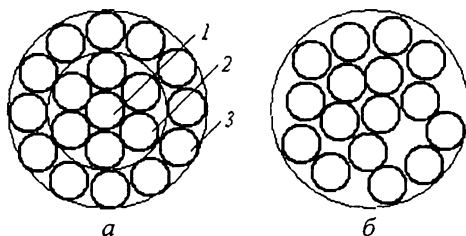


Рис. 1.3. Виды скруток: а – повивная; б – пучковая; 1 – первый повив; 2 – второй повив; 3 – третий повив

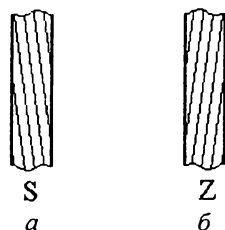


Рис. 1.4. Направление скрутки: а – левое; б – правое

Скрутка может быть *однонаправленной* (классической) (рис. 1.5, а) и *разнонаправленной* (рис. 1.5, б и в). Разнонаправленную скрутку можно применить только при скрутке пучков. Эта система скрутки получила название S/Z-скрутки – пучок попеременно скручивается то в правую, то в левую сторону.

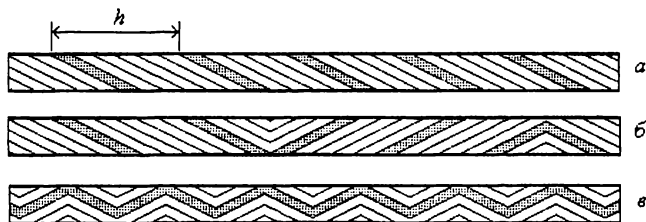


Рис. 1.5. Разновидности скрутки: а – однонаправленная; б – разнонаправленная (S/Z-скрутка); в – волновая (S/Zскрутка); h – шаг скрутки

Разновидностью разнонаправленной скрутки является *волновая скрутка* (рис. 1.5, в), при такой скрутке направление скрутки меняется менее чем за один шаг скрутки, т.е. менее чем за один оборот.

При повивной скрутке направление скрутки повивов может чередоваться или оставаться одним и тем же. Наиболее часто применяют чередование направлений скрутки.

Свойства жил с чередующимся направлением скрутки повивов:

1) при растяжении жилы не теряют круглой формы и растягиваются незначительно;

2) такие жилы менее гибкие, чем жилы одного направления скрутки.

Свойства жил с одним направлением скрутки повивов:

1) при растяжении они сильно удлиняются и теряют круглую форму;

2) эти жилы более гибкие, чем жилы с чередующимся направлением скрутки повивов.

Свойства жил пучковой скрутки:

1) каждая проволока в жиле расположена произвольно;

2) все проволоки имеют одно направление скрутки;

3) эти жилы более гибкие, чем жилы повивной скрутки;

4) жилы менее устойчивы, чем жилы правильной скрутки.

Проволоки в пучковой скрутке не располагаются правильными концентрическими повивами, поэтому диаметр жилы может быть определен только приблизительно по эмпирической формуле:

$$d_{\text{ж}} = 1,19d\sqrt{N}, \quad (1.1)$$

где N – число проволок; d – диаметр проволоки.

Пучковую систему скрутки целесообразно применять в тех случаях, когда необходима особо гибкая жила.

Правильная скрутка может быть *нормальной* и *комбинированной* (рис. 1.6). При нормальной скрутке все проволоки имеют один диаметр. При комбинированной скрутке проволоки в различных повивах имеют различный диаметр. Разновидностью правильной скрутки является *стренговая* (сложная) скрутка (см. рис. 1.6). При стренговой скрутке отдельные проволоки скручиваются в стренги по системе повивной скрутки, затем стренги скручиваются в жилу по системе нормальной скрутки.

Увеличение стойкости жилы к растяжению достигается тем, что проволоки в стренге имеют одно направление скрутки, а стренги в жиле другое. В тех случаях, когда при эксплуатации кабеля преобладают растягивающие усилия и когда кабель подвергается многократным сматываниям и наматываниям на барабан, применяют встречную скрутку двух соседних стренг.

Так, в семистренговой жиле три стренги наружного повива будут иметь правую скрутку, а три стренги левую. Если число проволок, скручиваемых в левую сторону, равно числу проволок, скручиваемых в правую сторону, то кабель при эксплуатации петель не образует.

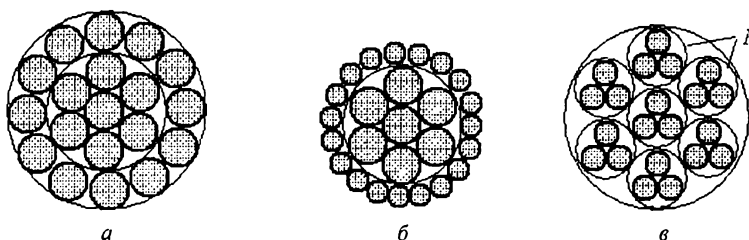


Рис. 1.6. Нормальная (а), комбинированная (б) и стренговая (в) скрутка жил (*l* – стренги)

В России принят следующий ряд номинальных сечений токопроводящих жил силовых кабелей: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800; 1000 мм². Этот ряд сечений построен в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК): одно сечение отличается от другого в $\sqrt[10]{10} \approx 1,25$ раза. Эти рекомендации МЭК не распространяются на обмоточные провода, неизолированные провода для ЛЭП, кабели и провода связи, так как геометрические размеры жил для них вычисляются исходя из электрических параметров кабелей.

Диапазон сечений монтажных проводов – от 0,03 до 2,5 мм², а проводов питания – от 0,35 до 1000 мм². Монтажные провода – это провода слабого тока, поэтому сечение жил выбирается исходя из падения напряжения, а не по допустимому току. Монтажные провода используются малыми длинами, по этой причине падение напряжения незначительно даже для малых сечений. Сечение жил проводов питания выбирается исходя из передаваемого по ним тока.

Для алюминиевых и медных проводов ЛЭП существует свой ряд номинальных сечений: 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800 мм². Алюминиевые провода изготавливаются до сечения 800 мм², медные – до 400 мм².

Для сталеалюминиевых проводов указывается сечение алюминия и стали через дробь, например: 95/16; 150/34; 450/56; 600/72.

По гибкости токопроводящие жилы кабелей и проводов подразделяются на шесть классов (по рекомендации МЭК), отличающихся числом проволок (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классы гибкости токопроводящих жил кабелей

№ п/п	Сечение, мм ²	Классы гибкости					
		Нестационарная прокладка		Стационарная прокладка			
		1	2	3	4	5	6
1	10	1	7	19	49	80	324
2	16	1	7	19	49	224	513
3	25	1	7	19	49	196	783
4	35	1	7	19	98	189	1107
5	50	7	19	27	144	266	402
6	70	7	19	37	189	266	999
7	95	7	19	37	189	361	1332
8	120	19	37	61	266	608	1702
9	150	19	37	61	266	756	2109
10	185	37	37	91	330	925	2590
11	240	37	61	—	420	1221	3360
12	300	37	61	—	518	1525	1270
13	400	37	61	—	672	2013	—
14	500	37	61	—	854	1769	—
15	625	61	127	—	—	—	—
16	800	61	127	—	—	—	—

Чем больше класс, тем меньше диаметр проволок и больше их количество, следовательно, тем большей гибкостью обладает жила. Например, жила сечением 2,5 мм² второго класса состоит из 7 проволок диаметром 0,67 мм, шестого класса – 140 проволок диаметром 0,15 мм.

Кабели с жилами первого и второго классов применяются для стационарной прокладки, с третьего по шестой – для нестационарной прокладки, а также для стационарной прокладки в случаях, где требуется повышенная гибкость при монтаже или вибростойкость во время эксплуатации. Более подробно классы гибкости представлены в справочнике [5].

При выборе конструкции жилы большое значение имеет коэффициент заполнения, т.е. отношение суммы сечений всех проволок, входящих в жилу, к площади круга, описанного вокруг скрученной жилы:

$$f = \frac{\sum S_{\text{пр}}}{S_{\text{ж}}} = \frac{NS_{\text{пр}}}{S_{\text{ж}}} = N \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi d_{\text{ж}}^2}, \quad f = N \frac{d^2}{d_{\text{ж}}^2}, \quad (1.2)$$

где $S_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения проволоки; $S_{\text{ж}}$ – площадь поперечного сечения жилы; N – число проволок; d – диаметр проволоки; $d_{\text{ж}}$ – диаметр жилы.

Формула справедлива, когда все проволоки имеют один диаметр. Если жила скручена из стренг, то коэффициент заполнения жилы

$$f = f_1 f_2, \quad (1.3)$$

где f_1 – коэффициент заполнения стренги; f_2 – коэффициент заполнения жилы стренгами.

Коэффициент заполнения скрученных жил составляет 0,71–0,76. Повысить этот коэффициент можно за счет обжатия жил на специальных вальцах. Уплотненная жила имеет меньший диаметр, поэтому расход изоляционных материалов и материалов на оболочку уменьшается примерно на восемь процентов. У уплотненной жилы по сравнению с неуплотненной поверхность более гладкая, что положительно сказывается на распределении напряженности электрического поля. Однако при уплотнении происходит нагартовка. Это вызывает снижение электропроводности на 0,8 %.

1.2. Параметры скрутки

В скрученной жиле все проволоки располагаются по винтовой линии. Расстояние, измеренное вдоль оси жилы, соответствующее одному обороту проволоки вокруг оси жилы, называется шагом скрутки h . Проволоки в жиле образуют с плоскостью, перпендикулярной оси жилы, угол α , называемый углом скрутки. Сделаем развертку одного витка проволоки по диаметру, проходящему через центр проволоки, получим треугольник ABC . На рис. 1.7 показан один виток проволоки, рассмотрим все параметры, характеризующие этот виток. $AC = L$ – длина витка проволоки; $AB = h$ – шаг скрутки; $BC = \pi D_{\text{ср}}$ – длина окружности; $D_{\text{ср}}$ – диаметр развертки; α – угол скрутки (угол между плоскостью, перпендикулярной оси жилы, и осью витка).

На рис. 1.7 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{\pi D_{\text{ср}}} . \quad (1.4)$$

Выразим из формулы (1.4) шаг скрутки h :

$$h = \pi D_{\text{ср}} \operatorname{tg} \alpha . \quad (1.5)$$

Обозначим $\pi \operatorname{tg} \alpha = m_{\text{т}}$, тогда

$$h = m_{\text{т}} D_{\text{ср}} , \quad (1.6)$$

где $m_{\text{т}}$ – теоретическая кратность шага скрутки.

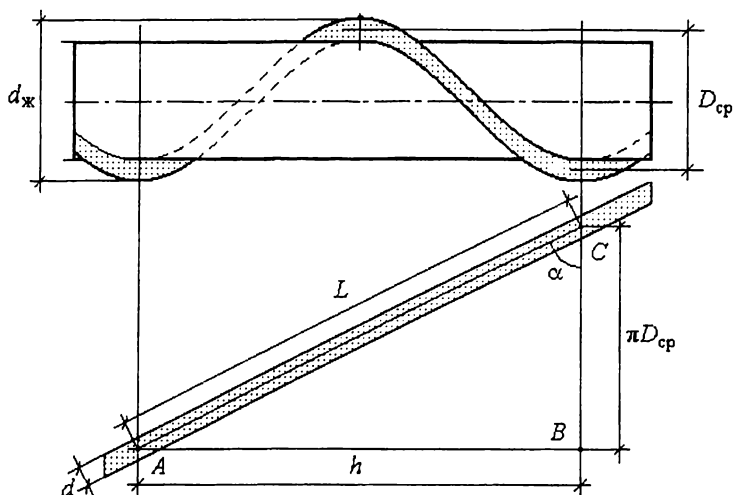


Рис. 1.7. Развертка витка проволоки: h – шаг скрутки; α – угол скрутки; L – длина витка проволоки; $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр; $d_{\text{ж}}$ – диаметр жилы; d – диаметр проволоки

Из формулы (1.6) выразим $m_{\text{т}}$:

$$m_T = \frac{h}{D_{cp}}. \quad (1.7)$$

Кратность шага скрутки m_T показывает, во сколько раз шаг скрутки h больше среднего диаметра D_{cp} .

Вычислим длину витка:

$$L = \sqrt{h^2 + \pi^2 D_{cp}^2} = h \sqrt{1 + \frac{\pi^2 D_{cp}^2}{h^2}} = h \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m_T^2}} = h k_y \quad \text{или} \quad L = h k_y, \quad (1.8)$$

где обозначим

$$\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m_T^2}} = k_y. \quad (1.9)$$

Коэффициент укрутки k_y показывает, во сколько раз длина проволоки (L) больше шага скрутки (h). Используя формулу разложения в ряд

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 + \dots$$

и взяв первые два члена ряда, преобразуем выражение (1.9):

$$k_y = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m_T^2}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi^2}{m_T^2} \quad (1.10)$$

Формула (1.10) справедлива только при больших углах скрутки, она широко использовалась, когда не было ЭВМ и извлечение квадратного корня (формула (1.9)) было трудоемким.

Коэффициент укрутки жилы, имеющей несколько повивов, рассчитывается следующим образом:

$$k_y = \frac{n_1 k_1 + n_2 k_2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots}, \quad (1.11)$$

где n_1, n_2 — номера повивов; k_1, k_2 — коэффициенты укрутки соответствующих повивов.

Определим число проволок, на которое отличается один повив от другого повива. Для этого выберем произвольный повив (рис. 1.8) со средним диаметром D_i и следующий за ним повив диаметром D_{i+1} .

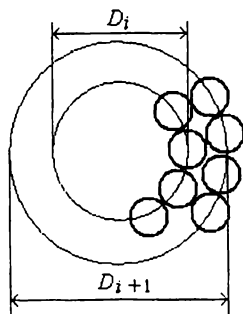


Рис. 1.8. Два соседних повива

Тогда длина окружности i -го повива $L_1 = \pi D_i$. Для $(i+1)$ -го повива $L_2 = \pi(D_i + 2d)$, где d – диаметр проволоки. Разность длин окружностей

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \pi(D_i + 2d) - \pi D_i = 2\pi d \quad (1.12)$$

Разделим $2\pi d$ на d , получим число, на которое проволок в каждом последующем повиве больше: $2\pi d/d = 2\pi \approx 6,28$. Следовательно, в каждом следующем повиве на 6,28 проволоки больше. Учитывая, что количество проволок должно быть целым числом, округляем его в меньшую сторону – до 6 проволок, т.е. между проволоками возникнет зазор. Увеличение числа проволок на 6 в каждом последующем повиве является основным признаком правильной скрутки.

Обратимся вновь к треугольнику ABC (см. рис. 1.7). Изобразим в увеличенном виде угол C (рис. 1.9). При пересечении проволоки плоскостью, перпендикулярной оси жилы, в сечении образуется эллипс, большая ось которого равна d_1 .

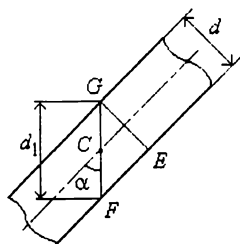


Рис. 1.9. Фрагмент проволоки

В треугольнике $\triangle FGE$ (см. рис. 1.9) $GE/GF = \sin \alpha$. Так как $GE = d$ и $GF = d_1$, то можно записать:

$$\frac{d}{d_1} = \sin \alpha \quad \text{или} \quad d_1 = \frac{d}{\sin \alpha}. \quad (1.13)$$

Воспользуемся формулой

$$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}. \quad (1.14)$$

Подставим формулу (1.14) в (1.13):

$$d_1 = d \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}, \quad (1.15)$$

С учетом формул (1.4) и (1.9)

$$d_1 = d \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m_T^2}} = dk_y \quad (1.16)$$

Найдем величину коэффициента укрутки k_y , при котором проволоки в повиве будут соприкасаться. Отношение $\Delta L/d$ – это число проволок, на которое в каждом следующем повиве больше. Зазор между проволоками будет отсутствовать, если выполняется условие

$$\frac{\Delta L}{d_1} = 6. \quad (1.17)$$

Подставим в (1.17) формулы (1.12) и (1.16):

$$\frac{2\pi d}{dk_y} = 6, \quad \frac{2\pi}{k_y} = 6, \quad k_y = \frac{\pi}{3} \approx 1,047, \quad (1.18)$$

где $k_y = 1,047$ – критический коэффициент укрутки.

При большем значении k_y проволоки не смогут укладываться в повив. Найдем коэффициент скрутки, при котором коэффициент укрутки равен критическому, для этого из формулы (1.16) выразим m_T :

$$m_T = \pi \sqrt{\frac{1}{k_y - 1}} \quad (1.19)$$

Подставим в формулу (1.19) $k_y = 1,047$, получим $m_T \approx 10$, т.е. проволока должна совершить один оборот на расстоянии, кратном не менее 10 диаметрам жилы. На производстве удобно измерять диаметр жилы $d_{ж}$, а не $D_{ср}$, по этой причине применяется *практическая кратность шага скрутки*

$$m = \frac{h}{d_{ж}}. \quad (1.20)$$

Найдем связь между практической и теоретической кратностью шага скрутки, для чего воспользуемся формулами:

$$h = m d_{ж} \quad \text{и} \quad h = m_T D_{ср}. \quad (1.21)$$

После преобразований с учетом $D_{\text{ср}} = d_{\text{ж}} - d$ получим

$$md_{\text{ж}} = m_{\text{т}} D_{\text{ср}}, \quad m_{\text{т}} = m \frac{d_{\text{ж}}}{D_{\text{ср}}}, \quad m_{\text{т}} = m \frac{d_{\text{ж}}}{d_{\text{ж}} - d}. \quad (1.22)$$

1.3. Конструкции токопроводящих жил

Рассмотрим пять конструкций токопроводящих жил, скрученных нормальной правильной скруткой, которые отличаются друг от друга числом проволок в центре жилы:

1. *Одна проволока в центре* (рис. 1.10).

Система скрутки $1 + 6 + 12 + 18 + \dots$. Диаметр первого повива – d , второго – $3d$, третьего – $5d$ и т.д., такой ряд соответствует формуле для диаметра жилы

$$d_{\text{ж}} = (2n - 1)d, \quad (1.23)$$

где n – число повивов; d – диаметр проволоки.

Определим общее число проволок, используя формулы арифметической прогрессии:

$$N = \frac{a_1 + a_n}{2} n, \quad a_n = a_1 + \Delta a(n - 1), \quad (1.24)$$

где N – общее число проволок; a_1 – первый член прогрессии; a_n – последний член прогрессии; Δa – разность прогрессии; n – число членов прогрессии.

Для системы скрутки $1 + 6 + 12 + 18 + \dots$ применить формулы арифметической прогрессии можно только начиная со второго повива, так как первый повив отличается от второго на 5 проволок (это исключение из правила). В последнем повиве число проволок

$$a_n = 6 + 6(n - 1 - 1), \quad (1.25)$$

где первая шестерка – число проволок во втором повиве; вторая шестерка – число проволок, на которое увеличивается их количество в каждом сле-

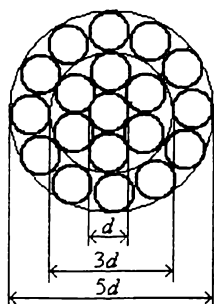


Рис. 1.10. Одна проволока в центре

дующем повиве; вторая единица указывает на то, что счет идет со второго повива.

Общее число проволок в жиле

$$N = \frac{a_1 + a_n}{2}(n-1) = \frac{6 + 6 + 6(n-2)}{2}(n-1) = 3n(n-1). \quad (1.26)$$

Эта формула получена без учета центральной проволоки. Запишем эту формулу с учетом центральной проволоки:

$$N = 3n(n-1) + 1. \quad (1.27)$$

Используя формулы (1.2), (1.23) и (1.27), найдем коэффициент заполнения жилы:

$$f = N \frac{d_{\text{пр}}^2}{d_{\text{ж}}^2} = \frac{[3n(n-1) + 1] d_{\text{пр}}^2}{[(2n-1)d_{\text{пр}}]^2} = \frac{[3n(n-1) + 1]}{[(2n-1)]^2}. \quad (1.28)$$

2. Две проволоки в центре (рис. 1.11).

Система скрутки 2 + 8 + 14 + ... Диаметр жилы

$$d_{\text{ж}} = 2nd. \quad (1.29)$$

В последнем повиве число проволок

$$a_n = 2 + 6(n-1).$$

Общее число проволок в жиле

$$N = \frac{2 + 2 + 6(n-1)}{2}n = (3n-1)n. \quad (1.30)$$

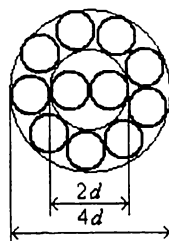


Рис. 1.11. Две проволоки в центре

Используя формулы (1.2), (1.29) и (1.30), найдем коэффициент заполнения:

$$f = \frac{[(3n-1)n]}{4n^2} \quad (1.31)$$

3. Три проволоки в центре (рис. 1. 12).

Система скрутки $3 + 9 + 15 + \dots$

Общее число проволок

$$N = \frac{3+3+6(n-1)}{2} n = 3n^2 \quad (1.32)$$

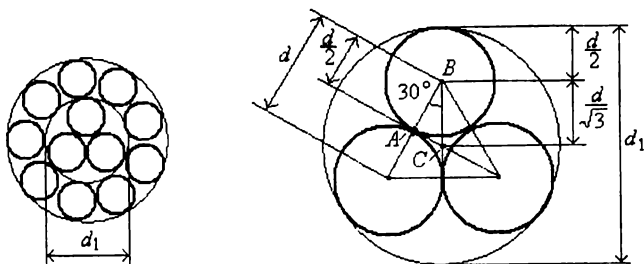


Рис. 1.12. Три проволоки в центре

Рассмотрим $\triangle ABC$:

$$\frac{AB}{BC} = \frac{d/2}{BC} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (1.33)$$

Из (1.33) выразим BC :

$$BC = \frac{d}{\sqrt{3}}. \quad (1.34)$$

Диаметр первого повива (см. рис. 1.13)

$$d_1 = \left(\frac{d}{2} + \frac{d}{\sqrt{3}} \right) \cdot 2 = d \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \approx 2,155d. \quad (1.35)$$

Диаметр жилы

$$d_{\text{ж}} = (2n + 0,155)d. \quad (1.36)$$

Используя формулы (1.2), (1.32) и (1.36), найдем коэффициент заполнения жилы:

$$f = \frac{3n^2}{(2n + 0,155)^2}. \quad (1.37)$$

4. Четыре проволоки в центре (рис. 1.13).

Система скрутки $4 + 10 + 16 + \dots$

В квадрате $ABCD$ сторона $BD = d\sqrt{2}$, диаметр первого повива $d_1 = d(1 + \sqrt{2}) \approx 2,41d$ Тогда диаметр жилы

$$d_{\text{ж}} = (2n + 0,41)d. \quad (1.38)$$

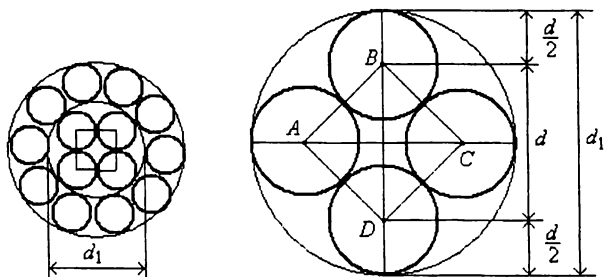


Рис. 1.13. Четыре проволоки в центре

Число проволок в жиле

$$N = \frac{4 + 4 + 6(n-1)}{2} n = n(3n+1). \quad (1.39)$$

Используя формулы (1.2), (1.38) и (1.39), найдем коэффициент заполнения жилы:

$$f = \frac{n(3n+1)}{(2n + 0,41)^2}. \quad (1.40)$$

5. Пять проволок в центре жилы (рис. 1.14).

Система скрутки $5 + 11 + 17 + \dots$

Рассмотрим пятиугольник $ABCDE$, диаметр окружности, описывающей этот пятиугольник,

$$d_0 = 2d\sqrt{0,5 + \sqrt{5}/10}.$$

Диаметр первого повива

$$d_1 = d \left(1 + 2\sqrt{0,5 + \sqrt{5}/10} \right) = 2,71d. \quad (1.41)$$

Диаметр жилы

$$d_{ж} = (2n + 0,71)d \quad (1.42)$$

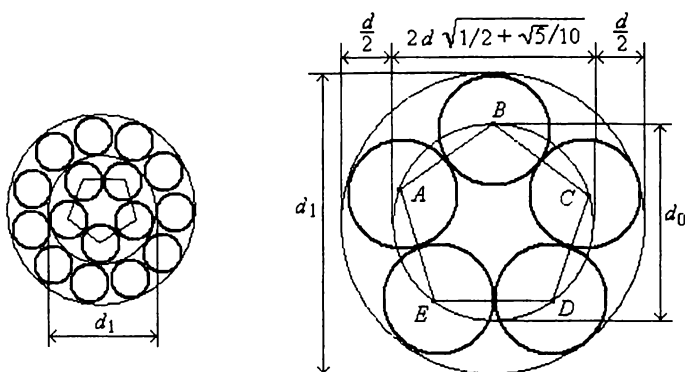


Рис. 1.14. Пять проволок в центре

Число проволок в жиле

$$N = \frac{5 + 5 + 6(n-1)}{2} n = n(3n + 2). \quad (1.43)$$

Используя формулы (1.2), (1.42) и (1.43), найдем коэффициент заполнения жилы:

$$f = \frac{n(3n + 2)}{(2n + 0,71)^2}. \quad (1.44)$$

Жила с пятью проволоками в центре применяется редко из-за неустойчивости. Наиболее устойчива жила с одной проволокой в центре.

1.4. Секторные токопроводящие жилы

Выведем формулу для площади секторной токопроводящей жилы. На рис. 1.15 представлен чертеж секторной жилы.

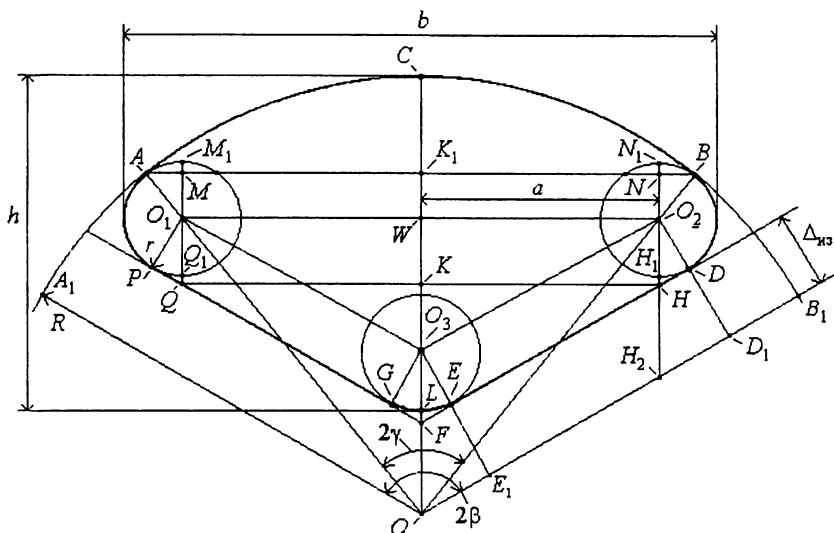


Рис. 1.15. Секторная жила

Введем некоторые обозначения: b – ширина сектора; h – высота сектора; $\Delta_{из}$ – толщина изоляции; R – радиус сектора; r – радиус закругления; 2β – угол $2\pi/3$; 2γ – рассчитываемый угол; S – площадь сектора.

Для удобства вычисления площади сектора S , разобьем его на элементарные площади: $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9$ (рис. 1.16). Площадь сектора $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$, где S_1 – площадь сегмента ABC ; S_2 – площадь прямоугольника $QMNH$; S_3 – площадь треугольника QHF за вычетом площадей $S_7 + S_9$; S_4 – площадь окружности радиусом r за вычетом площади сектора S_5 , которая является суммой площадей фигуры AMM_1 (S_5') и фигуры BNN_1 (S_5''). Площадь сегмента S_1 (ABC) равна разности площадей сектора $OACB$ и треугольника OAC (см. рис. 1.15):

$$S_1 = S_{OACB} - S_{OAC} = \frac{1}{2} 2\gamma R^2 - \frac{1}{2} AB \cdot K_1 O. \quad (1.45)$$

Рассмотрим отдельно треугольник OAB , выразим его площадь через известные компоненты:

$$\frac{1}{2} AB \cdot K_1 O = K_1 B \cdot K_1 O = R \sin \gamma R \cos \gamma = \frac{R^2}{2} \sin 2\gamma. \quad (1.46)$$

Таким образом, площадь

$$S_1 = \gamma R^2 - \frac{R^2}{2} \sin 2\gamma = R^2 \left(\gamma - \frac{1}{2} \sin 2\gamma \right). \quad (1.47)$$

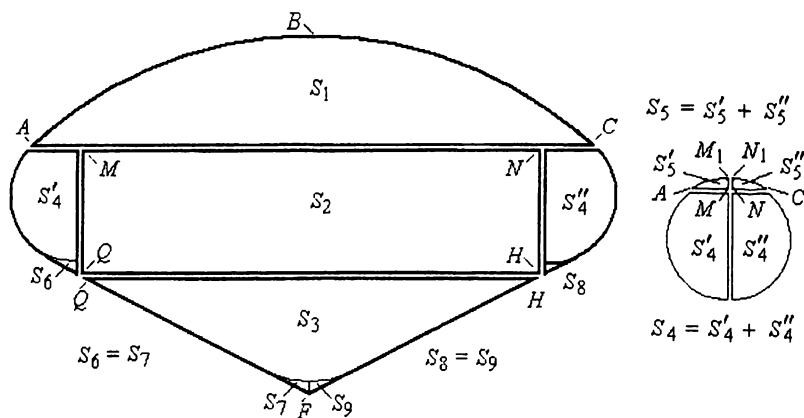


Рис. 1.16. Разбиение сектора на элементарные площади

Площадь прямоугольника $QMNH$

$$S_2 = MN \cdot NH,$$

где $MN = 2a$ и $NH = NO_2 + HO_2$.

Из треугольника O_2NB находим $NO_2 = r \cos \gamma$, $HO_2 = r / \sin \beta$, тогда площадь

$$S_2 = 2ar \left(\cos \gamma + \frac{1}{\sin \beta} \right). \quad (1.48)$$

Найдем площадь фигуры $QHELG$:

$$S_3 = S_{FQH} - S_7 - S_9, \quad (1.49)$$

где площадь треугольника $S_{FQH} = KH \cdot KF = a \cdot KF$ Из отношения $KF/KH = \operatorname{ctg} \beta$ выразим KF : $KF = a \operatorname{ctg} \beta$, тогда площадь

$$S_3 = a^2 \operatorname{ctg} \beta - S_7 - S_9. \quad (1.50)$$

Для нахождения площади S_4 ($S_4 = S_4' + S_4''$) необходимо из площади круга с радиусом r вычесть площадь сегмента S_5 и добавить S_6 и S_8 :

$$S_4 = \pi r^2 - S_5 + S_6 + S_8, \quad (1.51)$$

где $S_5 = S_5' + S_5''$.

Площадь S_5 – площадь сегмента, который подобен сегменту ABC , следовательно:

$$S_5 = r^2 \left(\gamma - \frac{1}{2} \sin 2\gamma \right). \quad (1.52)$$

Общая площадь секторной токопроводящей жилы ($S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$)

$$\begin{aligned} S = R^2 \left(\gamma - \frac{1}{2} \sin 2\gamma \right) + 2ar \left(\cos \gamma + \frac{1}{\sin \beta} \right) + a^2 \operatorname{ctg} \beta - \\ - S_7 - S_9 + \pi r^2 - r^2 \left(\gamma - \frac{1}{2} \sin 2\gamma \right) + S_6 + S_8. \end{aligned}$$

Учитывая, что $S_6 = S_7$ и $S_8 = S_9$, получим

$$S = (R^2 - r^2) \left(\gamma - \frac{1}{2} \sin 2\gamma \right) + 2ar \left(\cos \gamma + \frac{1}{\sin \beta} \right) + a^2 \operatorname{ctg} \beta + \pi r^2 \quad (1.53)$$

В треугольнике OWO_2 (см. рис. 1.15) сторона OO_2 равна $R - r$, следовательно:

$$a = (R - r) \sin \gamma. \quad (1.54)$$

Ширина сектора

$$b = 2(a + r) = 2[(R - r) \sin \gamma + r]. \quad (1.55)$$

Из треугольника OO_2D_1 имеем

$$\sin(\beta - \gamma) = \frac{r + \Delta_{из}}{R - r}, \quad (1.56)$$

откуда

$$\gamma = \beta - \arcsin \frac{r + \Delta_{из}}{R - r}. \quad (1.57)$$

Высота сектора h :

$$CL = OC - OO_3 + O_3L,$$

где $OC = R$, $O_3L = r$.

Принимая во внимание, что $OO_3 = O_2H_2$ и $O_2D_1 = r + \Delta_{из}$, из треугольника $O_2H_2D_1$ найдем

$$O_2H_2 = OO_3 = (r + \Delta_{из})/\sin\beta.$$

Окончательно имеем

$$h = R - \frac{r + \Delta_{из}}{\sin\beta} + r. \quad (1.58)$$

Порядок расчета секторной жилы:

1. Задаем площадь поперечного сечения токопроводящей жилы S , радиус закругления сектора r и толщину изоляции $\Delta_{из}$.
2. Задаем приближенное значение $R = \sqrt{S}$
3. Вычисляем угол γ по формуле (1.57).
4. Определяем a по формуле (1.54).
5. Вычисляем сечение S_p по формуле (1.53). Сравниваем рассчитанное значение S_p с заданным S . В том случае, если рассчитанное значение S_p меньше заданного S , произвольно увеличиваем R на некоторую небольшую величину и повторяем расчет с пункта 3 до тех пор, пока S_p не будет равно S с наперед заданной точностью.
6. Вычисляем высоту h и ширину b сектора.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В КАБЕЛЕ

Для расчета электрического поля в кабеле применим теорему Остроградского – Гаусса, которая в интегральной форме имеет вид

$$N = \oint_S D dS = \sum q, \quad (2.1)$$

т.е. поток (N) вектора электрического смещения (D) через замкнутую поверхность (S) равен сумме зарядов (q), расположенных в объеме, ограниченном этой поверхностью.

Теорема Остроградского – Гаусса связывает значения вектора электрического смещения в точках некоторой замкнутой поверхности с величиной заряда, находящегося внутри объема, ограниченного этой поверхностью. Можно придать этой теореме такую форму, чтобы в нее входили величины, относящиеся к одной и той же точке поля.

Введем прямоугольную систему координат x, y, z (рис. 2.1) и обозначим вектор электрического смещения в некоторой точке $a(x, y, z)$ через $D (D_x, D_y, D_z)$. Рассмотрим бесконечно малый прямоугольный параллелепипед с вершиной в точке a и ребрами dx, dy, dz . Поток через плоскость $dydz$ (заштрихована), проходящую через точку a , есть $-D_x dydz$ (знак минус поставлен потому, что внешняя нормаль к плоскости $dydz$ и положительное направление вектора D_x составляют угол $\alpha = \pi$ и $\cos \alpha = -1$). Поток через параллельную ей грань, смещенную вдоль оси x на dx , есть

$$N_x = \left(D_x + \frac{\partial D_x}{\partial x} dx \right) dydz.$$

Поток через обе грани

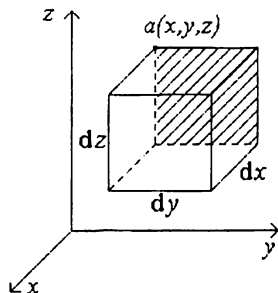


Рис. 2.1. Элементарный объем

$$\left(D_x + \frac{\partial D_x}{\partial x} dx \right) dydz - D_x dydz = \frac{\partial D_x}{\partial x} dx dydz = \frac{\partial D_x}{\partial x} dV,$$

где $dV = dx dydz$ – объем параллелепипеда.

Вычисляя аналогичным образом потоки через другие две пары граней и складывая их, мы получаем полный поток через всю поверхность параллелепипеда:

$$N = \left(\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \right) dV \quad (2.2)$$

Если в рассматриваемом пространстве имеется распределенный в объеме заряд с объемной плотностью ρ , то величина заряда, содержащегося в объеме параллелепипеда, равна ρdV . Приравняв поток вектора D к заряду, получим

$$\left(\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \right) dV = \rho dV \quad \text{или} \quad \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho. \quad (2.3)$$

Это соотношение, выражающее теорему Остроградского – Гаусса в дифференциальной форме, носит название уравнения Пуассона – $\operatorname{div} D = \rho$, где

$$\operatorname{div} D = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint D dS}{V}. \quad (2.4)$$

Предел отношения потока вектора через замкнутую поверхность S к величине объема V , ограниченного поверхностью S , при $V \rightarrow 0$ называется расхождением или дивергенцией вектора.

Используя выражение $D = \epsilon \epsilon_0 E$, получим

$$\frac{\partial(\epsilon_0 \epsilon_x E_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\epsilon_0 \epsilon_y E_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\epsilon_0 \epsilon_z E_z)}{\partial z} = \rho. \quad (2.5)$$

Если диэлектрическая проницаемость не зависит от координат ($\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon$), то уравнение Пуассона примет вид

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (2.6)$$

Нам предстоит решать общую задачу электростатики, т.е. по заданной форме проводников, их расположению и значению их потенциалов нахо-

дить значение потенциалов в любой точке между проводниками. Математически эта задача сводится к следующему. Составляющие напряженности поля E по координатам можно выразить через потенциал:

$$E = -\text{grad } U \text{ или } E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}. \quad (2.7)$$

Подставив эти значения в уравнение Пуассона, получим

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (2.8)$$

В изоляции кабелей нет свободных зарядов, поэтому

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad \text{или} \quad \nabla^2 U = 0. \quad (2.9)$$

Это уравнение называется уравнением Лапласа.

2.1. Распределение напряженности электрического поля и напряжения по толщине изоляции в кабеле переменного тока

Рассмотрим простейший случай. На рис. 2.2 изображен кабель с токопроводящей жилой радиусом r_1 , радиусом по изоляции r_2 ; между r_2 и r_1 находится изоляция. Напряжение U_0 приложено между жилой и экраном, который находится на изоляции. Изоляция однородна ($\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon$), объемные заряды отсутствуют ($\rho = 0$). Необходимо найти распределение напряжения U и напряженности E электрического поля между жилой и экраном. Воспользуемся уравнением Лапласа в цилиндрической системе координат:

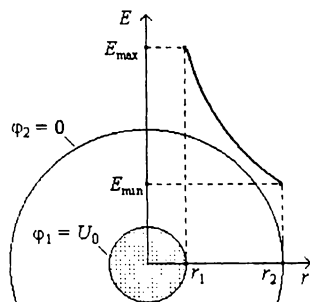


Рис. 2.2. Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (2.10)$$

Напряжение по углу φ не изменяется, поэтому

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0.$$

Вдоль кабеля по оси z напряжение также не изменяется, поэтому

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0.$$

Следовательно, уравнение (2.10) примет вид

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) = 0. \quad (2.11)$$

Уравнение

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

справедливо в случае, если $r \partial U / \partial r$ равно постоянной величине A :

$$r \frac{\partial U}{\partial r} = A. \quad (2.12)$$

Разделим переменные и проинтегрируем:

$$dU = \frac{A}{r} dr, \quad \int_{U_0}^0 dU = \int_{r_1}^{r_2} \frac{A}{r} dr.$$

Выразим A :

$$A = -\frac{U_0}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (2.13)$$

Подставим A в выражение (2.12):

$$r \frac{dU}{dr} = -\frac{U_0}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (2.14)$$

Преобразуем это выражение:

$$-\frac{dU}{dr} = \frac{U_0}{r \ln(r_2/r_1)},$$

с учетом

$$E = -\frac{dU}{dr},$$

окончательно получим

$$E = \frac{U_0}{r \ln(r_2/r_1)}. \quad (2.15)$$

Из уравнения (2.15) следует, что напряженность электрического поля изменяется по гиперболическому закону, причем (из условия $r_1 < r_2$) максимальная напряженность будет на жиле (см. рис. 2.2):

$$E_{\max} = \frac{U_0}{r_1 \ln(r_2/r_1)}, \quad (2.16)$$

а минимальная напряженность – на изоляции:

$$E_{\min} = \frac{U_0}{r_2 \ln(r_2/r_1)}. \quad (2.17)$$

Возьмем выражение (2.14):

$$r \frac{dU}{dr} = -\frac{U_0}{\ln(r_2/r_1)},$$

разделим переменные:

$$dU = -\frac{U_0}{r \ln(r_2/r_1)} dr,$$

интегрируем:

$$\int_{U_0}^U dU = -\frac{U_0}{\ln(r_2/r_1)} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r},$$

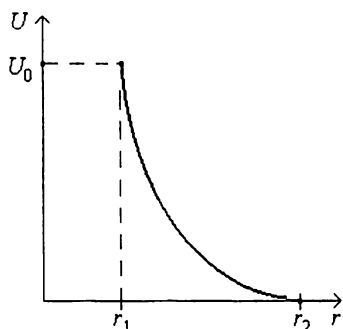


Рис. 2.3. Распределение напряжения в изоляции кабеля

$$U|_{r=r_1}^U = -\frac{U_0}{\ln(r_2/r_1)} \ln r|_{r_1}^r,$$

$$U - U_0 = -\frac{U_0}{\ln(r_2/r_1)} \ln \frac{r}{r_1}.$$

Окончательно получаем

$$U = U_0 \left(1 - \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} \right). \quad (2.18)$$

Из формулы (2.18) видно, что напряжение в изоляции кабеля изменяется по логарифмическому закону (рис. 2.3).

2.2. Расчет толщины изоляции кабеля переменного тока с круглой жилой и цилиндрическим экраном

Определим, при каком соотношении радиусов r_2/r_1 напряженность электрического поля на токопроводящей жиле $E_{\text{ж}}$ будет наименьшей. Для этого необходимо взять производную по r_2/r_1 и приравнять ее к нулю. Обозначим r_2/r_1 через x и E_{max} через $E_{\text{ж}}$ – напряженность электрического поля на жиле. Умножим на r_2 числитель и знаменатель уравнения (2.16), получим

$$E_{\text{ж}} = \frac{r_2 U_0}{r_2 r_1 \ln(r_2/r_1)}. \quad (2.19)$$

Заменим отношение радиусов r_2/r_1 на x :

$$E_{\text{max}} = \frac{Ux}{r_2 \ln x}. \quad (2.20)$$

Продифференцируем выражение (2.20) по x и приравняем его к нулю для нахождения минимума функции:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{Ux}{r_2 \ln x} \right) = \frac{U}{r_2} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{x}{\ln x} \right) = \frac{U}{r_2} \cdot \frac{\ln x - 1}{(\ln x)^2} = 0. \quad (2.21)$$

Выражение

$$\frac{U}{r_2} \cdot \frac{\ln x - 1}{(\ln x)^2} = 0 \quad (2.22)$$

справедливо в том случае, если числитель равен нулю: $\ln x - 1 = 0$, $\ln x = 1$, $x = e^1$, $r_2/r_1 = e$.

Таким образом, кабель с соотношением радиусов по изоляции и жиле, равным e , имеет наименьшую напряженность электрического поля на жиле $E_{\text{ж}}$ по сравнению с кабелями, имеющими другое значение r_2/r_1 (рис. 2.4).

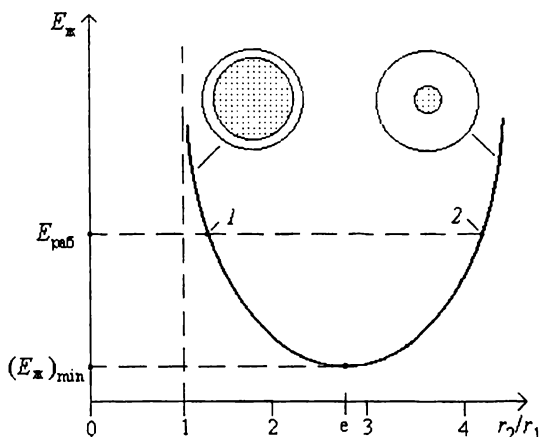


Рис. 2.4. Зависимость напряженности электрического поля от соотношения радиусов изоляции r_2 и жилы r_1

Определим коэффициент использования изоляции:

$$\eta = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{max}}}, \quad (2.23)$$

где $E_{\text{ср}} = U_0/(r_2 - r_1)$ – средняя напряженность электрического поля.

Коэффициент использования изоляции для кабеля с круглой токопроводящей жилой

$$\eta = \frac{U_0}{r_2 - \eta} \bigg/ \frac{U_0 \ln \frac{r_2}{\eta}}{\eta} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{\eta}{r_2 - \eta} \ln \frac{r_2}{\eta}. \quad (2.24)$$

Разделим выражение (2.24) на r_1 :

$$\eta = \frac{1}{r_2/\eta - 1} \ln \frac{r_2}{\eta}. \quad (2.25)$$

Для соотношения радиусов $r_2/r_1 = e$ получим $\eta = 0,58$. Это низкий коэффициент использования изоляции, поэтому соотношение радиусов $r_2/r_1 = e$ применяется редко.

На рис. 2.4 видно, что выбранная какая-либо напряженность электрического поля $E_{\text{раб}}$ пересечет кривую в двух точках. Это означает, что при одной и той же рабочей напряженности электрического поля можно рассчитать две конструкции. Выбор той или иной конструкции определяется коэффициентом использования изоляции. Конструкция 1 будет иметь больший коэффициент использования изоляции, чем конструкция 2.

Расчет геометрических размеров кабеля производится таким образом, чтобы напряженность электрического поля у жилы не превышала определенного значения. Это значение зависит от вида материала изоляции и типа кабеля. В табл. 2.1 представлены длительно допустимые рабочие напряженности электрического поля в изоляции кабелей переменного тока. При таких значениях напряженности не возникают ионизационные процессы в изоляции кабелей, и они работают 20–30 лет.

Определим толщину изоляции, для этого выразим из (2.16) радиус r_2

$$r_2 = \eta e^{\frac{U_0}{E_{\text{макс}} r_1}}. \quad (2.26)$$

Радиус r_1 определяется из сечения S токопроводящей жилы:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi f}} \quad (2.27)$$

где f – коэффициент заполнения жилы.

Длительно допустимые рабочие напряженности электрического поля
в изоляции кабелей

№ п/п	Изоляция	Марка кабеля	Класс напряжения, кВ	Допустимая напряжен- ность, кВ/мм
1	Полиэтилен	ПВ	До 35	2,9–3,1
2	Сшитый полиэтилен	ПвП	10	1,6–1,9
3	Сшитый полиэтилен	ПвП	110	6,1–6,9
4	Бумага, пропитанная вязким маслосканифоль- ным составом	ААШв	6, 10	2,6–2,8
5	Бумага, пропитанная вязким маслосканифоль- ным составом	ОСБ	20, 35	3,2–3,3
6	Бумага, пропитанная маслом под низким дав- лением 0,6–3 атм	МНСК	110, 220	8–10
7	Бумага, пропитанная маслом под высоким давлением (11–16 атм)	МВДТ	220, 330, 500	13–16

Напряжение U_0 зависит от класса напряжения и режима работы нейтрали. Класс напряжения – это номинальное линейное напряжение на приемнике электроэнергии. На генераторе энергии напряжение выше на величину: 1,15 для классов напряжения 1–220 кВ; 1,1 для 330 кВ и 1,05 для 500 кВ и более.

Кабели на напряжения от 1 до 35 кВ работают с изолированной или резонансно заземленной нейтралью, поэтому при однофазном коротком замыкании на землю напряжение на неповрежденных фазах возрастает до линейного. Следовательно, расчет изоляции необходимо вести на линейное напряжение $U_0 = U_{\text{л}}$. Кабели на напряжения от 110 кВ и более работают с заземленной нейтралью, поэтому при однофазном коротком замыкании на землю происходит отключение и напряжение на фазах не может быть больше фазного: $U_0 = U_{\text{ф}}$.

Напряженность электрического поля на токопроводящей жиле имеет равнозначные названия: E_{max} – максимальная, $E_{\text{раб}}$ – рабочая, $E_{\text{доп}}$ – допустимая, их значения берутся из литературы.

$$\Delta_{\text{из}} = r_2 - r_1. \quad (2.28)$$

Сделаем сравнительный анализ расчета двух конструкций кабелей (табл. 2.2). Примем допустимую напряженность электрического поля у жилы $E_{\text{доп}} = 3 \text{ кВ/мм}$. Для варианта 1 отношение радиуса по изоляции к радиусу жилы $r_2/r_1 = e$; для варианта 2 отношение радиусов больше e , $r_2/r_1 > e$. Будем изменять радиус жилы от 5 до 30 мм.

Вариант 1 соответствует соотношению радиусов, когда напряженность на жиле минимальна. Кабель с радиусом жилы 5 мм при напряженности $E_{\text{доп}} = 3 \text{ кВ/мм}$ может работать только до напряжения 15 кВ, а при радиусе 30 мм – до напряжения 90 кВ. Для увеличения рабочего напряжения нужно увеличивать либо r_1 , либо $E_{\text{доп}}$.

Таблица 2.2

Сравнительный анализ расчета двух конструкций кабелей

Вариант 1 $r_2/r_1 = e; \quad U_0 = E_{\text{доп}} r_1$			Вариант 2 $\frac{r_2}{r_1} > e; \quad E = \frac{U_0}{r_1 \ln(r_2/r_1)}$	
$r_1, \text{ мм}$	$r_2, \text{ мм}$	$U_0, \text{ кВ}$	$U_0, \text{ кВ}$	$r_2, \text{ мм}$
5	13,6	15 ↓	90	2017
10	27,2	30 ↓	90	↑ 200
20	54,4	60 ↓	90	↑ 89
30	81,5	90 →	90 →	↑ 81

Поставим себе целью все конструкции рассчитать на напряжение $U_0 = 90 \text{ кВ}$, т.е. вычислим радиус по изоляции r_2 . Передвигаясь по табл. 2.2 (вариант 2) снизу вверх, мы видим, что радиус r_2 быстро растет от 81 мм до нереальной величины – 2017 мм. Ясно, что кабеля с таким радиусом быть не может. Для уменьшения r_2 необходимо увеличить или r_1 , или $E_{\text{доп}}$, или и то и другое вместе.

Сопротивление изоляции

Выделим в изоляции кабеля на расстоянии r от его центра элементарный цилиндрический слой (рис. 2.5) толщиной Δr и длиной L .

Сопротивление $\Delta R_{\text{из}}$ элементарного слоя толщиной Δr прямо пропорционально удельному объемному сопротивлению ρ , толщине Δr и обратно пропорционально площади цилиндрической поверхности $S = 2\pi rL$, через которую протекает ток:

$$\Delta R_{\text{из}} = \rho \frac{\Delta r}{S} = \rho \frac{\Delta r}{2\pi rL}. \quad (2.29)$$

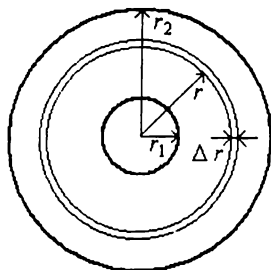


Рис. 2.5. Сопротивление изоляции

Общее сопротивление всей изоляции представляет собой сумму последовательно соединенных сопротивлений элементарных слоев:

$$R_{\text{из}} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{или} \quad R_{\text{из}} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.30)$$

Емкость кабеля

Емкость кабеля найдем из соотношений

$$C = \frac{Q}{U_0}, \quad Q = DS, \quad D = \epsilon \epsilon_0 E, \quad S = 2\pi rL, \quad (2.31)$$

где Q – заряд; D – вектор электрического смещения; S – площадь цилиндрической поверхности; L – длина; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; $E = U_0 / (r \ln(r_2/r_1))$ – напряженность электрического поля в кабеле с круглой токопроводящей жилой.

После преобразования формул (2.31) получим

$$C = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0 L}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (2.32)$$

Формула (2.32) справедлива для цилиндрических электродов и для изоляции с однородной диэлектрической проницаемостью.

Диэлектрические потери

Диэлектрические потери P_d – это потери полезной мощности в изоляции за счет активного тока I_a . Отношение активного тока в диэлектрике к

емкостному току I_c есть тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c}. \quad (2.33)$$

Активный ток

$$I_a = I_c \operatorname{tg} \delta.$$

Выразим I_c через напряжение и емкостное сопротивление, тогда

$$I_a = \frac{U}{X_c} \operatorname{tg} \delta \quad \text{или} \quad I_a = \omega C U \operatorname{tg} \delta.$$

Умножим последнее выражение на напряжение U , получим

$$U I_a = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \quad \text{или} \quad P_d = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta. \quad (2.34)$$

Диэлектрические потери пропорциональны квадрату напряжения.

2.3. Регулирование электрического поля с помощью диэлектрической проницаемости

В кабелях переменного тока напряженность электрического поля с увеличением радиуса падает по гиперболическому закону. При этом коэффициент использования изоляции меньше 1. Поставим перед собой задачу сконструировать такой кабель, чтобы напряженность электрического поля в изоляции не изменялась с изменением радиуса, т.е. чтобы коэффициент использования изоляции был равен единице ($\eta = 1$). Регулирование электрического поля с помощью диэлектрической проницаемости называется *градированием изоляции*.

Воспользуемся теоремой Остроградского – Гаусса

$$DS = Q. \quad (2.35)$$

Подставим в уравнение (2.35) $D = \epsilon \epsilon_0 E$ и $S = 2\pi r L$ и выразим E :

$$E = \frac{Q}{2\pi r L \epsilon \epsilon_0}. \quad (2.36)$$

Напряженность E зависит от радиуса r и диэлектрической проницаемости ϵ . Заряд Q находится на жиле и не зависит от радиуса, поэтому при интегрировании напряженности по радиусу он может быть вынесен за знак интеграла.

Интегрируя напряженность E по радиусу r , получим напряжение

$$U_0 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{2\pi r L \epsilon \epsilon_0} dr. \quad (2.37)$$

Вынесем из-под знака интеграла величины, которые не зависят от радиуса:

$$U_0 = \frac{Q}{2\pi L \epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \epsilon}. \quad (2.38)$$

Подставим в (2.38) Q :

$$U_0 = \frac{2\pi r E \epsilon \epsilon_0 L}{2\pi L \epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \epsilon}. \quad (2.39)$$

После сокращения имеем

$$U_0 = E r \epsilon \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \epsilon}. \quad (2.40)$$

Из (2.40) выразим напряженность:

$$E = \frac{U_0}{r \epsilon \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \epsilon}}. \quad (2.41)$$

В том случае, если произведение ϵr равно постоянной величине a , после интегрирования имеем

$$E = \frac{U_0}{a \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{a}} \quad \text{или} \quad E = \frac{U_0}{r_2 - r_1}. \quad (2.42)$$

Таким образом, при выполнении условия $\epsilon r = \text{const}$ напряженность не зависит от радиуса и равна средней напряженности, коэффициент использования изоляции $\eta = 1$. Изготовление кабеля с плавно меняющимся значением ϵ представляет собой сложную технологическую задачу. Проще изготовить изоляцию со ступенчатым изменением ϵ . Например, на рис. 2.6 представлено распределение диэлектрической проницаемости в изоляции, состоящей из трех слоев. Ломаная кривая тем ближе сходится с непрерывной кривой, чем больше слоев в изоляции.

Рассмотрим простейший случай (рис. 2.7). В изоляции кабеля имеется два слоя с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 .

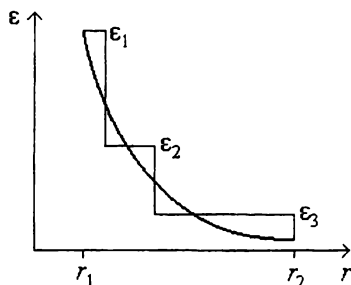


Рис. 2.6. Распределение диэлектрической проницаемости по радиусу

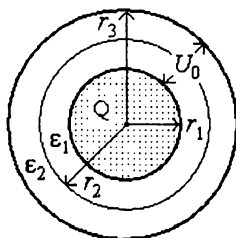


Рис. 2.7. Двухслойная изоляция

Возьмем выражение для напряжения (2.40), распишем интеграл через сумму двух интегралов и проинтегрируем:

$$U_0 = E r \epsilon \int_{r_1}^{r_3} \frac{dr}{r \epsilon} = E r \epsilon \left(\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \epsilon_1} + \int_{r_2}^{r_3} \frac{dr}{r \epsilon_2} \right) = E r \epsilon \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right). \quad (2.43)$$

Выразим напряженность:

$$E = \frac{U_0}{r\epsilon \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right]}. \quad (2.44)$$

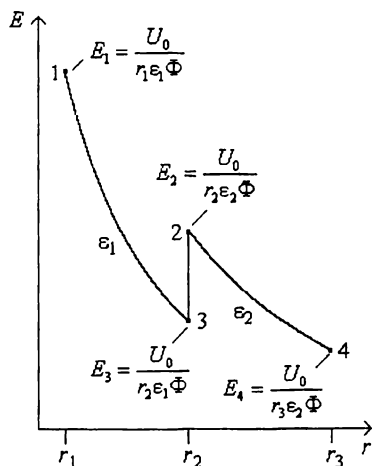
Сделаем замену:

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2}, \quad \text{тогда} \quad E = \frac{U_0}{r\epsilon\Phi}. \quad (2.45)$$

Точки 1 и 3 (рис. 2.8) лежат в слое с диэлектрической проницаемостью, равной ϵ_1 . На радиусе r_2 происходит скачок напряженности, так как $\epsilon_1 > \epsilon_2$. Точки 2 и 4 лежат в слое с диэлектрической проницаемостью, равной ϵ_2 .

Найдем отношение напряженностей электрических полей в точках 1 и 2:

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{E_2} &= \frac{U_0}{r_1\epsilon_1\Phi} \cdot \frac{r_2\epsilon_2\Phi}{U_0}, \\ \frac{E_1}{E_2} &= \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \end{aligned} \quad (2.46)$$



Введем обозначения:

$$k = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}, \quad \frac{E_1}{E_2} = f, \quad (2.47)$$

Рис. 2.8. Распределение напряженности электрического поля по толщине изоляции для кабеля с двухслойной изоляцией

откуда

$$r_2 = r_1 k f \quad (2.48)$$

По формуле (2.48) рассчитывается радиус первого слоя. Как видно из формул (2.48) и (2.47), он зависит только от отношения диэлектрических проницаемостей и отношения допустимых напряженностей электрического поля ($E_1 = E_{1\text{доп}}$, $E_2 = E_{2\text{доп}}$) и не зависит от напряжения.

Воспользуемся формулой (2.45) для точки 1:

$$E_1 = \frac{U_0}{\eta \epsilon_1 \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{\eta} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right]}. \quad (2.49)$$

Внесем ϵ_1 в квадратные скобки и, используя формулу (2.48) в виде $kf = r_2/\eta$, а также $k = \epsilon_1/\epsilon_2$, получим

$$E_1 = \frac{U_0}{\eta \left[\ln(kf) + k \ln \frac{r_3}{r_2} \right]}. \quad (2.50)$$

Выразим радиус r_3 , для этого запишем последнюю формулу в следующем виде:

$$\ln(kf) + k \ln \frac{r_3}{r_2} = \frac{U_0}{\eta E_1}, \quad (2.51)$$

перенесем первое слагаемое в правую часть, получим

$$k \ln \frac{r_3}{r_2} = \frac{U_0}{\eta E_1} - \ln(kf), \quad \ln \frac{r_3}{r_2} = \frac{U_0}{k\eta E_1} - \frac{\ln(kf)}{k},$$

после потенцирования окончательно имеем

$$r_3 = r_2 \exp \left[\frac{1}{k} \cdot \left(\frac{U_0}{\eta E_1} - \ln(kf) \right) \right]. \quad (2.52)$$

За счет того, что $\epsilon_1 > \epsilon_2$, происходит скачок; площадь под кривой есть напряжение (см. (2.37)).

Существуют два способа градирования. В первом способе уменьшается напряженность электрического поля без изменения геометрических раз-

меров кабеля (рис. 2.9, а); во втором способе уменьшается радиус кабеля с сохранением прежней напряженности электрического поля (рис. 2.9, б).

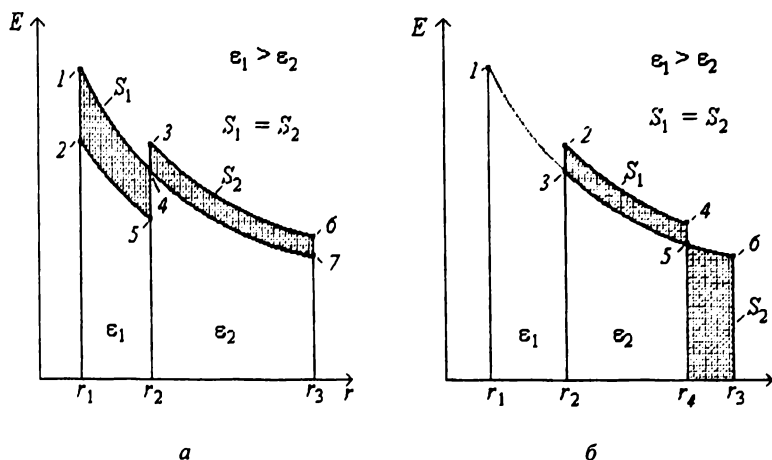


Рис. 2.9. Первый (а) и второй (б) способы градирования изоляции кабеля

До градирования (см. рис. 2.9, а) напряженность электрического поля изменялась по кривой 1–4–7. После градирования напряженность на жиле (т. 1) уменьшилась (т. 2). Напряжение в первом слое уменьшилось на величину, пропорциональную площади S_1 , во втором слое напряжение возросло на S_2 , причем $S_1 = S_2$, так как суммарное напряжение осталось U_0 . После градирования напряженность изменяется по кривой 2–5–3–6.

До градирования по второму способу (см. рис. 2.9, б) напряженность распределялась по кривой 1–б. После градирования напряженность на жиле (т. 1) осталась без изменений, однако радиус кабеля уменьшился от r_3 до r_4 . После градирования напряженность распределялась по кривой 1–3–2–4. Напряжение на кабеле осталось равным U_0 , поэтому $S_1 = S_2$.

2.4. Электрическое поле в кабеле с тремя круглыми жилами

Определим напряженность электрического поля в кабеле с тремя круглыми незкранированными жилами (рис. 2.10) для двух случаев, когда напряженность достигает максимального значения: для времени t_1 и t_2 (рис. 2.11).

В момент времени t_1 напряжение на фазе 1 равно нулю, напряжение между фазами 2 и 3 равно линейному (U_n).

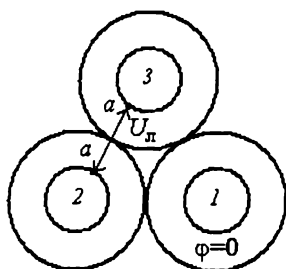


Рис. 2.10. Напряжение в момент времени t_1

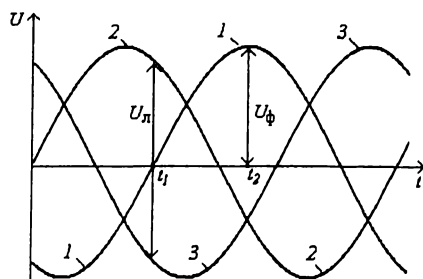


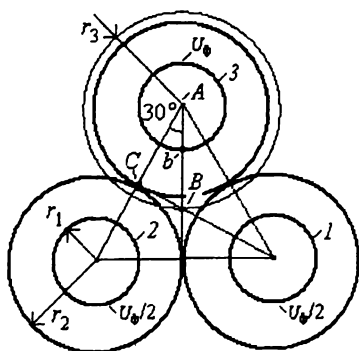
Рис. 2.11. Изменение напряжения на фазах кабеля

Напряженность в точке a (см. рис. 2.10) определим по формуле для напряженности двухпроводной линии:

$$E_a = \frac{U_\pi \sqrt{\frac{N+1}{N-1}}}{2\eta \ln(N + \sqrt{N^2 - 1})}, \quad (2.53)$$

где $N = r_2 / r_1$.

В момент времени t_2 (см. рис. 2.11) напряжение на фазе 1 равно фазному (U_ϕ), напряжения на фазах 2 и 3 равны между собой. Напряженность в точке b (рис. 2.12) определим по формуле для напряженности коаксиального кабеля (2.16) с радиусом r_3 :



$$E_b = \frac{U_\phi}{\eta \ln(r_3 / r_1)}. \quad (2.54)$$

Радиус r_3 найдем из треугольника ABC (см. рис. 2.12):

$$\cos 30^\circ = \frac{r_2}{r_3} = \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad r_3 = \frac{2r_2}{\sqrt{3}}. \quad (2.55)$$

Рис. 2.12. Электрическое поле в момент времени t_2

С учетом (2.54) формула (2.53) примет вид

$$E_b = \frac{U_\Phi}{\eta \ln \frac{2r_2}{\sqrt{3}\eta}} = \frac{U_\Phi}{\eta \ln \frac{1,15r_2}{\eta}}. \quad (2.56)$$

Следует иметь в виду, что формулы (2.53) и (2.56) были получены без учета влияния оболочки кабеля.

2.5. Электрическое поле в кабеле с секторными жилами

В кабеле с секторными жилами напряженность электрического поля рассчитывается в трех точках: a , b и c (рис. 2.13).

Напряженность в точке a приближенно равна напряженности между двумя круглыми проводниками (2.55):

$$E_a = \frac{U_\Phi \sqrt{\frac{N+1}{N-1}}}{2\eta \ln(N + \sqrt{N^2 - 1})}, \quad (2.57)$$

где $N = (\eta + \Delta_\Phi) / \eta$

Напряженность в точке b приближенно равна напряженности между тремя круглыми проводниками (2.56):

$$E_b = \frac{U_\Phi}{\eta \ln \frac{1,15r_2}{\eta}}, \quad (2.58)$$

где $r_2 = r_1 + \Delta_\Phi$.

Напряженность в точке c равна напряженности между коаксиальными цилиндрами (2.16):

$$E_c = \frac{U_\Phi}{R \ln \frac{R + \Delta_\Phi + \Delta_\Pi}{R}}, \quad (2.59)$$

где Δ_Φ — толщина фазной изоляции; Δ_Π — толщина поясной изоляции.

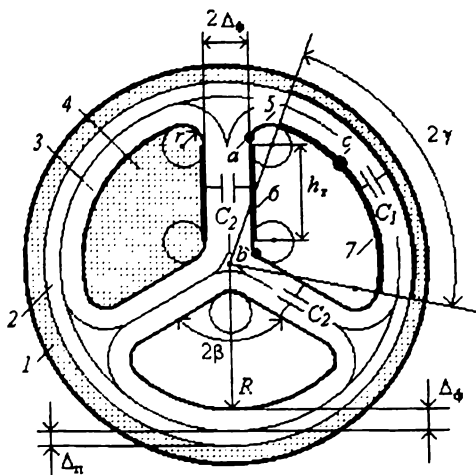


Рис. 2.13. Кабель с секторными жилами: 1 — металлическая оболочка; 2 — поясная изоляция; 3 — фазная изоляция; 4 — токопроводящая жила; 5 — ребро сектора; 6 — грань; 7 — дуга

Емкость C одной жилы по отношению к двум другим и оболочке:

$$C = C_1 + 2C_2. \quad (2.60)$$

Емкость C_1 – это емкость части цилиндрического конденсатора с углом 2γ :

$$C_1 = \frac{2\gamma\epsilon\epsilon_0 L}{\ln \frac{R + \Delta_\phi + \Delta_\pi}{R}}, \quad (2.61)$$

где L – длина кабеля.

Емкость C_2 – это емкость, образованная параллельными гранями секторов. Вернемся к рис. 1.15, отрезок $ED = O_3O_2$ – это параллельная грань сектора, обозначим ее длину на рис. 2.13 через h_T . Из треугольника O_3O_2W найдем $O_3O_2 = a/\sin \beta$, где $a = (R - r)\sin \gamma$ (см. (1.54)), получим

$$h_T = \frac{(R - r)\sin \gamma}{\sin \beta} \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{\epsilon\epsilon_0}{2\Delta_\phi} h_T L. \quad (2.62)$$

В формуле (2.60) не учтены емкости, образованные ребрами сектора, однако ошибка мала, так как $r \ll R$.

2.6. Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля постоянного тока

Согласно закону Ома плотность тока

$$j = \gamma E, \quad (2.63)$$

где E – напряженность электрического поля; γ – проводимость изоляции.

На расстоянии r ток через кольцевой слой (рис. 2.14)

$$I = jS, \quad (2.64)$$

где $S = 2\pi rL$ – площадь цилиндрической поверхности, через которую протекает ток I .

Подставив S в выражение (2.64), получим

$$I = j \cdot 2\pi r L. \quad (2.65)$$

Из закона Ома напряженность поля

$$E = \frac{j}{\gamma} = \frac{I}{S\gamma} = \frac{I}{2\pi r L \gamma}. \quad (2.66)$$

Интегрируя напряженность от r_1 до r_2 , получим напряжение

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I}{2\pi r L \gamma} dr \quad (2.67)$$

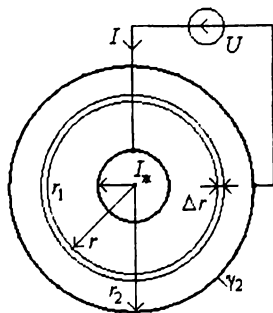


Рис. 2.14. Кабель постоянного тока

Ток I , протекающий во внешней цепи, является конкретным числом, не зависит от радиуса r , поэтому может быть вынесен за знак интеграла.

Следует отметить, что от радиуса зависит плотность тока $j=I/2\pi r$. Удельная проводимость изоляции зависит как от температуры, так и от напряженности электрического поля. Температура и напряженность электрического поля изменяются по радиусу, поэтому γ оставляем под интегралом:

$$U = \frac{I}{2\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r\gamma} \quad (2.68)$$

Подставим в формулу (2.68) формулу (2.65) и произведем сокращения:

$$U = \frac{E \cdot 2\pi r L \gamma}{2\pi L} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r\gamma}, \quad U = E r \gamma \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r\gamma}. \quad (2.69)$$

Выразим из (2.69) напряженность:

$$E = \frac{U}{r \gamma \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r\gamma}}. \quad (2.70)$$

В изоляции у оболочки напряженность электрического поля

$$E_2 = \frac{U}{r_2 \gamma_2 \int_{r_1}^{\frac{r_2}{r}} \frac{dr}{r \gamma}}. \quad (2.71)$$

Разделив (2.70) на (2.71), получим

$$\frac{E}{E_2} = \frac{r_2 \gamma_2}{r \gamma}. \quad (2.72)$$

Если имеется диэлектрик, проводимость которого зависит от температуры и напряженности электрического поля, то две точки диэлектрика связаны соотношением:

$$\gamma_x = \gamma_0 e^{a\theta \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^k} \quad (2.73)$$

где θ – перепад температур; a – температурный коэффициент удельного объемного сопротивления; k – величина, которая зависит от типа диэлектрика.

Применим формулу (2.73), свяжем проводимость в любой точке изоляции γ с проводимостью γ_2 на радиусе r_2 , т.е. на поверхности изоляции:

$$\gamma = \gamma_2 e^{a\theta \left(\frac{E}{E_2} \right)^k} \quad (2.74)$$

где E – напряженность электрического поля в любой точке изоляции; E_2 – напряженность электрического поля на радиусе r_2 .

Определим перепад температур из теплового закона Ома:

$$P = \frac{\theta}{S_{\text{из}}} \quad \text{или} \quad \theta = P S_{\text{из}}, \quad (2.75)$$

где P – тепловой поток, идущий от токопроводящей жилы, $S_{\text{из}}$ – тепловое сопротивление изоляции.

Тепловое сопротивление $\Delta S_{\text{из}}$ элементарного слоя Δr (см. рис. 2.14) прямо пропорционально удельному тепловому сопротивлению изоляции $\sigma_{\text{из}}$, толщине слоя Δr и обратно пропорционально площади поверхности $S = 2\pi rL$:

$$\Delta S_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{из}} \Delta r}{2\pi rL}. \quad (2.76)$$

Интегрируя (2.76) от произвольного радиуса r до r_2 , получим зависимость теплового сопротивления изоляции от радиуса относительно r_2 :

$$S_{\text{из}} = \int_r^{r_2} \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi rL} dr = \frac{\sigma_{\text{из}}}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r}. \quad (2.77)$$

Подставив (2.77) в (2.75), получим

$$\theta = \frac{P\sigma_{\text{из}}}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r}. \quad (2.78)$$

Подставим в уравнение (2.74)

$$\frac{E}{E_2} = \frac{r_2 \gamma_2}{r \gamma} \quad \text{и} \quad \theta = \frac{P\sigma_{\text{из}}}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r},$$

получим

$$\gamma = \gamma_2 \exp\left(\frac{aP\sigma_{\text{из}}}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r}\right) \cdot \left(\frac{r_2 \gamma_2}{r \gamma}\right)^k \quad (2.79)$$

Введем обозначение

$$\frac{aP\sigma_{\text{из}}}{2\pi L} = b \quad (2.80)$$

и выполним преобразование:

$$\exp\left(b \ln \frac{r_2}{r}\right) = \exp\left(\ln \left(\frac{r_2}{r}\right)^b\right) = \left(\frac{r_2}{r}\right)^b$$

Тогда формула (2.79) запишется следующим образом:

$$\gamma = \gamma_2 \left(\frac{r_2}{r} \right)^b \left(\frac{r_2}{r} \right)^k \frac{\gamma_2^k}{\gamma^k}.$$

Сделаем некоторые преобразования и получим

$$\begin{aligned} \gamma \gamma^k &= \left(\frac{r_2}{r} \right)^{b+k} \gamma_2^{k+1}, & \gamma^{k+1} &= \left(\frac{r_2}{r} \right)^{b+k} \gamma_2^{k+1}, \\ \gamma &= \gamma_2 \left(\frac{r_2}{r} \right)^{\frac{b+k}{k+1}} \end{aligned} \quad (2.81)$$

Введем обозначение

$$\frac{b+k}{k+1} = m, \quad (2.82)$$

тогда

$$\gamma = \gamma_2 \left(\frac{r_2}{r} \right)^m \quad (2.83)$$

Возьмем выражение

$$E = \frac{U}{r \gamma \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \gamma}}, \quad (2.84)$$

вычислим отдельно интеграл

$$\begin{aligned} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \gamma} &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial r}{r \gamma_2 \left(\frac{r_2}{r} \right)^m} = \frac{1}{\gamma_2 r_2^m} \int_{r_1}^{r_2} r^{m-1} dr = \\ &= \frac{1}{\gamma_2 r_2^m} \cdot \frac{r^m}{m} \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{r_2^m - r_1^m}{\gamma_2 r_2^m m}, \end{aligned}$$

подставим интеграл обратно в (2.84):

$$E = \frac{U}{r\gamma_2 \left(\frac{r_2}{r}\right)^m} \cdot \frac{\gamma_2 r_2^m}{(r_2^m - r_1^m)} = \frac{U m r^{m-1}}{r_2^m - r_1^m}.$$

Окончательно имеем

$$E = \frac{U m r^{m-1}}{r_2^m - r_1^m}. \quad (2.85)$$

Проанализируем зависимость $E = f(r)$ при различных значениях m (рис. 2.15). Возможны три варианта. В том случае, если $m < 1$, напряженность электрического поля по толщине изоляции убывает; если $m > 1$ — напряженность возрастает, а при $m = 1$ остается постоянной. Во всех случаях площадь под кривой остается постоянной, так как напряжение не изменяется.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть мы имеем кабель (табл. 2.3) с пропитанной бумажной изоляцией (БПИ) и кабель с полиэтиленовой изоляцией (ПЭ).

Вычислим по формуле (2.82)

$$m = \frac{b + k}{k + 1}.$$

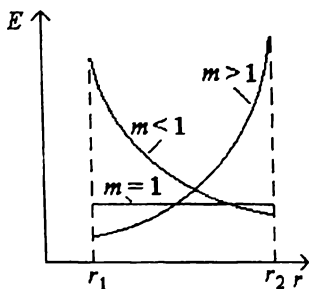


Рис. 2.15. Распределение напряженности электрического поля по толщине изоляции

Таблица 2.3

Сравнительный анализ двух кабелей

Тип изоляции	Слабонагруженный кабель $P \approx 0$			Нагруженный кабель		
	k	b	m	k	b	m
ПБИ	0	≈ 0	≈ 0	0	≈ 3	≈ 3
ПЭ	2,2	≈ 0	$\approx 0,7$	2,2	≈ 3	$\approx 1,5$

В случае пропитанной бумажной изоляции (ПБИ) $k = 0$, т.е. проводимость не зависит от напряженности электрического поля. По формуле (2.80) $b \approx 0$, так как в слабонагруженном кабеле $P \approx 0$. Подставим в (2.82)

k и b , получим $m \approx 0$. Из формулы (2.85) видно, что при $m \approx 0$ величина $r^{m-1} \approx r^{-1}$, т.е. кривая представляет собой гиперболу (рис. 2.16, кривая 1).

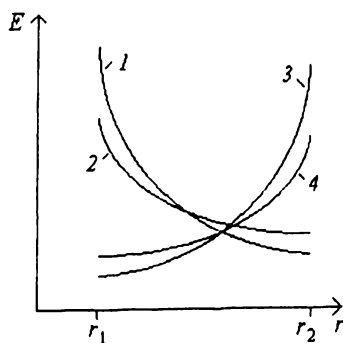


Рис. 2.16. Распределение напряженности электрического поля по толщине изоляции в кабеле постоянного тока: 1 – слаботокопроводящий кабель с пропитанной бумажной изоляцией; 2 – слаботокопроводящий кабель с полиэтиленовой изоляцией; 3 – нагруженный кабель с пропитанной бумажной изоляцией; 4 – нагруженный кабель с полиэтиленовой изоляцией

Для слаботокопроводящего кабеля аналогичные вычисления дадут $b \approx 0,7$. В формуле (2.85) будем иметь $r^{m-1} \approx r^{0,7-1} \approx r^{-0,3}$, т.е. гиперболическая зависимость будет выражена слабее (см. рис. 2.16, кривая 2). В полиэтиленовой изоляции с увеличением напряженности электрического поля проводимость растет ($k = 2,2$), рост проводимости ведет к перераспределению напряженности: ее снижению в местах повышенной напряженности и увеличению в местах пониженной напряженности. Площади под кривыми 1 и 2 (см. рис. 2.16) остаются постоянными, так как напряжение не изменилось.

Для нагруженного кабеля с БПИ (см. табл. 2.3.) напряженность электрического поля растет с увеличением радиуса $r^{m-1} \approx r^{3-1} \approx r^2$ (см. рис. 2.16, кривая 3), для ПЭ изоляции рост слабее: $r^{m-1} \approx r^{1,5-1} \approx r^{0,5}$ (см. рис. 2.16, кривая 4).

Сравнивая распределение напряженности электрического поля в кабелях переменного и постоянного тока, можно сделать следующие выводы. В формуле для расчета напряженности электрического поля в кабелях переменного тока (2.15) отсутствуют свойства среды (диэлектрическая проницаемость), так как при переходе от уравнения (2.8) к (2.9) из-за однородности изоляции ($\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon$) и отсутствия объемных зарядов ($\rho = 0$) произошло сокращение ϵ .

В кабеле постоянного тока распределение напряженности электрического поля по толщине изоляции обусловлено проводимостью, которая, в свою очередь, зависит от температуры и напряженности электрического поля; кроме того, температура неравномерно распределена по толщине изоляции.

3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В КАБЕЛЕ

3.1. Потери полезной мощности в металлических оболочках небронированных кабелей

Рассмотрим механизм возникновения потерь в металлических оболочках кабеля. Пусть каждая фаза имеет свою металлическую оболочку, которая представляет собой цилиндр, охватывающий токопроводящую жилу кабеля. Оболочки могут быть сплошными свинцовыми или алюминиевыми, служащими для герметизации кабеля, а также выполненными в виде обмотки металлическими лентами или проволоками, выполняющими функцию электрического экрана.

На рис. 3.1 представлена электрическая схема, включающая в себя генератор 7, три однофазных кабеля 8 в металлической оболочке и приемник электрической энергии 9. Оболочки кабеля на концах (точки 1, 2, 3, 4, 5 и 6 на рис. 3.1) заземлены по условиям техники безопасности.

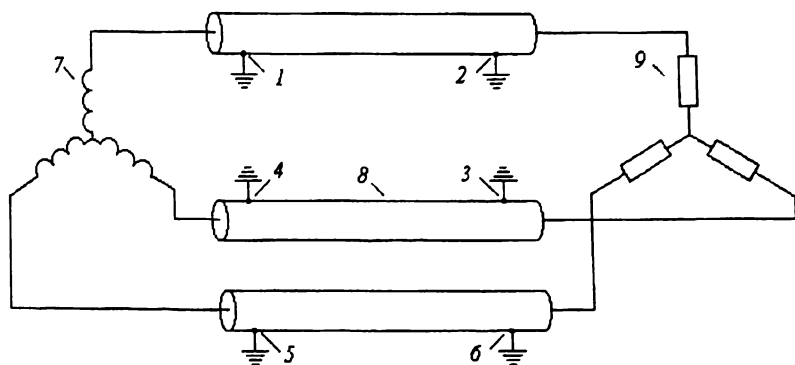


Рис. 3.1. Электрическая схема трехфазного кабеля с металлическими оболочками: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – точки заземления оболочек; 7 – генератор; 8 – кабель; 9 – приемник электроэнергии

Для упрощения вывода рассмотрим только две фазы (рис. 3. 2). Объединим две обмотки генератора и обозначим их как однофазный генератор. Два сопротивления нагрузки заменим одним эквивалентным. Замкнем точки 1 и 4, так как они имеют одинаковый (нулевой) потенциал, а также точки 2 и 3. Точка 1 находится на значительном расстоянии от точки 2, а точка 4 от 3, и между ними располагается хорошо проводящая оболочка, поэтому их не замыкаем.

Далее заменим оболочки кабеля проводниками эквивалентного сечения (проводник 1–2 и проводник 3–4), в результате получим схему, изображенную на рис. 3.3.

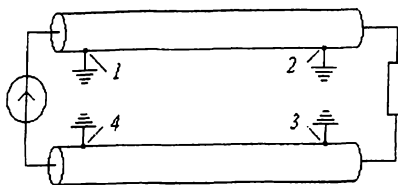


Рис. 3.2. Две фазы от трехфазной схемы

Ток жилы $I_{\text{ж}}$, протекая по контуру 5–6–7–8, создает вокруг проводников переменное магнитное поле. В силу того, что расстояние между точками 5–6 много больше, чем между точками 5–8, будем рассматривать только магнитное поле, создаваемое проводниками 5–6 и 7–8. Вектор магнитной индукции B пронизывает контур 1–2–3–4 и вызывает в нем протекание электрического тока $I_{\text{об}}$, амперметр A покажет значение тока; если вместо амперметра включить вольтметр, то он покажет напряжение, создаваемое контуром.

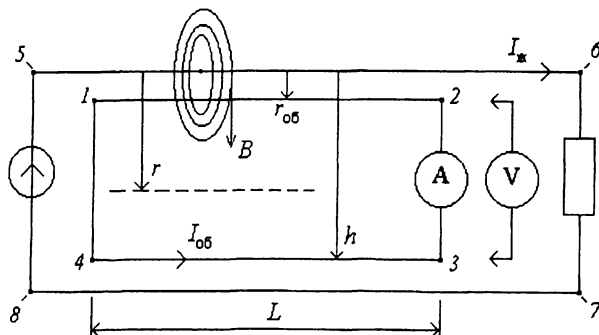


Рис. 3.3. Контур, образованный двумя жилами кабеля и их оболочками: 1–2–3–4 – контур оболочек; 5–6–7–8 – контур жилы

Магнитный поток, который пронизывает контур 1–2–3–4, равен потокоцеплению, так как контур имеет один виток:

$$\Psi = \oint_S B dS, \quad (3.1)$$

где S – площадь контура 1–2–3–4. По длине контура L магнитная индукция B не изменяется, поэтому можно записать:

$$\Psi = L \int_{r_{об}}^h B dr, \quad (3.2)$$

где $r_{об}$ – радиус оболочки; h – расстояние от жилы до соседней оболочки.

Подставим $B = \mu\mu_0 H$:

$$\Psi = L \int_{r_{об}}^h H \mu \mu_0 dr, \quad (3.3)$$

где μ – магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Распишем H как $H = I / 2\pi r$, где $I = I_{ж}$, подставим H в формулу (3.3) и получим

$$\Psi = L \int_{r_{об}}^h H \frac{I}{2\pi r} \mu \mu_0 dr, \quad (3.4)$$

Далее вынесем из-под знака интеграла величины, которые не зависят от радиуса, и проинтегрируем (3.4):

$$\Psi = \frac{LI\mu\mu_0}{2\pi} \int_{r_{об}}^h \frac{dr}{r}, \quad \Psi = \frac{LI\mu\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_{об}}. \quad (3.5)$$

По определению коэффициент взаимной индукции между контуром 5–6–7–8 и контуром 1–2–3–4

$$M = \frac{\Psi}{I}. \quad (3.6)$$

Подставим в (3.5) выражение (3.6), получим

$$M = \frac{\mu\mu_0 L}{2\pi} \ln \frac{h}{r_{об}}. \quad (3.7)$$

Наводимая в контуре за счет взаимной индуктивности ЭДС

$$E = -M \frac{dI}{dt}. \quad (3.8)$$

Запишем

$$E = E_m \exp(j\omega t), \quad (3.9)$$

$$I = I_m \exp(j\omega t). \quad (3.10)$$

где E_m , I_m – амплитуда ЭДС и тока; ω – циклическая частота ($\omega = 2\pi f$); f – частота; t – время.

Возьмем производную выражения (3.10):

$$\frac{dI}{dt} = j\omega I_m \exp(j\omega t). \quad (3.11)$$

Подставим в (3.8) выражение (3.11):

$$E_m \exp(j\omega t) = -Mj\omega I_m \exp(j\omega t) \quad \text{или} \quad E_m = -j\omega M I_m.$$

Опустим индекс m и заменим I на $I_{\text{ж}}$:

$$E = -j\omega M I_{\text{ж}}. \quad (3.12)$$

Формула (3.12) была выведена для фазы 1–2, такая же ЭДС возникнет от фазы 3–4; следовательно, общая ЭДС

$$E = -2j\omega M I_{\text{ж}}. \quad (3.13)$$

Ток оболочки $I_{\text{об}}$ также создает ЭДС, поэтому

$$E = -2j\omega M (I_{\text{ж}} + I_{\text{об}}). \quad (3.14)$$

Ток $I_{\text{об}}$ вызовет падение напряжения в контуре оболочек, равное $2I_{\text{об}}R_{\text{об}}$. Тогда по закону Кирхгофа

$$-2j\omega M (I_{\text{ж}} + I_{\text{об}}) + 2I_{\text{об}}R_{\text{об}} = 0. \quad (3.15)$$

$$-j\omega MI_{\text{ж}} - j\omega MI_{\text{об}} + I_{\text{об}}R_{\text{об}} = 0, \quad I_{\text{об}}(R_{\text{об}} - j\omega M) = j\omega MI_{\text{ж}},$$

$$I_{\text{об}} = \frac{I_{\text{ж}}j\omega M}{R_{\text{об}} - j\omega M}. \quad (3.16)$$

Откуда модуль тока

$$I_{\text{об}} = I_{\text{ж}} \frac{\omega M}{\sqrt{R_{\text{об}}^2 + (\omega M)^2}}. \quad (3.17)$$

Найдем отношение $I_{\text{об}}/I_{\text{ж}}$:

$$\frac{I_{\text{об}}}{I_{\text{ж}}} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_{\text{об}}^2 + (\omega M)^2}}. \quad (3.18)$$

Возведем его в квадрат:

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{об}}^2}{I_{\text{ж}}^2} &= \frac{(\omega M)^2}{R_{\text{об}}^2 + (\omega M)^2}, \\ \frac{I_{\text{об}}^2}{I_{\text{ж}}^2} &= \frac{1}{\frac{R_{\text{об}}^2}{(\omega M)^2} + 1} = m^2. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Определим отношение потерь в оболочке $P_{\text{об}}$ к потерям в жиле $P_{\text{ж}}$:

$$\gamma_{\text{об}} = \frac{P_{\text{об}}}{P_{\text{ж}}} = \frac{I_{\text{об}}^2 R_{\text{об}}}{I_{\text{ж}}^2 R_{\text{ж}}}. \quad (3.20)$$

Подставим в (3.20) выражение (3.19), окончательно получим

$$\gamma_{\text{об}} = m^2 \frac{R_{\text{об}}}{R_{\text{ж}}}. \quad (3.21)$$

3.2. Потери полезной мощности в металлических оболочках бронированных кабелей

На рис. 3.4 представлен одножильный бронированный кабель. В данном случае рассматриваются не ферромагнитные потери в броне, а потери в оболочках, вызванные присутствием брони. Пусть кабель с металлической оболочкой имеет ленточную броню. Броня электрически не связана с оболочкой. Оболочки соединены с одного и другого конца линии (см. рис. 3.4).

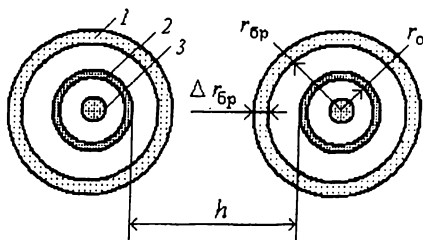


Рис. 3.4. Одножильный бронированный кабель с металлической оболочкой: 1 – ленточная броня; 2 – металлическая оболочка; 3 – токопроводящая жила

Вспользуемся уравнением (3.4). В силу того, что среда неоднородна, разобьем ее на три части: от радиуса оболочки $r_{об}$ до брони $r_{бр}$, в броне от $r_{бр}$ до $r_{бр} + \Delta r_{бр}$ и в остальной части от $r_{бр} + \Delta r_{бр}$ до соседней оболочки h :

$$\begin{aligned} \Psi &= L \int_{r_{об}}^h \frac{I}{2\pi r} \mu \mu_0 dr = \\ &= \frac{\mu \mu_0 L I}{2\pi} \int_{r_{об}}^{r_{бр}} \frac{dr}{r} + \frac{\mu \mu_0 L I}{2\pi} \int_{r_{бр}}^{r_{бр} + \Delta r_{бр}} \frac{dr}{r} + \frac{\mu \mu_0 L I}{2\pi} \int_{r_{бр} + \Delta r_{бр}}^h \frac{dr}{r}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

После интегрирования и преобразования имеем

$$M = \frac{\mu_0 L}{2\pi} (\mu_b \ln \frac{r_{бр}}{r_{об}} + \mu_{бр} \ln \frac{r_{бр} + \Delta r_{бр}}{r_{бр}} + \mu_b \ln \frac{h}{r_{бр} + \Delta r_{бр}}), \quad (3.23)$$

где $\mu_b = 1$ – магнитная проницаемость воздуха и других немагнитных материалов; $\mu_{бр} = 400$ – магнитная проницаемость стальной брони.

Бронированный кабель можно представить как трансформатор (рис. 3.5), первичная обмотка которого содержит один виток, по ней течет ток $I_{ж}$. Вторичная обмотка также имеет один виток, по ней течет ток $I_{об}$. Сердечник трансформатора – это броня кабеля.

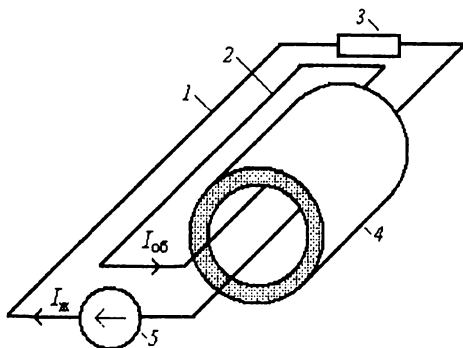


Рис. 3.5. Эквивалентная схема бронированного кабеля: 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – нагрузка; 4 – броня; 5 – генератор

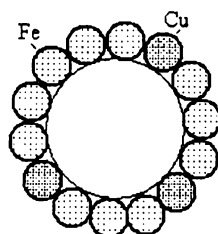


Рис. 3.6. Кабель с проволоочной броней

Из-за того, что $\mu_{бр} \gg \mu_b$, взаимоиндукция бронированного кабеля отличается от взаимоиндукции небронированного в 10 раз. По этой причине одножильные кабели не бронируют ленточной броней. Если необходимо бронировать одножильный кабель, то используют проволоочную броню (рис. 3.6). В ней для прерывания магнитного потока несколько стальных проволок заменяют медными.

3.3. Сопротивление токопроводящей жилы переменному току

Сопротивление токопроводящей жилы постоянному току

$$R_{\text{ж}} = \frac{\rho_{20} L}{S_{\text{ж}}} [1 + \alpha(T_{\text{ж}} - 20)] k_y, \quad (3.24)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление при 20 °C; L – длина токопроводящей жилы; $S_{\text{ж}}$ – сечение жилы; α – температурный коэффициент сопротивления; k_y – коэффициент укрутки.

Электрические удельные сопротивления и температурные коэффициенты удельных сопротивлений представлены в табл. 3.1.

При переменном токе магнитное поле вытесняет ток на поверхность проводника. Изменение плотности тока по сечению проводника приводит к возрастанию сопротивления проводника.

Таблица 3.1

Электрические удельные сопротивления и температурные коэффициенты удельных сопротивлений

Материал	$\rho_{20}, \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	$\alpha, 1/^\circ\text{C}$
Медь	0,0172	0,00393
Алюминий	0,0283	0,00403
Свинец	0,214	0,004
Сталь	0,138	0,0045
Бронза	0,035	0,003
Нержавеющая сталь	0,7	—

Воспользуемся основными уравнениями электромагнитного поля:

$$\text{rot } E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}, \quad \text{rot } H = \gamma E + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (3.25)$$

где B – вектор магнитной индукции; H – напряженность магнитного поля; D – вектор электрического смещения; μ – магнитная проницаемость; γ – проводимость; t – время.

Плотность токов смещения в проводнике мала по сравнению с плотностью токов проводимости, поэтому

$$\text{rot } H = \gamma E. \quad (3.26)$$

Возьмем уравнение (3.26), образуем от него rot :

$$\begin{aligned} \text{rot}(\text{rot } E) &= -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\text{rot } H) = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\gamma E), \\ \text{rot}(\text{rot } E) &= -\mu\mu_0 \gamma \left(\frac{\partial E}{\partial t}\right). \end{aligned} \quad (3.27)$$

Из курса математики известно:

$$\text{rot}(\text{rot } E) = \text{grad}(\text{div } E) - \nabla^2 E. \quad (3.28)$$

Внутри проводника нет объемных зарядов, поэтому

$$\operatorname{div} D = \operatorname{div} (\epsilon \epsilon_0 E) = \epsilon \epsilon_0 \operatorname{div} E = 0, \quad \operatorname{grad} (\operatorname{div} E) = 0. \quad (3.29)$$

С учетом (3.29) уравнение (3.28) примет вид

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} E) = -\nabla^2 E. \quad (3.30)$$

Подставив (3.30) в (3.27), получим

$$\nabla^2 E = \mu \mu_0 \gamma \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right). \quad (3.31)$$

Подобным образом можно получить уравнения для магнитного поля:

$$\nabla^2 H = \mu \mu_0 \gamma \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right). \quad (3.32)$$

Напряженность поля изменяется по синусоидальному закону:

$$\dot{E} = E_0 \exp(j\omega t), \quad (3.33)$$

$$H = H_0 \exp(j\omega t). \quad (3.34)$$

Дифференцируем уравнения (3.33) и (3.34):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E_0 \exp(j\omega t), \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = j\omega H_0 \exp(j\omega t). \quad (3.36)$$

Подставим в (3.31) уравнения (3.33) и (3.35):

$$\nabla^2 E_0 \exp(j\omega t) = \mu \mu_0 \gamma j\omega E_0 \exp(j\omega t). \quad (3.37)$$

После преобразований имеем дифференциальное уравнение

$$\nabla^2 E_0 - \mu\mu_0\gamma j\omega E_0 = 0. \quad (3.38)$$

Рассмотрим напряженность электрического поля только вдоль оси x :

$$\nabla^2 E_{0x} - \mu\mu_0\gamma j\omega E_{0x} = 0. \quad (3.39)$$

Составим характеристическое уравнение:

$$k^2 - j\omega\mu\mu_0 = 0, \quad k^2 = j\omega\mu\mu_0, \quad (3.40)$$

где k – корень характеристического уравнения.

Обозначим

$$\omega\mu\mu_0\gamma = 2p^2 \quad (3.41)$$

Подставим (3.41) в (3.40):

$$k^2 = j2p^2, \quad k = p\sqrt{2j}, \quad k = p(1+j). \quad (3.42)$$

Будем искать решение уравнения (3.39) в виде

$$E_{0x} = Ae^{kz} + Be^{-kz} \quad (3.43)$$

Коэффициент $A = 0$, так как в противном случае E возрастает с глубиной z (рис. 3.7), поэтому

$$E_{0x} = Be^{-kz} \quad (3.44)$$

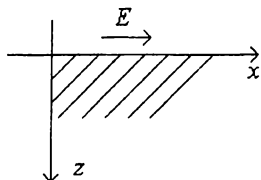


Рис. 3.7. Направление вектора напряженности электрического поля

Подставим в (3.44) уравнение (3.42):

$$E_{0x} = Be^{-pz}e^{-j pz} \quad (3.45)$$

Напряженность электрического поля изменяется во времени:

$$E_x = E_{0x}e^{j\omega t} \quad (3.46)$$

Подставим в (3.46) уравнение (3.45):

$$E_x = Be^{-pz}e^{-j pz}e^{j\omega t}, \quad E = Be^{-pz}e^{j(\omega t - pz)}. \quad (3.47)$$

Преобразуем $e^{j(\omega t - pz)}$ по формуле Эйлера, взяв только действительную часть:

$$E_x = Be^{-pz} \cos(\omega t - pz). \quad (3.48)$$

Плотность тока

$$j_x = \gamma E_x = \gamma B e^{-pz} \cos(\omega t - pz),$$

$$j_x = j_0 e^{-pz} \cos(\omega t - pz), \quad (3.49)$$

где $j_0 = \gamma B$.

Амплитуда плотности тока убывает по экспоненциальному закону, в e раз амплитуда уменьшится в слое толщиной $1/p$.

Из выражения (3.41) с учетом (3.42) без мнимой части имеем

$$k = \sqrt{\omega \mu \mu_0 \gamma}. \quad (3.50)$$

Сделаем промежуточные преобразования. Сопротивление жилы

$$R_{\text{ж}} = \rho \frac{L}{S_{\text{ж}}} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{L}{S_{\text{ж}}} = \frac{L}{\gamma \pi r_{\text{ж}}^2}. \quad (3.51)$$

Откуда

$$\gamma = \frac{L}{R_{\text{ж}} \pi r_{\text{ж}}^2}. \quad (3.52)$$

Подставим в (3.50) выражение (3.52) и $\omega = 2\pi f$:

$$k = \sqrt{\frac{2f\mu\mu_0}{R_{\text{ж}} r_{\text{ж}}^2}}, \quad k = \frac{1}{r_{\text{ж}}} \sqrt{\frac{2f\mu\mu_0}{R_{\text{ж}}}}, \quad k r_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{2f\mu\mu_0}{R_{\text{ж}}}}. \quad (3.53)$$

Обозначим $x = k r_{\text{ж}}$, получим

$$x = \sqrt{\frac{2f\mu\mu_0}{R_{\text{ж}}}}. \quad (3.54)$$

Для учета формы жилы вводятся коэффициенты k_n (поверхностный эффект) и k_6 (эффект близости) (табл. 3.2); формула (3.54) приобретает вид

$$x_n = \sqrt{\frac{2f\mu_0}{R_{\text{ж}}}} k_n, \quad x_6 = \sqrt{\frac{2f\mu_0}{R_{\text{ж}}}} k_6. \quad (3.55)$$

Таблица 3.2
Рекомендуемые значения коэффициентов k_n и k_6

№ п/п	Тип жилы	Заполнение жилы	k_n	k_6
1	Круглая и секторная, многопроволочная	Масло	1	0,8
2	Круглая и секторная, многопроволочная	Воздух	1	1
3	Круглая из сегментов	Сегменты изолированы	0,435	0,37

Сопротивление жилы переменному току вычисляется по формуле через коэффициенты $y_n = f(x_n)$ (учитывает поверхностный эффект) и $y_6 = f(x_6)$ (учитывает эффект близости):

$$R_{\approx} = R_{\text{ж}}(1 + y_n + y_6). \quad (3.56)$$

Коэффициенты y_n и y_6 являются функцией x и могут быть вычислены по приближенным формулам для $x < 2,8$:

$$y_n = \frac{x_n^4}{192 + 0,8x_n^4}, \quad (3.57)$$

$$y_6 = \frac{x_6^4}{192 + 0,8x_6^4} \left(\frac{d_{\text{ж}}}{h} \right)^2 \left[\frac{1,18}{y_n + 0,27} + 0,312 \left(\frac{d_{\text{ж}}}{h} \right)^2 \right], \quad (3.58)$$

где h – расстояние между осями кабелей; $d_{\text{ж}}$ – диаметр жилы.

Формула (3.58) справедлива для трехжильных кабелей. Для кабелей в металлическом трубопроводе применяется формула

$$R_{\approx} = R_{\text{ж}}(1 + 1,7(y_n + y_6)). \quad (3.59)$$

4. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАБЕЛЯ

Тепловые явления в кабеле описываются такими же законами, что и электрические:

$$\lambda \nabla^2 T + q_v = C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.1)$$

λ – теплопроводность, Вт/(м·°С); q_v – плотность теплового потока от внутренних источников тепла, Вт/м³; C – теплоемкость, Дж/(м³·°С); T – температура, °С; t – время, с.

При стационарном процессе уравнение (4.1) примет вид

$$\lambda \nabla^2 T + q_v = 0. \quad (4.2)$$

В том случае, если в диэлектрике не выделяется тепло, уравнение (4.2) примет вид

$$\nabla^2 T = 0. \quad (4.3)$$

4.1. Расчет допустимого тока нагрузки при отсутствии источников тепла в изоляции и оболочках кабеля

Источником тепла является только жила кабеля (рис. 4.1). Процесс стационарный: $\nabla^2 T = 0$.

В цилиндрической системе координат

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (4.4)$$

где r – радиус; φ – угол; z – координата вдоль оси кабеля.

Вдоль оси кабеля температура не изменяется, поэтому производная равна нулю:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (4.5)$$

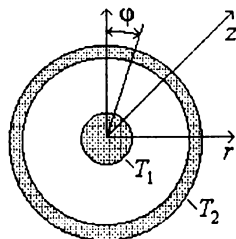


Рис. 4.1. Поперечный разрез кабеля

По углу φ температура постоянная, поэтому производная равна нулю:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (4.6)$$

С учетом (4.5) и (4.6) уравнение (4.4) примет вид

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad (4.7)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0. \quad (4.8)$$

Производная равна нулю в том случае, если дифференцируемая величина $r \partial T / \partial r$ является константой:

$$r \frac{\partial T}{\partial r} = A. \quad (4.9)$$

Разделим переменные и проинтегрируем:

$$dT = \frac{A dr}{r}, \quad \int_{T_1}^T dT = \int_r^{r_2} \frac{A dr}{r}, \quad T - T_1 = A \ln \frac{r}{r_1}. \quad (4.10)$$

Из выражения (4.10) находим A :

$$A = - \frac{T_1 - T}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (4.11)$$

На радиусе $r = r_1$ температура T равна T_2 , следовательно:

$$A = - \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (4.12)$$

Подставим (4.12) в (4.11), окончательно получим

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \ln \frac{r}{r_1}. \quad (4.13)$$

Из формулы видно, что температура изменяется по логарифмическому закону.

Согласно закону Фурье, между тепловым потоком q и градиентом температуры существует линейная зависимость:

$$q = -\lambda \text{grad } T \quad \text{или} \quad q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (4.14)$$

Коэффициентом пропорциональности является теплопроводность λ . Тепловой поток – это количество тепла Q , прошедшее через единицу поверхности $S = 2\pi L$ в единицу времени τ :

$$q = \frac{Q}{S\tau}, \quad q = \frac{Q}{2\pi r L \tau}. \quad (4.15)$$

Отношение количества тепла Q к времени τ есть мощность P , т.е. $P = Q/\tau$, подставим ее в (4.15), получим

$$q = \frac{P}{2\pi r L}. \quad (4.16)$$

Подставим (4.16) в (4.14) и разделим переменные:

$$\frac{P}{2\pi r L} = -\lambda \frac{dT}{dr}, \quad -dT = \frac{P}{2\pi r L \lambda} dr.$$

Интегрируем:

$$-\int_{T_1}^{T_2} dT = \int_{r_1}^{r_2} \frac{P}{2\pi r L \lambda} dr = \frac{P}{2\pi \lambda L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}.$$

Подставим пределы, получим

$$T_1 - T_2 = \frac{P}{2\pi \lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{или} \quad \theta = \frac{P}{2\pi \lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (4.17)$$

где $\theta = T_1 - T_2$ – перепад температур.

Обозначим через S тепловое сопротивление изоляции:

$$S = \frac{1}{2\pi L \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{или} \quad S = \frac{\sigma}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (4.18)$$

где σ – удельное тепловое сопротивление ($\sigma = 1/\gamma$).

Подставим (4.18) в (4.17), получим тепловой закон Ома:

$$\theta = PS. \quad (4.19)$$

Согласно закону Джоуля – Ленца, выделяемая в проводнике при протекании тока мощность

$$P = I^2 R_{\text{ж}}, \quad (4.20)$$

где $R_{\text{ж}}$ – сопротивление проводника.

Подставим (4.20) в формулу (4.19) и выразим из нее ток:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R_{\text{ж}}}}, \quad I = \sqrt{\frac{\theta}{S R_{\text{ж}}}}, \quad I = \sqrt{\frac{T_1 - T_2}{R_{\text{ж}} S}}. \quad (4.21)$$

Применительно ко всему кабелю формула (4.21) примет вид

$$I = \sqrt{\frac{T_{\text{ж}} - T_0}{R_{\text{ж}} \sum S}}, \quad (4.22)$$

где $T_{\text{ж}}$ – температура жилы; T_0 – температура окружающей среды; $\sum S$ – сумма тепловых сопротивлений элементов конструкции кабеля и окружающей среды.

4.2. Расчет допустимого тока нагрузки при наличии диэлектрических потерь в изоляции

Рассмотрим случай, когда источниками тепла являются токопроводящая жила и изоляция. Жила разогревается за счет джоулевых потерь, изоляция – за счет диэлектрических потерь. Предварительно сделаем некоторые преобразования. Пусть мы имеем плоский конденсатор с однород-

ным электрическим полем (рис. 4.2), мощность диэлектрических потерь в нем

$$P_d = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta. \quad (4.23)$$

Удельные диэлектрические потери (P_{yd} , Вт/м³), т.е. потери в единице объема изоляции

$$P_{yd} = \frac{P}{V} = \frac{\omega C U^2 \operatorname{tg} \delta}{V} = \frac{\omega \epsilon \epsilon_0 S U^2 \operatorname{tg} \delta}{h^2 S},$$

$$P_{yd} = \omega \epsilon \epsilon_0 E^2 \operatorname{tg} \delta \quad (4.24)$$

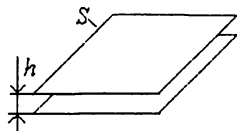


Рис. 4.2. Плоский конденсатор

В кабеле напряженность электрического поля изменяется по радиусу. Подставим формулу (2.15) в (4.24):

$$P_{yd} = \omega \epsilon \epsilon_0 \left(\frac{U}{r \ln(r_2/r_1)} \right)^2 \operatorname{tg} \delta \quad (4.25)$$

В элементарном объеме $dV = 2\pi r dr$, ограниченном радиусами r и $r + dr$, диэлектрические потери (рис. 4.3)

$$dP = P_{yd} dV \quad (4.26)$$

Подставим в (4.25) формулу (4.26) и с учетом (4.23) получим

$$dP = \frac{\omega \epsilon \epsilon_0 U^2 \operatorname{tg} \delta}{r^2 (\ln(r_2/r_1))^2} \cdot 2\pi r dr = \frac{\omega C U^2 \operatorname{tg} \delta}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{dr}{r},$$

$$dP = \frac{P_d}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{dr}{r}.$$

(4.27)

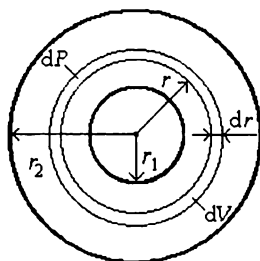


Рис. 4.3. Диэлектрические потери в элементарном объеме

Мощность теплового потока от диэлектрических потерь, проходящего через слой с радиусом r ,

$$P_r = \int_{r_1}^r dP = \int_{r_1}^r \frac{P_d}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{dr}{r}, \quad P_r = \frac{P_d}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \ln \frac{r}{r_1}. \quad (4.28)$$

Тепловое сопротивление dS элементарного слоя толщиной dr пропорционально удельному тепловому сопротивлению $\sigma_{из}$, dr и обратно пропорционально площади цилиндра $S = 2\pi rL$ (примем длину L равной единице):

$$dS = \sigma_{из} \frac{dr}{2\pi r}. \quad (4.29)$$

В слое толщиной dr перепад температур

$$d\theta = P_r dS. \quad (4.30)$$

Подставим (4.28) и (4.29) в (4.30):

$$d\theta = P_r dS = P_r \frac{\sigma_{из} dr}{2\pi r} = \frac{P_d}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{r}{r_1} \cdot \frac{dr}{r}. \quad (4.31)$$

Между жилой и оболочкой разность температур

$$\theta = \int_0^\theta d\theta = \int_{r_1}^{r_2} \frac{P_d}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{r}{r_1} \cdot \frac{dr}{r}. \quad (4.32)$$

После интегрирования имеем

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{P_d \sigma_{из}}{2\pi \ln(r_2/r_1)} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\ln(r/r_1)}{r} dr = \frac{P_d \sigma_{из}}{2\pi \ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{1}{2} \left[\ln \frac{r_2}{r_1} - \ln \frac{r_1}{r_1} \right]^2 \\ \theta &= \frac{P_d \sigma_{из}}{2 \cdot 2\pi \ln(r_2/r_1)} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)^2 = \frac{P_d}{2} \cdot \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{P_d}{2} S_{из}, \end{aligned}$$

$$\text{где } S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Окончательно

$$\theta = P_d \frac{S_{из}}{2}. \quad (4.33)$$

В результате вывода мы получили, что распределенный источник тепла можно заменить сосредоточенным, расположенным на половине теплового сопротивления изоляции (рис. 4.4).

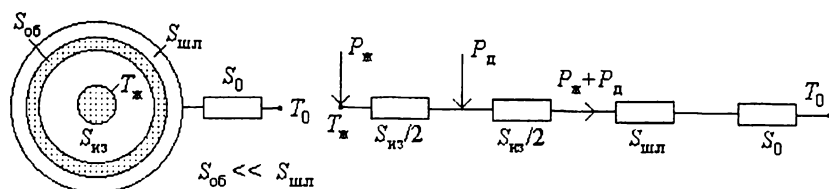


Рис. 4.4. Тепловая схема замещения кабеля с диэлектрическими потерями

Составим уравнение для тепловой схемы замещения (см. рис. 4.4), используя тепловой закон Ома:

$$T_{\text{ж}} - T_0 = P_{\text{ж}} \frac{S_{\text{из}}}{2} + (P_{\text{ж}} + P_{\text{д}}) \left(\frac{S_{\text{из}}}{2} + S_{\text{шл}} + S_0 \right),$$

где $S_{\text{из}}$ – тепловое сопротивление изоляции; $S_{\text{шл}}$ – тепловое сопротивление шланга; S_0 – тепловое сопротивление окружающей среды.

Сделаем преобразования

$$T_{\text{ж}} - T_0 = P_{\text{ж}} (S_{\text{из}} + S_{\text{шл}} + S_0) + P_{\text{д}} \left(\frac{S_{\text{из}}}{2} + S_{\text{шл}} + S_0 \right),$$

$$P_{\text{ж}} (S_{\text{из}} + S_{\text{шл}} + S_0) = T_{\text{ж}} - T_0 - P_{\text{д}} \left(\frac{S_{\text{из}}}{2} + S_{\text{шл}} + S_0 \right). \quad (4.34)$$

Тепловое сопротивление металлической оболочки не учитывается, так как тепловое сопротивление металла много меньше теплового сопротивления диэлектриков ($S_{\text{об}} \ll S_{\text{шл}}$). В токопроводящей жиле потери

$$P_{\text{ж}} = I^2 R_{\text{ж}}. \quad (4.35)$$

Подставим (4.35) в (4.34) и выразим ток:

$$I = \sqrt{\frac{(T_{\text{ж}} - T_0) - P_{\text{д}}(S_{\text{из}}/2 + S_{\text{шл}} + S_0)}{R_{\text{ж}}(S_{\text{из}} + S_{\text{шл}} + S_0)}}. \quad (4.36)$$

4.3. Расчет допустимого тока нагрузки с учетом потерь в металлических оболочках

Аналогично предыдущему рассчитываем ток нагрузки (рис. 4.5) с учетом потерь в металлических оболочках (формула (3.20)).

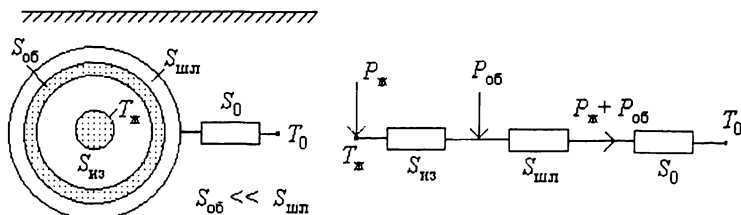


Рис. 4.5. Тепловая схема замещения кабеля с потерями в металлических оболочках

Мощность потерь в оболочке

$$P_{\text{об}} = \gamma_{\text{об}} P_{\text{ж}}.$$

Перепад температуры между жилой и окружающей средой

$$\begin{aligned} T_{\text{ж}} - T_0 &= P_{\text{ж}} S_{\text{из}} + (P_{\text{ж}} + P_{\text{об}})(S_{\text{шл}} + S_0), \\ T_{\text{ж}} - T_0 &= P_{\text{ж}} S_{\text{из}} + (P_{\text{ж}} + \gamma_{\text{об}} P_{\text{ж}})(S_{\text{шл}} + S_0), \\ T_{\text{ж}} - T_0 &= P_{\text{ж}} [S_{\text{из}} + (1 + \gamma_{\text{об}})(S_{\text{шл}} + S_0)]. \end{aligned} \quad (4.37)$$

С учетом (4.35) выразим из (4.37) ток:

$$I = \sqrt{\frac{T_{\text{ж}} - T_0}{R_{\text{ж}} [S_{\text{из}} + (1 + \gamma_{\text{об}})(S_{\text{шл}} + S_0)]}}. \quad (4.38)$$

4.4. Расчет допустимого тока нагрузки трехжильного кабеля

Рассмотрим случай, когда в трехфазном кабеле изолированные жилы имеют общую неметаллическую оболочку (или шланг) (рис. 4.6).

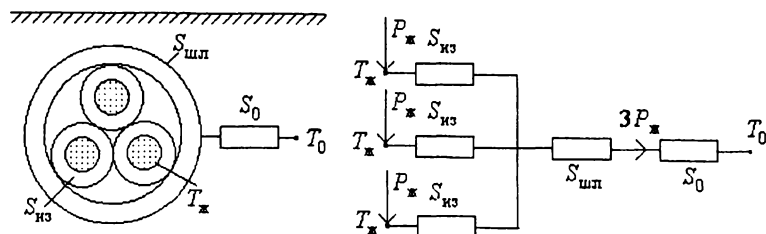


Рис. 4.6. Тепловая схема замещения трехжильного кабеля

Запишем уравнение для тепловой схемы замещения трехжильного кабеля:

$$\begin{aligned} T_{\text{ж}} - T_0 &= P_{\text{ж}} S_{\text{из}} + 3P_{\text{ж}} (S_{\text{шл}} + S_0) = \\ &= P_{\text{ж}} (S_{\text{из}} + 3(S_{\text{шл}} + S_0)). \end{aligned} \quad (4.39)$$

С использованием (4.35) найдем из (4.39) ток:

$$I = \sqrt{\frac{T_{\text{из}} - T_0}{R_{\text{ж}} [S_{\text{из}} + 3(S_{\text{шл}} + S_0)]}}. \quad (4.40)$$

4.5. Тепловое сопротивление среды, окружающей кабель

Кабель может быть проложен в земле, под водой или на воздухе. Лучшее всего охлаждается кабель, проложенный в воде, хуже всего — на воздухе. При прокладке на воздухе превышение температуры поверхности кабеля $T_{\text{п}}$ над температурой окружающей среды T_0 будет следующим:

$$\theta = T_{\text{п}} - T_0 = S_{\text{в}} \sum P, \quad (4.41)$$

где S_b – тепловое сопротивление воздуха; $\sum P$ – сумма всех потерь в кабеле.

Тепловое сопротивление воздуха

Сопротивление теплопередачи от поверхности кабеля в воздух зависит от диаметра кабеля, состояния его поверхности, разности температур между кабелем и воздухом.

Тепловой поток от токопроводящей жилы кабеля проходит через все элементы конструкции кабеля и переходит в окружающую среду в виде конвективного теплового потока и излучения. В стационарном режиме выполняется баланс мощностей:

$$P_{\text{ж}} = P_{\text{к}} + P_{\text{и}}, \quad (4.42)$$

где $P_{\text{ж}}$ – мощность теплового потока, идущего от токопроводящей жилы кабеля; $P_{\text{к}}$ – мощность конвективного теплового потока, идущего с поверхности кабеля; $P_{\text{и}}$ – мощность теплового потока излучения, идущего с поверхности кабеля

Расчет конвективной теплопередачи произведем по критериальным уравнениям подобия теории теплопередачи. Мощность конвективного теплового потока ($P_{\text{к}}$, Вт) с поверхности кабеля единичной длины

$$P_{\text{к}} = \pi d h \theta, \quad (4.43)$$

где d – наружный диаметр кабеля, м; h – коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/(м·°C); θ – перепад температуры, °C;

Коэффициент конвективной теплопередачи h связан с критерием Нуссельта следующим образом:

$$\text{Nu} = h \frac{d}{\lambda}, \quad (4.44)$$

где λ – теплопроводность воздуха при средней температуре, Вт/(м·°C).

При свободной конвекции критерий Нуссельта может быть вычислен из приближенного соотношения:

$$\text{Nu} = c (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n \quad (4.45)$$

где Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля; c и n – постоянные коэффициенты, которые для различных значений произведения $Gr \cdot Pr$ даны в табл. 4.1.

Критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{\beta d^3 g \theta}{\nu^2} \quad (4.46)$$

где $\beta = 1/(T_{cp} + 273)$ – коэффициент теплового расширения воздуха, $1/K$; d – диаметр кабеля, м; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; ν – кинематическая вязкость воздуха, m^2/c .

Таблица 4.1
Значения коэффициентов c и n
в уравнении (4.45)

$Gr \cdot Pr$	c	n
$10^{-4} - 10^{-3}$	0,500	0
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,180	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,540	1/4
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	1/3

Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu C \gamma}{\lambda}, \quad (4.47)$$

где C – теплоемкость воздуха, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$; γ – плотность воздуха, $кг/м^3$; λ – теплопроводность воздуха, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$.

Для воздуха $Pr = 0,72$. Параметры воздуха берутся из табл. 4.2 для средней температуры:

$$T_{cp} = T_0 + \frac{\theta}{2}, \quad \theta = T_n - T_0, \quad (4.48)$$

где T_n – температура поверхности кабеля; T_0 – температура окружающей среды.

Тепловой поток излучением с поверхности кабеля единичной длины определим по уравнению Стефана – Больцмана:

$$P_{и} = \pi d \epsilon_n C_0 (T_n^4 - T_0^4), \quad (4.49)$$

где $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная излучения абсолютно черного тела; ε_n – коэффициент черноты поверхности тела.

Таблица 4.2

Зависимость параметров сухого воздуха от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
10	2,50	14,16	50	2,82	17,95
20	2,59	15,06	60	2,89	18,97
30	2,67	16,00	70	3,00	20,00
40	2,75	16,96			

Суммарная теплопередача

$$\sum P = P_k + P_n = \pi d h \theta + \pi d \varepsilon_n C_0 (T_n^4 - T_0^4), \quad (4.50)$$

$$\sum P = \pi d \theta [h + \varepsilon_n C_0 \theta_1], \quad \frac{\theta}{\sum P} = \frac{1}{\pi d [h + \varepsilon_n C_0 \theta_1]} = S_B,$$

где $\theta_1 = (T_n^4 - T_0^4)/\theta$.

Откуда тепловое сопротивление воздуха

$$S_B = \frac{1}{\pi d [h + \varepsilon_n C_0 \theta_1]}. \quad (4.51)$$

Пример. Рассчитать тепловое сопротивление воздуха для кабеля в пластмассовой оболочке ($d = 28 \text{ мм}$, $\varepsilon_n = 0,8$), температура окружающей среды $T_0 = 25 ^\circ\text{C}$, температура поверхности кабеля $T_n = 55 ^\circ\text{C}$.

Решение:

1. Вычисляем перепад температуры между поверхностью кабеля и окружающей средой

$$\theta = T_n - T_0 = 55 - 25 = 30 ^\circ\text{C}.$$

2. Определяем среднюю температуру:

$$T_{\text{ср}} = T_0 + \frac{\theta}{2} = 25 + \frac{30}{2} = 40 ^\circ\text{C}.$$

3. Коэффициент теплового расширения воздуха

$$\beta = \frac{1}{T_{cp}} = \frac{1}{273 + 40} = 3,19 \cdot 10^{-3}$$

4. Из табл. 4.2 при 40 °С кинематическая вязкость $\nu = 16,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

5. Критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{\beta d^3 g \theta}{\nu^2} = \frac{3,19 \cdot 10^{-3} \cdot 0,028^3 \cdot 9,8 \cdot 30}{(16,96 \cdot 10^{-6})^2} = 7,16 \cdot 10^4$$

6. Критерий Нуссельта

$$Nu = c (Gr \cdot Pr)^n = 0,54 (7,16 \cdot 10^4 \cdot 0,72)^{1/4} = 8,14.$$

7. Коэффициент конвективной теплопередачи

$$h = Nu \frac{\lambda}{d} = 8,14 \cdot \frac{0,0275}{0,028} = 7,99 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}).$$

8. Отношение температур

$$\theta_1 = \frac{T_{п}^4 - T_0^4}{\theta} = \frac{(273 + 55)^4 - (273 + 25)^4}{30} = 1,23 \cdot 10^8$$

9. Тепловое сопротивление воздуха

$$S_{в} = \frac{1}{\pi d (h + \epsilon_{п} C_0 \theta_1)} = \frac{1}{\pi 0,028 (7,99 + 0,8 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1,23 \cdot 10^8)} = 0,84 \text{ м} \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}.$$

Тепловое сопротивление земли

Предположим, что поверхность земли имеет постоянную температуру и тепло от кабеля идет только к поверхности земли. Для нахождения теплового сопротивления земли S_z используем метод зеркальных отображений (рис. 4.7). По аналогии с электрическим полем воспользуемся формулой емкости двухпроводной линии:

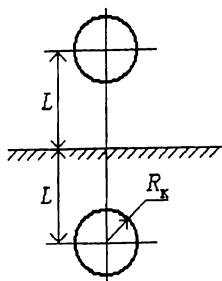


Рис. 4.7. Метод зеркальных отображений

$$C = \frac{\pi}{(\ln N + \sqrt{N^2 - 1})} \varepsilon \varepsilon_0, \quad (4.52)$$

Величина, обратная емкости,

$$\frac{1}{C} = \frac{(\ln N + \sqrt{N^2 - 1})}{\pi \varepsilon \varepsilon_0}, \quad (4.53)$$

где $N = L/R_k$.

Величина

$$\frac{\ln(N + \sqrt{N^2 - 1})}{\pi} = G \quad (4.54)$$

зависит только от геометрических размеров и называется геометрическим фактором. Он одинаков для электрических и тепловых полей, следовательно:

$$S_3 = \sigma_3 G \quad (4.55)$$

$$S_3 = \sigma_3 \frac{\ln(N + \sqrt{N^2 - 1})}{\pi}. \quad (4.56)$$

Подставим в последнюю формулу $N = L/R_k$:

$$S_3 = \sigma_3 \frac{\ln \left(\frac{L}{R_k} + \sqrt{\frac{L^2}{R_k^2} - 1} \right)}{\pi}. \quad (4.57)$$

С учетом того, что глубина прокладки L много больше радиуса кабеля R_k , получим

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{\pi} \ln \frac{2L}{R_k}. \quad (4.58)$$

В некоторых литературных источниках встречается формула

$$S_3 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_3}{\pi} \ln \frac{2L}{R_k}, \quad (4.59)$$

коэффициент $2/3$ учитывает отвод тепла в глубину земли.

4.6. Нагрев и охлаждение кабеля

При изменении тока нагрузки кабеля его температура будет изменяться во времени. Зависимость температуры от времени получится в результате решения дифференциального уравнения (см. формулу (4.1)).

Рассмотрим упрощенный расчет. Предположим, что кабель является однородным цилиндром. Обозначим количество тепла, которое:

- выделилось в жиле от протекания тока, Q ;
- пошло на нагрев кабеля, Q_1 ;
- рассеялось в окружающую среду, Q_2 .

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (4.60)$$

За бесконечно малый промежуток времени dt уравнение теплового баланса (4.60) примет вид

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (4.61)$$

где

$$dQ = P_{\text{ж}} dt, \quad (4.62)$$

$$dQ_1 = C d\theta, \quad (4.63)$$

$$dQ_2 = P_2 dt = \frac{\theta}{S} dt, \quad (4.64)$$

$P_{\text{ж}}$ – мощность теплового потока, идущего от жилы; C – теплоемкость кабеля; P_2 – мощность теплового потока, идущего от кабеля в окружающую среду; S – тепловое сопротивление; θ – перепад температур.

Подставим перечисленные величины в уравнение (4.61), получим

$$P_{\text{ж}} dt = C d\theta + \frac{\theta}{S} dt. \quad (4.65)$$

Разделим переменные:

$$P_{\text{ж}} dt - \frac{\theta}{S} dt = C d\theta; \quad (P_{\text{ж}} - \theta/S) dt = C d\theta;$$

$$\frac{1}{S} (P_{\text{ж}} S - \theta) dt = C d\theta; \quad \frac{1}{SC} dt = \frac{d\theta}{(P_{\text{ж}} S - \theta)}$$

Интегрируем по времени от 0 до t и по перепаду температур от 0 до θ :

$$\frac{1}{SC} \int_0^t dt = \int_0^\theta \frac{d(\theta + P_{\text{ж}} S)}{(P_{\text{ж}} S + \theta)}. \quad (4.66)$$

После интегрирования получим

$$\frac{t}{SC} = -[\ln(P_{\text{ж}} S - \theta) - \ln(P_{\text{ж}} S)].$$

Преобразуем эту формулу:

$$\frac{t}{SC} = -\ln \frac{P_{\text{ж}} S - \theta}{P_{\text{ж}} S} = -\ln \left(1 - \frac{\theta}{P_{\text{ж}} S} \right), \quad -\frac{t}{SC} = \ln \left(1 - \frac{\theta}{P_{\text{ж}} S} \right).$$

Потенцируем последнее выражение:

$$e^{-\frac{t}{SC}} = 1 - \frac{\theta}{P_{\text{ж}} S}, \quad \frac{\theta}{P_{\text{ж}} S} = 1 - e^{-\frac{t}{SC}}, \quad \theta = P_{\text{ж}} S (1 - e^{-\frac{t}{SC}}), \quad (4.67)$$

где $P_{\text{ж}} S = \theta_{\text{max}}$.

Окончательно имеем

$$\theta = \theta_{\text{max}} (1 - e^{-\frac{t}{SC}}) \quad \text{или} \quad \theta = \theta_{\text{max}} (1 - e^{-\frac{t}{\beta}}), \quad (4.68)$$

где β – постоянная времени нагрева, $\beta = SC$.

Кабель охлаждается по уравнению

$$\theta = \theta_{\max} e^{-\frac{t}{\beta}} \quad (4.69)$$

При выводе этого уравнения мы принимали кабель за однородный цилиндр. Реальный кабель многослойный, и чтобы учесть это, вводится понятие эффективной теплоемкости

$$C = C_{\text{эф}} = C_{\text{ж}} + 0,5(C_{\text{из}} + C_{\text{об}} + \dots), \quad (4.70)$$

где $C_{\text{ж}}$ – теплоемкость токопроводящей жилы; $C_{\text{из}}$ – теплоемкость изоляции; $C_{\text{об}}$ – теплоемкость оболочки. Теплоемкость земли ($C_3 = 0$) не учитывается, земля вокруг кабеля прогревается в течение нескольких недель.

Тепловое сопротивление берется с учетом теплового сопротивления земли:

$$S = S_{\text{из}} + S_{\text{об}} + \dots + S_3. \quad (4.71)$$

Тепловое сопротивление любого i -го цилиндрического элемента конструкции кабеля ($S_{\text{из}}$, $S_{\text{об}}$ и т. д.) вычисляется по формуле (см. (4.18))

$$S_i = \frac{\sigma_i}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (4.72)$$

где σ_i – удельное тепловое сопротивление, $\text{м}^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; r_1 , r_2 – меньший и больший радиусы цилиндра; L – длина цилиндра ($L = 1 \text{ м}$).

Теплоемкость любого i -го цилиндрического элемента конструкции кабеля вычисляется по формуле

$$C_i = VL = c_i \rho_i \pi (r_2^2 - r_1^2) L, \quad (4.73)$$

где V – объем, м^3 ; c_i – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}^{\circ}\text{C})$; ρ_i – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$

Для токопроводящей жилы формула (4.73) примет вид

$$C_{\text{ж}} = c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}}, \quad (4.74)$$

где $S_{\text{ж}}$ – сечение жилы (по металлу), м^2

Постоянная времени нагрева показывает время, за которое температура кабеля изменится в e раз от первоначального значения. Температура кабеля стабилизируется через $(3-5)\beta$, что составляет несколько часов.

Распишем уравнение (4.68):

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0)(1 - e^{-\frac{t}{\beta}}), \quad (4.75)$$

где T_0 – температура окружающей среды; $(T_{\max} - T_0) = \theta$ – максимальный перепад температур; T – текущая температура.

Уравнение (4.75) представляет собой экспоненту (рис. 4.8), которая изменяется от температуры окружающей среды (T_0) до максимальный температуры (T_{\max}) с постоянной времени β .

Существует два способа определения постоянной времени нагрева β . Первый способ – *метод двух третей*. В уравнение (4.68) подставим $t = \beta$:

$$\theta = \theta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta}} \right); \quad \theta = \theta_{\max} (1 - e^{-1}) \approx 0,623 \theta_{\max} \approx \frac{2}{3} \theta_{\max} \quad (4.76)$$

За время, равное β , температура кабеля повышается на $2/3$ от максимальной температуры (см. рис. 4.8).

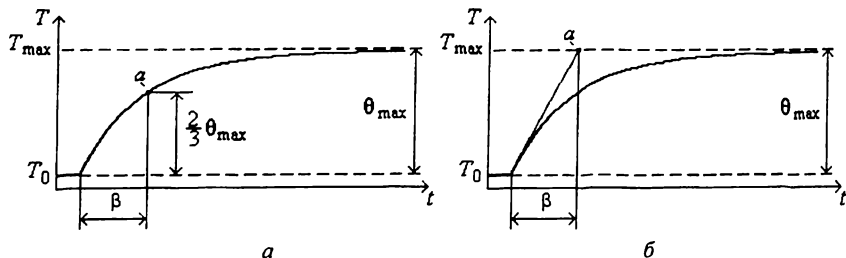


Рис. 4.8. Определение постоянной времени нагрева: а – методом двух третей; б – методом касательной

Второй способ – *метод касательной*. Про дифференцируем уравнение (4.68) по времени:

$$\theta = \theta_{\max} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{SC}\right) \right) \quad \text{или} \quad \frac{d\theta}{dt} = -\theta_{\max} \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) \left(-\frac{1}{\beta}\right). \quad (4.77)$$

Для исключения множителя $e^{\frac{t}{\beta}}$ подставим $t = 0$, тогда

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_{\max}}{\beta}. \quad (4.78)$$

Производная $d\theta/dt$ – это есть не что иное, как касательная, проведенная к кривой нагрева в момент времени $t = 0$ (рис. 4.9, б). Этот метод менее точен из-за сложности проведения касательной.

4.7. Определение тока перегрузки

В том случае если кабель не был подключен к нагрузке и по нему не протекал ток, то его температура равна температуре окружающей среды T_0 . При включении кабеля на номинальный ток он начинает разогреваться согласно уравнению (4.68) (см. рис. 4.8):

$$\theta = \theta_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) \right] \quad \text{или} \quad T = (T_{\max} - T_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) \right], \quad (4.79)$$

где $\theta_{\max} = T_{\max} - T_0$ – максимально допустимый перепад температуры между токопроводящей жилой и окружающей средой, который возникает при протекании номинального тока I_n ; T_{\max} – максимально допустимая температура для кабеля (другое название – рабочая температура $T_{\text{раб}}$).

Максимальной температуры T_{\max} жила достигнет после нескольких часов нагрева, поэтому в начальный период через кабель можно пропускать ток больше допустимого – ток перегрузки $I_{\text{пер}}$. При протекании тока перегрузки температура кабеля будет изменяться:

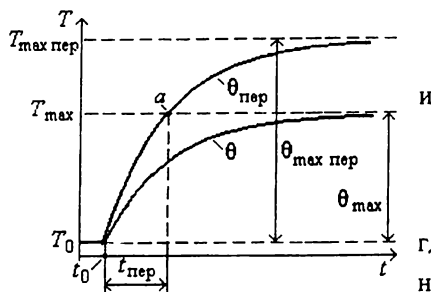
$$\theta_{\text{пер}} = \theta_{\max \text{ пер}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) \right]. \quad (4.80)$$

В момент времени $t_{\text{пер}}$ кривая $\theta_{\text{пер}}$ пересечет уровень θ_{\max} (рис. 4.9, точка а),

$$\theta_{\max} = \theta_{\max \text{ пер}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{пер}}}{\beta}\right) \right], \quad (4.81)$$

далее нагревать кабель нельзя.

В соответствии с тепловым законом Ома (4.19) и выражением (4.20)



$$\theta_{\max} = I_{\text{н}}^2 R_{\text{ж}} \sum S \quad (4.82)$$

$$\theta_{\max \text{ пер}} = I_{\text{пер}}^2 R_{\text{ж}} \sum S, \quad (4.83)$$

где $\sum S$ – сумма тепловых сопротивлений всех элементов конструкции кабеля.

Рис. 4.9. Разогрев кабеля при токе перегрузки

Зададим условия равенства температур θ_{\max} и $\theta_{\max \text{ пер}}$ в точке a (см. рис. 4.9), для чего подставим уравнения (4.82) и (4.83) в (4.81):

$$I_{\text{н}}^2 R_{\text{ж}} \sum S = I_{\text{пер}}^2 R_{\text{ж}} \sum S \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{пер}}}{\beta}\right) \right]. \quad (4.84)$$

Выразим из (4.84) ток перегрузки:

$$I_{\text{пер}} = \frac{I_{\text{н}}}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{пер}}}{\beta}\right)}}. \quad (4.85)$$

4.8. Расчет тока короткого замыкания токопроводящей жилы

Во время нормальной работы кабеля по его токопроводящим жилам протекает ток $I_{\text{н}}$ (рис. 4.10, а), ограниченный сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$. В случае возникновения на нагрузке короткого замыкания (рис. 4.10, б), сопротивление нагрузки становится равным нулю ($R_{\text{н}} = 0$), через кабель протекает значительный ток $I_{\text{к.з.}}$, ограниченный только сопротивлением токопроводящей жилы $R_{\text{ж}}$, которое много меньше $R_{\text{н}}$. Если кабель не отключить за доли секунды, то произойдет быстрый разогрев жилы до значительной температуры. Это приводит к деструкции изоляции и ее сгоранию.

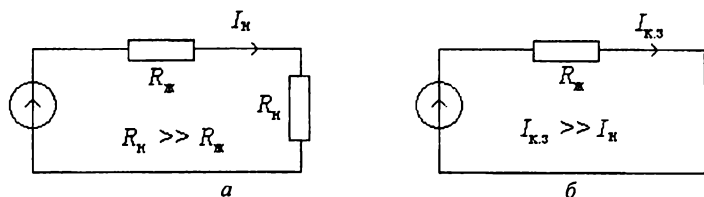


Рис. 4.10. Электрическая схема: *а* – до замыкания; *б* – после замыкания

Найдем зависимость тока короткого замыкания $I_{к.з}$ от времени короткого замыкания $\tau_{к.з}$, для этого составим уравнение теплового баланса:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (4.86)$$

где Q – тепло, которое выделилось в токопроводящей жиле; Q_1 – тепло, которое было поглощено теплоемкостью токопроводящей жилы; Q_2 – тепло, которое рассеялось в окружающую среду.

Из-за того, что время короткого замыкания очень мало, тепло не успевает рассеяться в окружающую среду, $Q_2 = 0$, поэтому $Q = Q_1$, т.е. все тепло идет на нагрев жилы.

За бесконечно малый промежуток времени

$$dQ = dQ_1. \quad (4.87)$$

Подставим в (4.87) выражения (4.62) и (4.63):

$$P_{ж} dt = Cd\theta, \quad (4.88)$$

а в (4.88) выражение (4.35):

$$I^2 R_{ж} dt = Cd\theta. \quad (4.89)$$

Учтем зависимость сопротивления токопроводящей жилы от температуры, так как температура при коротком замыкании существенно изменяется:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha\theta), \quad (4.90)$$

где $\theta = T_2 - T_1$ – перепад температуры (T_1 – температура жилы перед коротким замыканием; T_2 – температура жилы после короткого замыкания); R_1 – сопротивление токопроводящей жилы перед коротким замыканием; R_2 – сопротивление токопроводящей жилы после короткого замыкания; α – температурный коэффициент сопротивления.

Подставим в (4.89) выражение (4.90) и разделим переменные:

$$I^2 R_1 (1 + \alpha \theta) dt = C d\theta, \quad I^2 R_1 dt = \frac{C d\theta}{(1 + \alpha \theta)}. \quad (4.91)$$

Проинтегрируем последнее выражение по времени от 0 до θ :

$$\int_0^t I^2 R_1 dt = \frac{1}{\alpha} \int_0^\theta \frac{C d(\theta \alpha + 1)}{(1 + \alpha \theta)}, \quad I^2 R_1 t = \frac{C}{\alpha} \ln(1 + \alpha \theta).$$

Окончательно имеем

$$I = \sqrt{\frac{C}{\alpha R_1 t} \ln[1 + \alpha(T_2 - T_1)]}. \quad (4.92)$$

За время короткого замыкания нагреется только жила, поэтому $C = C_{\text{ж}}$. Защита отключит кабель через время $t = \tau_{\text{к.з}}$ при токе $I_{\text{к.з}}$, поэтому температура не превысит $T_2 = T_{\text{к.з}}$.

$$I_{\text{к.з}} = \sqrt{\frac{C_{\text{ж}}}{\alpha R_1 \tau_{\text{к.з}}} \ln[1 + \alpha(T_{\text{к.з}} - T_1)]}, \quad (4.93)$$

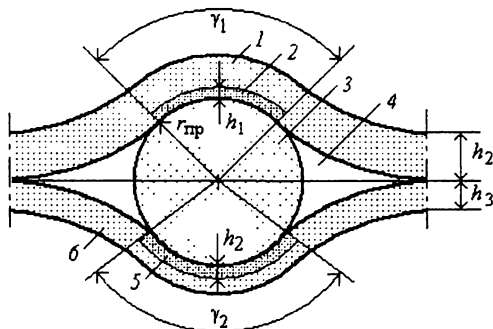
где R_1 – сопротивление токопроводящей жилы; вычисляется оно по формуле (3.24) для температуры, которую жила имела перед коротким замыканием.

В том случае, если короткое замыкание произошло в момент включения кабеля, то $T_1 = T_0$. Температура $T_{\text{к.з}}$ определяется типом изоляции, например для сшитой полиэтиленовой изоляции она равна 250 °С. Теплотемкость жилы вычисляется по формуле (4.74).

4.9. Расчет тока короткого замыкания проволочного экрана

Проволочный экран (см. главу 5) имеет по сравнению с токопроводящей жилой большую поверхность соприкосновения с элементами конструкции кабеля, поэтому при расчете тока короткого замыкания экрана надо учитывать теплоемкость соседних слоев 1 и 5 (рис. 4.11). За время короткого замыкания (≈ 1 с) успевает нагреваться слой, окружающий проволоку, на расстоянии $(h_1 \text{ и } h_2) \approx 0,2 \dots 0,5$ мм.

Рис. 4.11. Фрагмент проволочного экрана: 1 – слой над проволокой; 2 и 5 – области нагрева; 3 – проволока; 4 – незаполненное пространство; 6 – слой под проволокой



Расчет тока короткого замыкания проволочного экрана производится по формуле (4.92), в которую подставляется теплоемкость

$$C = C_{\text{пр}} + C_1 + C_2, \quad (4.94)$$

где $C_{\text{пр}}$ – теплоемкость проволоки; C_1 – теплоемкость области 2 (см. рис. 4.11); C_2 – теплоемкость области 5.

Теплоемкости вычисляются на длине 1 м ($L=1$):

$$C_{\text{пр}} = \pi r_{\text{пр}}^2 c_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}} L, \quad C_1 = c_1 \rho_1 S_1 L, \quad C_2 = c_2 \rho_2 S_2 L, \quad (4.95)$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус проволоки; $c_{\text{пр}}$, c_1 и c_2 – удельные теплоемкости; $\rho_{\text{пр}}$, ρ_1 и ρ_2 – плотности; S_1 – площадь области 2; S_2 – площадь области 5.

Площади областей 2 и 5:

$$S_1 = \gamma_1 ((r_{\text{пр}} + h_1)^2 - (r_{\text{пр}})^2), \quad S_2 = \gamma_2 ((r_{\text{пр}} + h_2)^2 - (r_{\text{пр}})^2), \quad (4.96)$$

где γ_1 и γ_2 – углы, рад (примерно $\pi/2$); h_1 и h_2 – глубина прогрева областей 2 и 5.

5. КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

В настоящей главе представлены наиболее часто встречаемые силовые кабели на среднее и высокое напряжение. На напряжения 1–10 кВ (рис. 5.1) применяются кабели с жилами секторной формы в общей оболочке; марка ААГ 3х120, 10 кВ: первая А – алюминиевая жила, бумажная пропитанная изоляция (не обозначается), вторая А – алюминиевая оболочка, без защитных покровов (Г – голый). Секторная форма жилы обеспечивает малый диаметр кабеля.

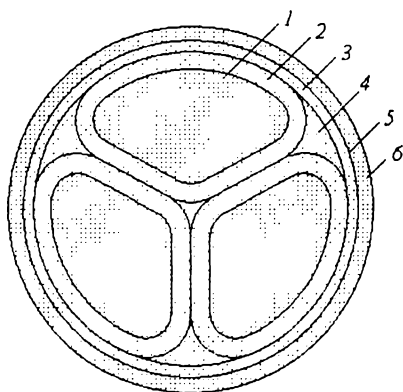


Рис. 5.1. Силовой кабель с пропитанной бумажной изоляцией на напряжения до 10 кВ: 1 – токопроводящая жила секторной формы; 2 – фазная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – межфазное заполнение; 5 – полупроводящая бумага; 6 – металлическая (свинцовая или алюминиевая) оболочка

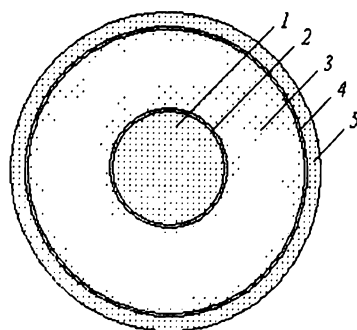


Рис. 5.2. Силовой кабель с пропитанной бумажной изоляцией на напряжения 20 и 35 кВ: 1 – круглая токопроводящая жила; 2, 4 – полупроводящая бумага; 3 – изоляция; 5 – свинцовая оболочка

Выше напряжения 10 кВ жилы секторной формы не применяются (рис. 5.2), так как у краев закругления сектора возникают большие тангенциальные составляющие напряженности электрического поля, приводящие к пробое изоляции. Технология изготовления кабелей с пропитанной бумажной изоляцией следующая. Токопроводящие жилы обматываются бумажными лентами из сульфатной бумаги марки К-120 (толщина бумаги 0,12 мм). Для изоляции применяется бумага, полученная сульфатным (щелочным) способом. Бумага, полученная сульфитным (кислотным) способом, не используется, так как из-за остатков кислоты она быстро

подвергается старению. Три изолированные жилы скручиваются вместе, и по общей скрутке наматываются ленты поясной изоляции, при этом в межфазное пространство подается кордель (скрученная бумажная лента).

Последние две ленты, которые наматываются на поясную изоляцию, изготовлены из полупроводящей бумаги. Этот полупроводящий экран выполняет две функции: предотвращает образование полостей на границе изоляция – металл и предохраняет изоляцию от теплового воздействия при наложении металлической оболочки. При наложении оболочки температура свинца составляет 400 °С, алюминия – 500 °С. За время воздействия температуры подгорает только полупроводящая бумага, это не ухудшает ее полупроводящие свойства.

После общей скрутки и наложения поясной изоляции кабель подвергается сушке в вакууме (2 мм рт. ст. – кабели на 20 и 35 кВ; 10 мм рт. ст. – кабели до 10 кВ) при температуре 125 °С. Влажность бумажной изоляции уменьшается с 6,0% до 0,1 %. После сушки изоляция пропитывается маслосканифольным составом. Сканифоль добавляется к маслу для увеличения вязкости и уменьшения скорости старения масла. Маслосканифольный состав варится отдельно и потом дегазируется. Отсутствие в бумажной пропитанной изоляции влаги и газовых включений обеспечивает высокую электрическую прочность и долговечность кабеля. Срок его службы 25 лет при рабочей температуре 60 °С.

После пропитки кабель охлаждается с тем, чтобы после наложения оболочки не произошла усадка изоляции с образованием пустот между изоляцией и оболочкой. Наложение свинцовой оболочки производится на прессе непрерывного действия, а алюминиевой оболочки – на прессе прерывного действия.

Пропитанная маслосканифольным составом бумага может длительное время работать при напряженности электрического поля 3–4 кВ/мм. Для создания кабелей на напряжения 110 кВ и выше необходима изоляция с большим рабочим градиентом. Электрическая прочность пропитанной маслом бумаги возрастает с повышением давления, так как оно препятствует образованию газовых включений. В кабелях на напряжения более 110 кВ применяется бумажная изоляция, пропитанная маслом, находящимся под давлением, такие кабели называют маслосканифольными (рис. 5.3). Кабель имеет токопроводящую жилу 1, в которой с помощью Z-образных проволок 7 и сегментных проволок 8 образован канал. С целью уменьшения напряженности электрического поля у жилы, первый слой изоляции выполнен из уплотненной бумаги с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 4,3$, а второй слой – с $\epsilon_2 = 3,5$. Различные диэлектрические проницаемости вызывают перераспределение напряженности электрического поля в изоляции.

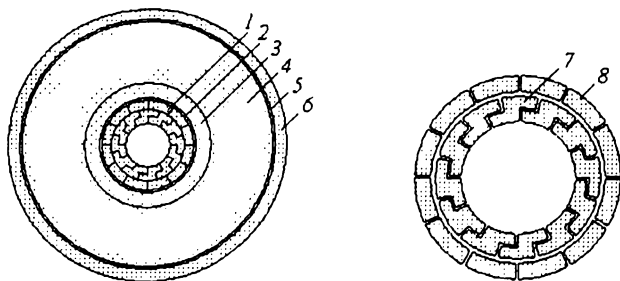


Рис. 5.3. Силовой маслонаполненный кабель низкого давления (5 атм) на напряжение 110 кВ: 1 – токопроводящая жила с каналом; 2, 5 – полупроводящая бумага; 3 – первый слой изоляции; 4 – второй слой изоляции; 6 – свинцовая оболочка; 7 – Z-образные проволоки токопроводящей жилы; 8 – сегментные проволоки

Канал предназначен для перемещения масла из кабеля в специальный бак при нагревании и обратно в кабель при охлаждении. Принудительной циркуляции масла нет. Кабель имеет свинцовую или гофрированную алюминиевую оболочку. Изоляцию кабеля сушат при вакууме 10^{-4} мм рт.ст., затем под вакуумом накладывают свинцовую оболочку и пропитывают изоляцию маслом через канал.

Кабели высокого давления в стальной трубе с маслом на напряжения 110, 220, 330, 380, и 500 кВ работают при давлении 11–16 атм (рис. 5.4).

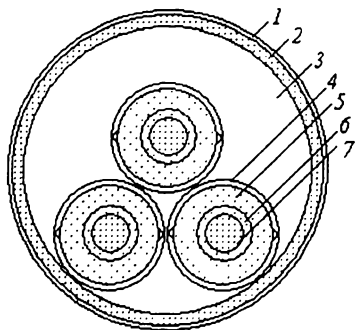


Рис. 5.4. Силовой маслонаполненный кабель высокого давления на напряжение 500 кВ: 1 – защитный покров; 2 – стальная труба; 3 – масло; 4 – экран из медных перфорированных лент и проволоки скольжения; 5 – первый слой изоляции; 6 – второй слой изоляции; 7 – токопроводящая жила

Жилы кабеля скручивают из медных круглых проволок. Изоляцию накладывают в виде бумажных лент. Сушат изоляцию при вакууме 10^{-4} мм рт.ст., затем пропитывают маслом и под вакуумом накладывают временную свинцовую оболочку для защиты от увлажнения во время транспор-

тировки. При затягивании жил в трубу временная свинцовая оболочка разрезается специальной машиной и удаляется. Маслонаполненные кабели имеют высокую надежность и работают 30–50 лет. В настоящее время маслонаполненные кабели заменяют кабелями со сшитой полиэтиленовой изоляцией.

На рис. 5.5 представлен кабель со сшитой (вулканизированной) полиэтиленовой изоляцией.

Токопроводящая жила 1 скручивается из алюминиевых (марка кабеля АПвП) или медных (марка кабеля ПвП, буква «М» для медных жил не пишется) проволок. Изоляция 3 и электропроводящие экраны 2 и 4 одновременно накладываются на жилу на экструдере, который имеет три шнека. Электропроводящие экраны 2 и 4 предназначены для предотвращения образования воздушных прослоек между диэлектриком и металлом. В таких воздушных прослойках возникает ионизация, приводящая к старению изоляции и ее преждевременному пробое.

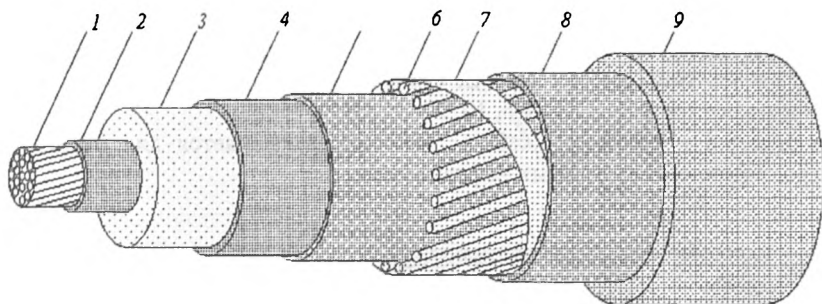


Рис. 5.5. Кабель со сшитой полиэтиленовой изоляцией: 1 – токопроводящая жила; 2 – экран по жиле из электропроводящего полиэтилена; 3 – изоляция; 4 – экран по изоляции из электропроводящего полиэтилена; 5 – электропроводящая крепированная бумага; 6 – экран из медных проволок; 7 – медная лента; 8 – разделительный слой из крепированной бумаги; 9 – полиэтиленовая оболочка

Кроме того, полупроводящие экраны обеспечивают создание строго радиального электрического поля, т.е. исключают эффект «проволочности». Экран из медных проволок 6 выполнен обмоткой, между проволоками имеется зазор, так как сечение экрана должно составлять 1/3 от сечения токопроводящей жилы, что следует из условия протекания тока короткого замыкания. Для создания электрического контакта между проволоками он обматывается медной лентой 7. Два слоя электропроводящей крепированной бумаги 5 предназначены для создания электрическо-

го распределенного контакта между проволоками экрана и полупроводящим экраном 4.

Конструкция разделительного слоя 8 зависит от условий эксплуатации кабеля:

- 1) два слоя крепированной бумаги – прокладка в земле (марка ПвП);
- 2) водоблокирующая лента – прокладка в земле с повышенной влажностью (марка ПвПг, буква «г» – герметизированный);
- 3) водоблокирующая лента и алюмополимерная лента – прокладка в несудоходных водоемах (марка ПвП2г, буква «2г» – двойная герметизация).

При попадании влаги на водоблокирующую ленту она набухает и не пропускает влагу. Оболочка кабеля 8 может быть выполнена из полиэтилена (марка ПвП) или поливинилхлоридного пластика (марка ПвВ, буква «В» – винил).

Для кабеля марки ПвВнг-LS применяется поливинилхлоридный пластикат, не поддерживающий горение (буквы «нг») и выделяющий мало дыма (Low – пониженный, Smoke – дым).

Рабочая температура кабеля со сшитой полиэтиленовой изоляцией 90 °С. При токах короткого замыкания изоляция способна кратковременно выдержать температуру 250 °С. Срок службы кабеля 30 лет. Кабели изготавливают на напряжения 6, 10, 20, 35 кВ.

На рис. 5.6 представлен кабель, который применяется для питания электродвигателей погружных нефтенасосов.

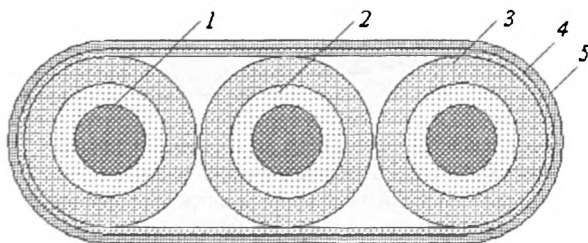


Рис. 5.6. Кабель для питания электродвигателей погружных нефтенасосов: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция; 3 – оболочка; 4 – подушка из нетканого полотна; 5 – ленточная броня

В нефтяной скважине температура составляет 70–120 °С, давление 100–300 атм. Кабель марки КПБП-90 имеет изоляцию и оболочку, выполненную из полиэтилена (П) высокой плотности, бронирован стальными оцинкованными лентами (Б), плоский (П). В конце обозначения ставится буква К в том случае, если кабель круглый. Максимальная рабочая температура 90 °С. Номинальное переменное напряжение 3,3 кВ. Жилы однопроволочные сечением от 6 до 50 мм². Кабель марки КПвПпБПТ-120 имеет изоляцию из сшитого (вулканизированного) поли-

этилена (Пв), оболочку из блок-сополимера этилена с полипропиленом (Пп), бронированный (Б), плоский (П), термостойкий (Т), максимальная рабочая температура 120 °С. Блок-сополимер этилена с полипропиленом нельзя накладывать непосредственно на медную жилу, так как он не стоек к ионам меди. Для увеличения стойкости блок-сополимера этилена с полипропиленом к ионам меди в него вводят специальные добавки, что увеличивает стоимость материала на 20 %. Сшивка изоляции может производиться с помощью перекиси дикумила, силана или облучения частицами высоких энергий.

Кабель марки АВВГнг-Т (рис. 5.7) предназначен для передачи и распределения электрической энергии в стационарных установках на напряжение до 1 кВ.

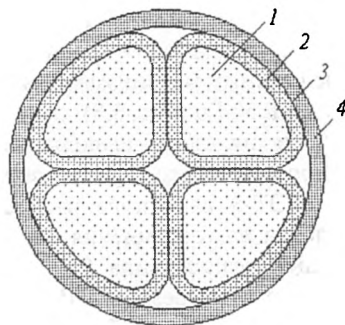


Рис. 5.7. Кабель марки АВВГнг-Т: 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция из ПВХ пластиката; 3 – обмотка из нетканого полотна; 4 – оболочка из ПВХ пластиката

Кабель имеет алюминиевую жилу (А), изоляцию из ПВХ пластиката (В), оболочку из ПВХ пластиката (В), который не распространяет горение (нг), в тропическом (Т) исполнении, т.е. кабель стоек к воздействию плесневых грибов. Буква «Г» (голый) означает, что кабель не имеет брони и защитных покровов.

Кабель может быть проложен:

- на воздухе при отсутствии опасности механических повреждений в ходе эксплуатации;
- в сухих или сырых помещениях;
- на специальных кабельных эстакадах, по мостам и в блоках;
- в пожароопасных помещениях и взрывоопасных зонах;
- на вертикальных, наклонных и горизонтальных трассах;
- в местах, подверженных вибрации;
- на атомных станциях;
- в тропическом климате.

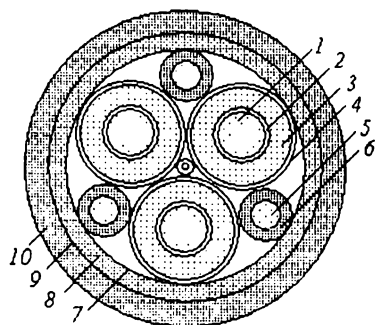


Рис. 5.8. Силовой высоковольтный гибкий кабель: 1 – токопроводящая жила из медных луженых проволок; 2, 4 – экраны из электропроводящей резины; 3 – изоляция из резины; 5 – жила заземления; 6 – электропроводящая оболочка; 7, 9 – обмотки из термоскрепленного полотна, 8 – внутренняя оболочка из электропроводящей резины; 10 – внешняя оболочка

Силовые гибкие кабели марки КШВГТ-10 (К – кабель, Ш – шланговый, В – высоковольтный, Г – гибкий, Т – теплостойкий, 10 кВ) предназначены для стационарной и подвижной прокладки и присоединения передвижных механизмов к электрическим сетям напряжением 10 кВ и частотой 50 Гц (рис. 5.8).

Изоляция кабеля выполняется из резины типа РТПИ-1 на основе этиленпропиленового каучука, экраны 2 и 4 – из электропроводящей резины типа РЭТ-3 на основе изопреновых и этиленпропиленовых каучуков; оболочка жил заземления 6 и внутренняя оболочка 8 – из электропроводящей резины типа РЭ-2 на основе нитрильных каучуков; внешняя оболочка – из резины РШ-1 на основе изопренового и бутадиенового каучука. В центре кабеля находится сердечник из термофиксированных нитей в оболочке из электропроводящей резины РЭ-2.

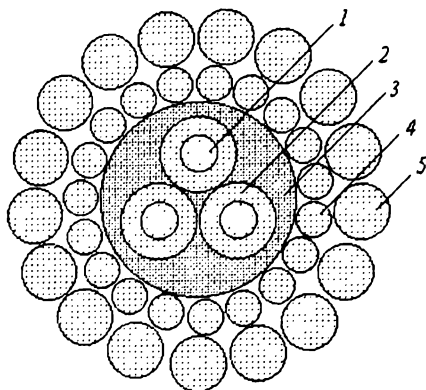
Кабель предназначен для эксплуатации на суше, реках, озерах и море. Он устойчив к воздействию:

- синусоидальной вибрации в диапазоне частот 10–5000 Гц с ускорением 400 м/с^2 ,
- акустического шума в диапазоне 50–100 Гц до 160 дБ,
- пониженного атмосферного давления до 0,5 атм и повышенного до 3 атм,
- соляного морского тумана, плесневых грибов.

Максимальная наработка кабеля при температуре 85°C – 10 000 часов, при 125°C – 1800 часов. Не допускается осевое кручение кабеля.

Геофизический кабель марки КГ-3х4,0-170-130 (К – кабель, Г – грузонесущий, 3 жилы сечением 4 мм^2 , разрывное усилие 170 кН, рабочая температура 130°C) предназначен для работы в скважинах. Изоляция и оболочка выполняются из тех же материалов, что и в кабелях, питающих электродвигатели погружных нефтенасосов.

Рис. 5.9. Геофизический кабель: 1 – токопроводящая жила из медных проволок; 2 – изоляция; 3 – оболочка; 4, 5 – проволочная броня



Высокое разрывное усилие обеспечивается проволочной броней, которая выполнена из стальных оцинкованных проволок, повивы имеют противоположное направление скрутки. Кабель предназначен для питания геофизических приборов, опускаемых в скважину. Он также может быть использован как нагревательный для ликвидации парафиногидратных отложений.

Описание конструкций других кабелей, их эксплуатационных характеристик и области применения можно найти в рекомендуемой литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы кабельной техники: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Леонов, [и др.]; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 432 с.
2. Основы кабельной техники / В.А. Привезенцев, [и др.]; под ред. В.А. Привезенцева. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.
3. Кранихфельд, Л.И. /Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов / Л.И. Кранихфельд [и др.]. – М.: Высш. шк., 1972. – 384 с.
4. Белоруссов, Н.И. Электрические кабели и провода / Н.И. Белоруссов. – М.: Энергия, 1971. – 512 с.
5. Белорусов, А.Е. /Электрические кабели, провода и шнуры: справочник/ Н. И. Белоруссов, [и др.]; под ред. Н.И. Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 536 с.

Учебное издание

Ковригин Леонид Александрович

ОСНОВЫ КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.Г. Важенина

Изд. лиц. ЛР № 020370

Подписано в печать 29.09.2006. Формат 60х90/16. Набор компьютерный.
Усл. печ. л. 5,9. Уч.-изд. л. 5,9. Тираж 300 экз. Заказ № 122/2006.

Издательство

Пермского государственного технического университета.

Адрес: 614000, Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.

Тел. (342) 219-80-33