



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электрические станции»

А.С. Красько  
Е.Г. Пономаренко

**ТЕХНИКА  
ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
(ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ)**

*Курс лекций*

**Часть 1**

Минск  
БНТУ  
2012

УДК 621.3.027.3 (075.8)

ББК 31.24я7

К 78

Р е ц е н з е н т ы:

*А.А. Гончар, С.В. Домников*

**Красько, А.С.**

К 78      Техника высоких напряжений (изоляция и перенапряжения): курс лекций: в 2 ч. / А.С. Красько, Е.Г. Пономаренко. – Минск: БНТУ, 2011. – Ч. 1: Электрические разряды в газах. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств. Внутренняя изоляция. – 119 с.

ISBN 978-985-525-470-7 (Ч. 1).

В первой части курса лекций изложены вопросы электрических разрядов в газообразных, жидких, твердых и комбинированных диэлектриках, конструкция и методы расчета внешней изоляции линий электропередачи и подстанций, изоляция оборудования высокого напряжения (трансформаторов, конденсаторов, кабелей и электрических машин).

Издание предназначено для студентов электроэнергетических специальностей вузов.

УДК 621.3.027.3 (075.8)

ББК 31.24я7

ISBN 978-985-525-470-7 (Ч. 1)

ISBN 978-985-525-471-4

© Красько А.С.,

Пономаренко Е.Г., 2011

© БНТУ, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	5
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ</b> .....	8
1.1. Газ как изолирующая среда .....	8
1.2. Виды электрических разрядов в газах.....	9
1.3. Разряд в воздушном промежутке при длительном воздействии напряжения .....	11
1.4. Лавина электронов .....	13
1.5. Пробивное напряжение.....	14
1.6. Стримерная теория разряда .....	16
1.7. Разряды в неоднородном поле. закон подобия разрядов .....	17
1.8. Разряды в несимметричных полях. Эффект полярности .....	22
1.9. Понятие лидера и главного разряда .....	24
1.10. Дуговой разряд.....	25
1.11. Коронный разряд на проводах ЛЭП.....	27
1.12. Корона на проводах постоянного тока.....	28
1.13. Корона на проводах ЛЭП переменного тока.....	29
1.14. Потери энергии на корону .....	31
1.15. Разряды в воздушном промежутке при импульсном напряжении.....	31
1.16. Статистическое распределение разрядных напряжений .....	34
1.17. Разряды в воздухе вдоль поверхности твердой изоляции .....	36
1.18. Поверхностный разряд в однородном поле .....	36
1.19. Поверхностный разряд в резконеоднородном поле.....	37
1.20. Разряды вдоль увлажненной и загрязненной поверхности .....	38
<b>2. ВНЕШНЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ</b> .....	40
2.1. Назначение, типы и характеристики изоляторов .....	40
2.2. Конструкции и характеристики станционных и линейных изоляторов .....	42
2.3. Гирлянды изоляторов. Распределение напряжения по элементам гирлянды .....	51
2.4. Выбор изоляторов .....	54
2.5. Выбор основных изоляционных промежутков ЛЭП и РУ .....	59

<b>3. ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ</b> .....	62
3.1. Общие сведения и требования .....	62
3.2. Газовая изоляция.....	63
3.3. Вакуумная изоляция .....	65
3.4. Жидкая изоляция.....	66
3.5. Кратковременная и длительная электрическая прочность внутренней изоляции.....	66
3.6. Допустимые напряжения для внутренней изоляции .....	68
3.7. Частичные разряды во внутренней изоляции .....	70
3.8. Факторы, влияющие на электрическую прочность внутренней изоляции.....	73
3.9. Маслобарьерная изоляция (МБИ) .....	74
3.10. Бумажно-масляная изоляции (БМИ) .....	75
3.11. Изоляция силовых трансформаторов .....	76
3.12. Испытания трансформаторов .....	83
3.13. Изоляция кабелей. Общие сведения и классификация .....	85
3.14. Кабели с пластмассовой изоляцией (до 35 кВ) .....	87
3.15. Провода и кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ.....	89
3.16. Кабели с пластмассовой изоляцией на напряжения 6–500 кВ.....	91
3.17. Некоторые вопросы эксплуатации кабелей с пластмассовой изоляцией .....	95
3.18. Кабели с бумажно-масляной изоляцией (до 35 кВ) .....	95
3.19. Кабели с резиновой изоляцией (до 35 кВ).....	98
3.20. Маслонаполненные кабели (110–750 кВ).....	99
3.21. Газонаполненные кабели .....	104
3.22. Кабели постоянного тока.....	106
3.23. Кратковременная и длительная электрическая прочность изоляции кабелей.....	107
3.24. Изоляция электрических машин высокого напряжения ..	109
3.25. Изоляция силовых конденсаторов.....	113
3.26. Изоляция герметичных распределительных устройств....	116
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	118

## ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние 30–40 лет достигнут значительный прогресс как в области разработки новых изоляционных материалов, так и в области технологии изготовления изоляции высоковольтного электрического оборудования. Однако, в настоящее время в научно-технической библиотеке БНТУ практически отсутствуют новые учебники и учебные пособия по дисциплинам «Техника высоких напряжений» и «Изоляция и перенапряжения». Все учебные издания по данным дисциплинам в основном выпущены в 70–80-х годах прошлого столетия. Поэтому авторы данной работы стремились восполнить этот пробел. Наибольшее внимание уделялось вопросам конструирования изоляции высоковольтного оборудования. Основными источниками информации выступали каталоги и проспекты различных фирм и производителей электрического оборудования.

Введение и главы 2 и 3 написаны А.С. Красько, глава 1 – Е.Г. Пономаренко. Авторы выражают глубокую признательность рецензентам канд. техн. наук, доценту кафедры «Электроснабжение» БНТУ А.А. Гончару и канд. техн. наук, доценту кафедры «Электротехника и электроника» БНТУ С.В. Домникову.

## ВВЕДЕНИЕ

Надежная, долговременная и экономичная работа электрической системы в основном определяется изоляцией электрооборудования и других звеньев системы. Разрушение и повреждение изоляции являются главными причинами аварий в электрических установках. Поэтому конструктивное решение изоляции, выбор изоляционных материалов и технологии изготовления определяют надежность, стоимость и конкурентную способность электрического оборудования. Следует отметить, что в общей стоимости высоковольтного оборудования изоляционная составляющая занимает более 60 %.

В данном пособии изложены вопросы электрического разряда в газообразных жидких и твердых диэлектриках. Рассмотрена изоляция распределительных устройств и линий электропередач, а также оборудования высокого напряжения: силовых трансформаторов, электрических машин, кабелей, конденсаторов аппаратов.

В зависимости от условий работы изоляция подразделяется на *внешнюю* и *внутреннюю*. К внешней относятся воздушные промежутки, а также изоляция, соприкасающаяся с воздухом. При этом электрическая прочность изоляции зависит от температуры, давления и влажности. К внутренней относится изоляция, не подверженная воздействию внешних условий.

По агрегатному состоянию изоляция может быть *газообразной*, *жидкой* и *твердой*. Газообразная и жидкая изоляция обладает самовосстанавливающимися свойствами, т. е. после пробоя электрическая прочность газообразной и жидкой изоляции восстанавливается при снятии напряжения.

Изоляция электрооборудования, предназначенного для работы в электрических сетях, подразделяется на *классы напряжения*. Классом напряжения называется номинальное междуфазное напряжение электрической сети, для работы в которых предназначено оборудование. Для каждого класса напряжения установлено наибольшее рабочее напряжение (на 10–15 % выше номинального), которое изоляция должна выдерживать длительное время. Класс напряжения характеризуется уровнем изоляции, под которым понимают совокупность испытательных напряжений согласно ГОСТ или ТУ.

При изготовлении изоляции необходимо обеспечить:

- 1) требуемые электрические параметры оборудования: рабочее напряжение, емкость, индуктивность, активное сопротивление, диэлектрические потери;
- 2) срок службы при рабочем напряжении и допустимой температуре;
- 3) достаточную электрическую прочность при воздействии перенапряжений;
- 4) механическую прочность с учетом возможных вибраций, ударных нагрузок при коротком замыкании (КЗ) и других режимах работы;
- 5) требуемую надежность;
- 6) минимальную стоимость;
- 7) допустимые (минимальные) размеры и массу;
- 8) технологичность изготовления;
- 9) простоту ремонта и безопасность обслуживания;
- 10) экологическую безопасность;
- 11) стойкость к внешним воздействиям окружающей среды.

Выполнение всех требований осуществляется на основании технико-экономических расчетов, направленных на минимизацию затрат:

$$Z = E \cdot K + I + M(Y) \rightarrow \min ,$$

где  $Z$  – ежегодные (приведенные) затраты;

$K$  – капитальные затраты;

$E$  – нормативный коэффициент эффективности;

$I$  – эксплуатационные издержки;

$M(Y)$  – математическое ожидание годового ущерба.

В процессе эксплуатации изоляция подвергается следующим *воздействиям*:

- 1) электрическому: рабочие напряжения при нормальных условиях эксплуатации, внутренние и внешние перенапряжения;
- 2) тепловому: при нормальной рабочей температуре и перегреве в аварийных и форсированных режимах;
- 3) воздействию окружающей среды: влажность, температура, загрязнение;
- 4) механическим воздействиям всех видов в любых условиях;
- 5) воздействию агрессивных агентов окружающей среды или компонентов, образующихся в изоляции;
- 6) воздействию живых организмов.

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

## 1.1. Газ как изолирующая среда

Газы как изолирующая среда широко применяются на воздушных линиях, в распределительных устройствах (РУ) и другой электрической аппаратуре. В качестве изолирующих газов используется воздух, элегаз ( $\text{SF}_6$ ), азот, смесь элегаза с азотом и др.

Достоинства газовой изоляции – это относительно низкая стоимость, относительно высокая электрическая прочность, свойство «самовосстановления», хорошая теплопроводность.

**Воздух.** При нормальных атмосферных условиях (давление  $P = 100$  кПа, температура  $T = 293$  К, плотность  $\gamma = 11$  г/м<sup>3</sup>) и в однородном электрическом поле электрическая прочность воздуха составляет  $E = 30$  кВ/см. Такое значение характерно для расстояния между электродами менее 1 м. При расстояниях 1–2 м прочность составляет около 5 кВ/см, а при расстоянии 10 м и выше – 1,5–2,5 кВ/см. Снижение электрической прочности воздуха при больших расстояниях объясняется стримерной теорией развития разряда (см. п. 1.6). На величину электрической прочности воздуха оказывают влияние температура, давление (плотность) и влажность.

Электрическое оборудование обычно проектируется для работы на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре  $t = \leq 40$  °С и  $\gamma = 11$  г/м<sup>3</sup>. При увеличении высоты на 100 м и увеличении температуры на 3 °С прочность воздуха снижается на 1 %. Увеличение абсолютной влажности в два раза снижает прочность на 6–8 %. Эти данные характерны для расстояния между токоведущими частями до 1 м. При увеличении расстояния влияние атмосферных условий снижается.

Главным недостатком воздуха является то, что под действием на него короны образуется озон и окись азота, что в свою очередь приводит к старению твердой изоляции и коррозии.

В настоящее время для изготовления газовой изоляции используются следующие газы: элегаз, азот, смесь элегаза с азотом и некоторые фторуглероды. Многие из этих газов имеют электрическую прочность выше, чем у воздуха. Недостатком многих изоляционных

газов является токсичность, высокая температура сжижения, способность выделять углерод, который, оседая на поверхности твердой изоляции, увеличивает ее проводимость.

**Элегаз.** В новых высоковольтных коммутационных аппаратах элегаз применяется в качестве изолирующей и дугогасящей среды. Коммутационная способность и диэлектрические свойства коммутационных аппаратов зависят от плотности элегаза, которая постоянно должна контролироваться. Утечки через уплотнения или корпус должны автоматически определяться приборами. Нормальное рабочее давление (давление заполнения при 20 °С) для этих коммутационных аппаратов от 0,45 до 0,7 МПа в минимальном температурном диапазоне от –40 °С до –25 °С. Элегаз не токсичен, не подвержен загрязнению или увлажнению, не огнеопасен и не имеет озоноразрушающего эффекта. Однако, он сохраняется в атмосфере более 3200 лет и имеет парниковый потенциал в 22 000 раз больше, чем потенциал углекислого газа. Несмотря на то, что доля элегаза в образовании парникового эффекта сравнительно мала (около 0,2 %), он включен в список парниковых газов из-за широкого использования в электроэнергетике.

## 1.2. Виды электрических разрядов в газах

В реальном газе всегда присутствует конечное число заряженных частиц – электронов и ионов. Свободные носители заряда образуются в результате воздействия естественных ионизаторов – ультрафиолетового излучения солнца, космических лучей, радиоактивного излучения. Также свободные носители заряда образуются под действием электрического поля в результате ионизации. Этот процесс может носить нарастающий характер в виде лавины. В результате канал между электродами приобретает высокую проводимость и наступает пробой газообразного диэлектрика.

Разряды в газах могут носить *самостоятельный* и *несамостоятельный* характер. Если в газовом промежутке ток протекает только под воздействием внешнего ионизатора, то такой разряд называется *несамостоятельным* (рис. 1.1, участок *OABC*). Если ток разряда зависит от параметров цепи (сопротивления и мощности источника), то разряд называется *самостоятельным* (рис. 1.1, после точки *C*).

Для поддержания самостоятельного разряда не требуется образования заряженных частиц за счет внешних ионизаторов.

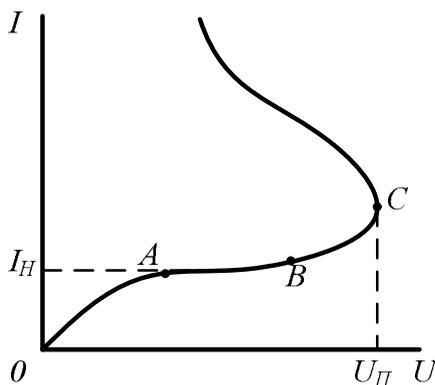


Рис. 1.1. Вольт-амперная характеристика газового разряда:  
 $U_P$  — напряжение пробоя;  $I_H$  — ток насыщения

При малых давлениях из-за небольшого числа молекул промежутков не может приобрести большую проводимость. Тогда возникает тлеющий разряд с плотностью тока  $j = 1-5 \text{ мА/см}^2$ . Разряд охватывает всю область между электродами. При атмосферном давлении (или выше) при малой мощности источника или при кратковременном приложении напряжения возникает искровой разряд (молния). При длительном действии напряжения искровой разряд повторяется периодически до снятия напряжения. При большой мощности источника питания разряд может носить дуговой характер. В этом случае ток может достигать  $10^2-10^3 \text{ А}$ , а температура до  $6000 \text{ }^\circ\text{С}$ .

В резконеоднородном поле самостоятельный разряд имеет вид *короны* (свечение). При коронном разряде в промежутке между электродами не возникает сквозного канала высокой проводимости, но при дальнейшем увеличении напряжения может возникать искровой или дуговой разряд.

Закономерности развития электрического разряда в разных газах одинаковы, разница заключается лишь в значении коэффициентов, характеризующих этот процесс.

### 1.3. Разряд в воздушном промежутке при длительном воздействии напряжения

Необходимым условием развития разряда в газах является наличие свободных электронов. Свободные носители зарядов могут возникать как за счет внешних воздействий, так и за счет эмиссии электронов с поверхности электродов. Свободные носители заряда, в основном электроны, под действием электрического поля могут приобретать энергию, достаточную для выбивания новых электронов при столкновении с молекулами или атомами. Этот процесс называется *ударной ионизацией*. Образующиеся при этом положительные ионы не играют роли в процессе столкновения, но они могут искажать картину электрического поля и тем самым косвенно способствовать процессу ионизации.

Процесс ионизации газа при постоянной напряженности электрического поля  $E = \text{const}$  определяется энергией ионизации газа  $W_{\text{и}}$  и длиной свободного пробега электрона  $\lambda$  :

$$W_{\text{и}} = qE_{\text{и}}\lambda = qU_{\text{и}}, \quad (1.1)$$

где  $q$  – заряд электрона;

$U_{\text{и}}$  – потенциал ионизации газа (табл. 1.1).

Если на длине  $\lambda$  электрон приобретает энергию  $W > W_{\text{и}}$ , то имеет место выбивание свободного электрона (вторичного электрона). Вторичные электроны также могут приобретать энергию  $W > W_{\text{и}}$  на длине пробега  $\lambda$  и порождать при столкновении новые свободные электроны. Таким образом процесс ударной ионизации может носить лавинообразный характер.

Если  $W < W_{\text{и}}$ , возникает возбужденное состояние электрона атома. Это состояние не является устойчивым и через  $\tau < 10^{-8}$  с возбужденный электрон возвращается на прежний энергетический уровень. При этом имеет место излучение кванта энергии. Если другой электрон сообщает возбужденному электрону энергию, необходимую для ионизации, то происходит ступенчатая ионизация. Одновременно с ионизацией всегда идет рекомбинация, которая сопровождается выделением энергии. Поэтому разряд сопровождается свечением.

Таблица 1.1

Потенциал ионизации некоторых газов

газ	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Cl	N <sub>2</sub> O
$U_{и}, B$	15,4	15,8	12,5	12,3	11,8	12,9

Длина свободного пробега  $\lambda$  зависит от давления  $p$ , температуры  $T$  и эффективного сечения  $\sigma_3$  носителя заряда. Среднее значение  $\lambda$  можно определить по следующему выражению:

$$\lambda = \frac{kT}{p\sigma_3}, \quad (1.2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Эффективное сечение  $\sigma_3$  определяется диаметром движущихся частиц (электронов или ионов) и диаметром молекул.

Поскольку величина  $\lambda$  не является постоянной, то в теории газового разряда принято использовать коэффициент ударной ионизации  $\alpha$ , который представляет собой число ионизаций, осуществляемых электроном на единичном пути вдоль линии поля:

$$\alpha = Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right), \quad (1.3)$$

где  $A$  и  $B = \frac{AW_{и}}{q}$  – постоянные коэффициенты, зависящие от характеристик газа и его температуры;

$E$  – напряженность электрического поля между электродами.

Эффективным коэффициентом ионизации называется

$$\alpha_3 = \alpha - \eta, \quad (1.4)$$

где  $\eta$  – коэффициент прилипания, число актов захвата электрона (рекомбинации) на 1 см пути.

## 1.4. Лавина электронов

После появления у катода хотя бы одного свободного электрона, он под действием электрического поля приобретает энергию, достаточную для выбивания другого свободного электрона. В результате появляется новый свободный электрон, который может вызвать следующий акт ионизации. Такой непрерывно нарастающий поток электронов называется *лавиной электронов*.

На участке  $dx$  (рис. 1.2) приращение свободных электронов будет равно

$$dn = \alpha \cdot n dx, \quad (1.5)$$

где  $n$  – число свободных электронов, образовавшихся на участке  $x$ , при наличии одного начального свободного электрона.

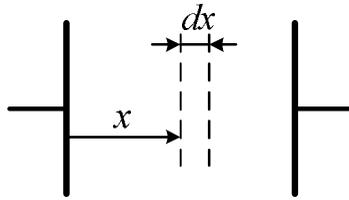


Рис. 1.2. Определение числа электронов в лавине

В однородном электрическом поле ( $E = \text{const}$ )

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx; \quad \int \frac{dn}{n} = \ln n;$$

$$n = e^{\alpha x}. \quad (1.6)$$

Образовавшиеся в процессе ионизации свободные ионы, как отмечалось выше, в силу меньшей подвижности будут сконцентрированы между катодом и фронтом лавины, что приводит к увеличению напряженности электрического поля у катода и увеличению интенсивности ионизации.

Для возникновения самостоятельного разряда (лавины электронов) необходимо, чтобы в результате развившейся первоначальной лавины возник хотя бы один вторичный свободный электрон, способный вызвать новую лавину. В этом случае условие развития разряда в общем виде

$$\gamma_{и} \exp\left(\int_0^L \alpha dx\right) > 1, \quad (1.7)$$

где  $\gamma_{и}$  – коэффициент вторичной ионизации, который представляет собой число вторичных электронов, отнесенное к одному акту ионизации в лавине;

$L$  – расстояние между электродами.

Для однородного поля

$$\alpha L = \ln\left(\frac{1}{\gamma_{и}}\right) > 1 = K. \quad (1.8)$$

Для воздуха при атмосферном и более высоком давлении условием возникновения самостоятельного разряда будет  $\alpha L = 20$ , при пониженных давлениях –  $\alpha L = 4$ .

### 1.5. Пробивное напряжение

Если соблюдается условие самостоятельного разряда  $\alpha L = K$ , то число электронных лавин растет. При этом последующая лавина развивается еще до того, как положительные ионы предыдущей лавины успевают достичь катода. В таком случае лавины распространяются по всему промежутку  $L$ , и газ в промежутке приходит в состояние плазмы. Наступает искровой или дуговой разряд.

Значение пробивного напряжения  $U_{пр}$  можно получить из условия самостоятельности разряда (1.8), подставив  $\alpha$  (1.3) и приняв, что напряженность в момент пробоя равна  $E_{пр} = U_{пр}/L$ :

$$\alpha L = ALp \exp\left(-\frac{BpL}{U_{пр}}\right). \quad (1.9)$$

Тогда из (1.9) при записи  $\alpha L = K$

$$U_{\text{пр}} = \frac{BpL}{\ln \frac{ApL}{K}}. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) является математическим выражением экспериментального закона Пашена, из которого следует, что пробивные напряжения в однородном поле при  $T = \text{const}$  являются функцией произведения давления  $p$  и расстояния между электродами  $L$ :

$$U_{\text{пр}} = f(pL). \quad (1.11)$$

Кривая  $U_{\text{пр}} = f(pL)$  имеет минимум (рис. 1.3). Для воздуха  $U_{\text{пр min}} \approx 300$  В при  $pL \approx 0,5$ .

При  $L = \text{const}$  и увеличении плотности газа от значения, соответствующего минимуму кривой, электрическая прочность промежутка возрастает, т. к. уменьшается длина свободного пробега, увеличивается число столкновений и уменьшается вероятность ионизации. При уменьшении плотности относительно минимума  $U_{\text{пр}}$  возрастает за счет эффекта снижения числа столкновений. В связи с этим в изоляционных конструкциях используется газ под высоким давлением или под малым (вакуум).

Экспериментальная зависимость (1.11) при высоких и низких давлениях лежит несколько ниже теоретической (на рис. 1.3 показана штриховой линией). Это объясняется при больших давлениях влиянием микровыступов, а при низких – автоэлектронной эмиссией.

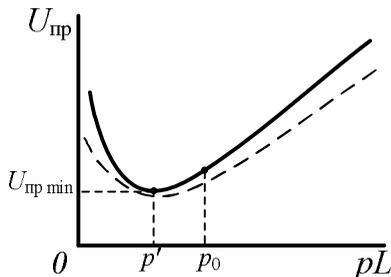


Рис. 1.3. Зависимость  $U_{\text{пр}} = f(pL)$  для воздуха

Для практических расчетов пробивного напряжения можно использовать более простое выражение

$$U_{\text{пр}} = a\delta L + b\sqrt{\delta L}, \quad (1.12)$$

где  $a$ ,  $b$  – постоянные, зависящие от рода газа (для воздуха  $a = 24,5$  кВ/см и  $b = 6,4$  (кВ/см) $^{1/2}$ );

$\delta$  – относительная плотность воздуха:

$$\delta = \frac{pT_0}{p_0T}, \quad (1.13)$$

где  $T_0$  и  $p_0$  соответствуют нормальным атмосферным условиям ( $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па или 760 мм рт. ст. и  $T_0 = 20$  °С).

При  $L = 1$  см и нормальных условиях  $E_{\text{пр}} = 30,0$  кВ/см. При увеличении  $L > 1$  см  $E_{\text{пр}} = 24,5$  кВ/см. При  $L \gg 1$  м  $E_{\text{пр}} = 1,5\text{--}2,5$  кВ/см.

## 1.6. Стримерная теория разряда

На длинных промежутках пробивные напряжения значительно ниже значений, полученных расчетным путем исходя из теории ударной ионизации. Исследование разрядов в длинных промежутках привели к появлению *стримерной теории разряда*.

Сущность этой теории заключается в том, что после образования начальной лавины 1 (рис. 1.4) на расстоянии  $x_k$  от катода плотность электронов во главе лавины резко возрастает, следовательно возрастает и напряженность электрического поля во главе лавины. Такое явление имеет место при  $\alpha x_k \geq 20$ . Благодаря этому на некотором расстоянии  $\Delta x$  от головы первоначальной лавины возможно возникновение свободных электронов за счет фотонной ионизации. Фотоэлектроны, находящиеся в сильном электрическом поле ( $E_{\text{внеш}} + E_{\text{внут}}$ ), приобретают энергию, достаточную для образования новой лавины 2, которая перемещается к аноду. Таким образом, объемный заряд первой лавины оказывается «перенесенным» на расстояние  $\Delta x$ . Область между этими лавинами заполняется плаз-

мой, что приводит к перераспределению напряжения на промежутке  $L$  и увеличению напряженности поля на отдельных участках.

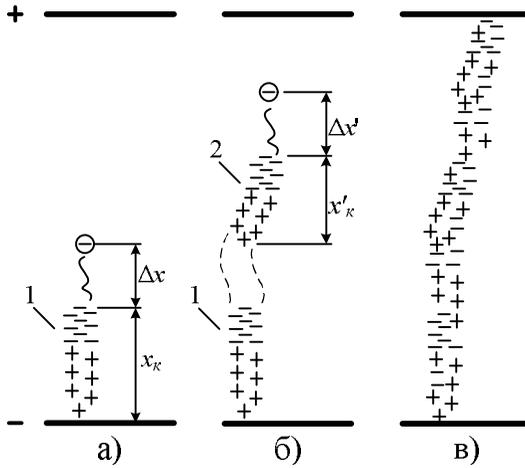


Рис. 1.4. Развитие катодного стримера

Скорость перемещения стримера в  $(x + \Delta x)/x$  раз больше скорости электронов в области фронта и составляет  $10^7 - 10^8$  см/с, а плотность заряда в стримере  $10^{12}$  ион/см<sup>3</sup>. Вторая лавина может породить новую лавину на расстоянии  $\Delta x'$ . После достижения стримером анода между электродами образуется область высокой проводимости и возникает разряд. На начальной стадии развития, когда стример замыкается через емкость, амплитуда тока достигает 10 А. Когда стример достигает электродов, наступает главный разряд и ток резко возрастает. Рассмотренная схема развития называется катодным стримером и характерна для однородного поля при  $U > U_{пр}$ , а  $x_k \ll L$ . При напряжениях, близких к пробивному ( $U \approx U_{пр}$ ), стример образуется после пробега начальной лавины расстояния от катода до анода. Такой стример называется анодным.

### 1.7. Разряды в неоднородном поле. Закон подобия разрядов

*Неоднородным* называется электрическое поле, в котором напряженность поля в различных точках различна. Такие поля имеют

место, если электроды имеют сложную форму или отличаются друг от друга по форме (острие–плоскость, острие–шар и т. п.). Степень неоднородности поля характеризуется коэффициентом неоднородности

$$k_n = E_{\max} / E_{\text{ср}} ,$$

где  $E_{\text{ср}} = U/L$ ;  $L$  – расстояние между электродами.

Для однородного поля  $k_n = 1$ . Если  $k_n \leq 2$ , то поле называется слабонеоднородным. Такие условия соответствуют полю двух концентрических цилиндров  $R/r = 3$ , параллельных проводов  $L/r = 30$  и для двух сфер одинакового радиуса  $L/r = 8$ .

Рассмотрим случай неоднородного поля для двух коаксиальных цилиндров радиусом  $R$  и  $r$  (рис. 1.5). Напряженность электрического поля в любой точке между цилиндрами определяется выражением

$$E = \frac{U}{x \ln R/r} . \quad (1.14)$$

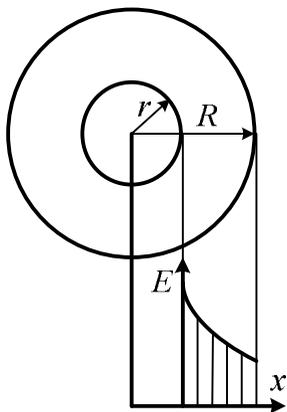


Рис. 1.5. Распределение напряженности между электродами цилиндрического конденсатора

Условие самостоятельности разряда с учетом коэффициента ионизации  $\alpha$  будет

$$\int_r^R Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) dx = K = 20. \quad (1.15)$$

Но т. к.  $E$  нелинейно зависит от  $R$  и  $r$ , то напряжение возникновения разряда  $U_0$  будет зависеть от соотношения  $pr$  и  $R/r$ , т. е.  $U_0 = f(pr, R/r)$ . Последнее выражение характеризует закон подобия разрядов. Для неоднородного поля при  $T = \text{const}$  начальное напряжение развития разряда является функцией произведения плотности (давления) газа на один из параметров промежутка и отношения к этому параметру всех остальных размеров, определяющих форму промежутка.

Вывод: в геометрически подобных промежутках начальное напряжение разряда  $U_0$  будет зависеть от  $pL$ . Если сохранять промежутки геометрически подобными, начальные напряжения останутся неизменными при пропорциональном изменении плотности газа.

Для случая двух коаксиальных цилиндров радиусом  $R$  и  $r$ , максимальное значение напряженности на поверхности цилиндра радиусом  $r$  в зависимости от отношения  $R/r$  будет иметь вид кривой (рис. 1.6, кривая 1) с минимумом при  $R/r = e$ . Если для электродов напряженность поля начального разряда равна  $E_n$  и не зависит от расстояния, то имеем две характерные области развития разрядов:  $R/r < e$  ( $K_1$ ) и  $R/r > e$  ( $K_2$ ).

В области  $R/r < e$ , когда  $E > E_n$  (точка  $K_1$ ), образование ионизирующего слоя возле цилиндра радиусом  $r$  как бы увеличивает его радиус, т. е. уменьшает отношение  $R/r$ , что приводит к увеличению напряженности электрического поля, увеличению области ионизации и развитию стримера. Стример достигает противоположного электрода, образуется канал высокой проводимости, возникает самостоятельный разряд, переходящий в пробой. Поле в этом случае будет слабонеоднородным.

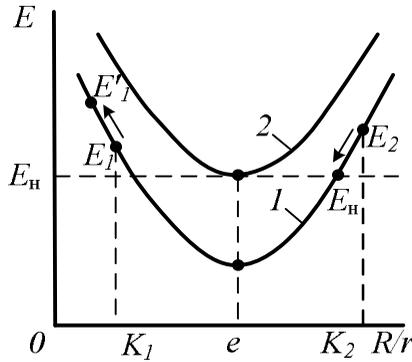


Рис. 1.6. Зависимость напряженности поля от отношения  $R/r$

В области  $R/r > e$  при  $E > E_n$  также возникает самостоятельный разряд, но в этом случае при уменьшении  $R/r$  уменьшается напряженность электрического поля до  $E = E_n$ . В дальнейшем расширение области самостоятельного разряда прекращается, т. к. при  $E < E_n$  не выполняется условие самостоятельности разряда. Таким образом, при  $E < E_n$  ( $R/r > e$ ) будет существовать устойчивый самостоятельный разряд, охватывающий только часть пространства. Такой разряд называется коронным.

Для того, чтобы коронный разряд перешел в пробой, необходимо поднять напряжение до значения  $U_1$ , при котором кривая  $E$  (кривая 2) будет касаться прямой  $E_n$  в одной точке  $R/r = e$ , т. е.  $U_n = U_k$  и  $U_{пр} \geq U_n$ . Такое поле называется резконеоднородным.

Условием возникновения самостоятельного разряда в неоднородном поле будет  $\int \alpha dx = 20$ .

Для практических расчетов пользуются эмпирической формулой

$$U_n = \frac{24,5\delta L}{k_n} \left[ 1 + \frac{c}{(\delta r)^{0,38}} \right], \quad (1.16)$$

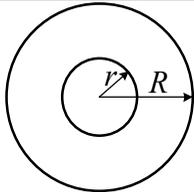
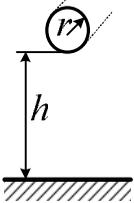
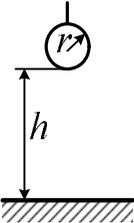
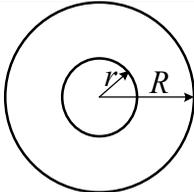
где  $r$  – радиус электрода с большей кривизной;

$L$  – расстояние между электродами;

$k_n$  – коэффициент неоднородности электрического поля. Значения  $c$  и  $k_n$  зависят от формы электродов и приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения коэффициентов  $c$  и  $k_n$

Форма электродов	$c$	$k_n$	$L$
 <p><b>цилиндрический конденсатор</b></p>	0,65	$\frac{R/r - 1}{\ln R/r}$	$R - r$
 <p><b>провод-плоскость</b></p>	0,65	$\frac{h/r}{\ln 2h/r}$ при $h \gg r$	для двух параллельных проводов $2h$
 <p><b>шар-плоскость</b></p>	0,78	$h/r + 1$	для двух параллельных шаров $2h$
 <p><b>сферический конденсатор</b></p>	0,89	$R/r$	$R - r$

## 1.8. Разряды в несимметричных полях. Эффект полярности

Характерными примерами резко неоднородного несимметричного поля являются поля между иглой и плоскостью, иглой и шаром. В этих полях напряженность поля у электрода с малым радиусом (игла или шар) велика и достаточна для развития ионизационного процесса даже при напряжениях, меньших напряжения возникновения короны. При этом образующийся объемный заряд будет существенно влиять на процесс развития разряда в зависимости от полярности электродов.

При положительном острие (рис. 1.7, *a*) электроны, двигаясь к острию, совершают ионизацию и образуют лавину электронов. Положительные ионы образуют положительный объемный заряд, медленно перемещающийся к плоскости. Объемный заряд положительных ионов и электронов создает собственное электрическое поле  $E_q$ . В результате сложения поля объемного заряда и внешнего электрического поля  $E_q + E_{вн}$  результирующее поле несколько уменьшается у острия и увеличивается в объеме между положительным объемным зарядом и плоскостью.

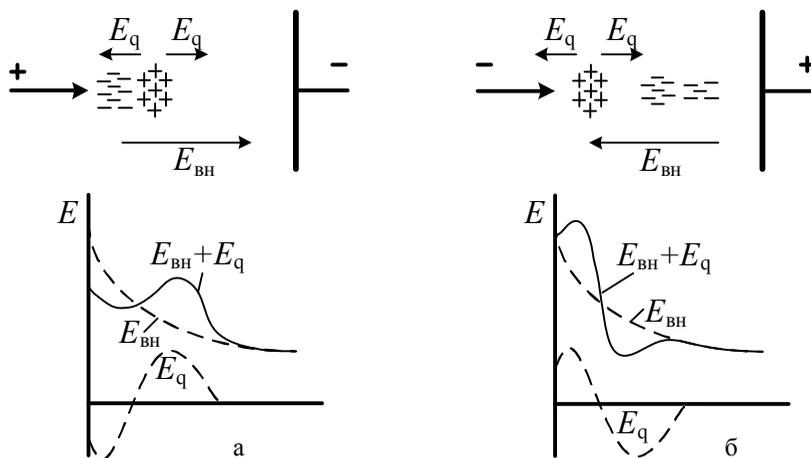


Рис. 1.7. Развитие разряда в промежутке стержень–плоскость

При отрицательной полярности иглы (рис. 1.7, б), появившиеся у катода электроны образуют лавину,двигающуюся к плоскости. Выйдя из сильного поля острия электроны теряют энергию и перестают производить ионизацию. Часть электронов достигает анода, а часть образует при столкновениях отрицательные ионы. Образующийся у острия объемный положительный заряд усиливает поле у стержня и ослабляет в остальной части пространства.

При положительной полярности стержня и дальнейшем увеличении напряжения лавина электронов возникает в области наибольшей напряженности электрического поля – справа от объемного заряда. Лавина электронов и объемный заряд создают зародыш анодного стримера, заполненный плазмой. Головка стримера имеет избыточный положительный заряд, что усиливает поле и обеспечивает образование новых лавин и прорастание стримера до противоположного электрода – плоскости, т. е. облегчает пробой.

При отрицательной полярности иглы образование лавин начинается между стержнем и объемным зарядом – катодная лавина. Вследствие этого вокруг стержня образуется плазменный слой, который увеличивается с повышением напряжения. Напряженность поля на поверхности слоя растет и начинается образование лавин справа от объемного заряда. Образование катодных стримеров происходит в области с более низкой напряженностью электрического поля, что затрудняет развитие стримера. Скорость их оказывается на порядок ниже, чем скорость положительного стримера при положительной игле. В результате разрядные напряжения при отрицательной игле в 2–2,5 раза выше, чем при положительной. Это и есть проявление эффекта полярности. При небольших промежутках (8–10 см) их электрическая прочность составляет 8–15 кВ/см.

При переменном электрическом поле эффект полярности имеет место, если время развития разряда  $t_{\text{раз}} < T/2$ , где  $T$  – период волны приложенного напряжения.

Электрическая прочность системы «игла–плоскость» может быть повышена за счет барьеров (рис. 1.8). В качестве барьеров используют тонкие изолирующие материалы (картон, бумага). При наличии барьера напряженность электрического поля на участке острие–барьер снижается, а на участке барьер–плоскость – возрастает. Поле становится более однородным.

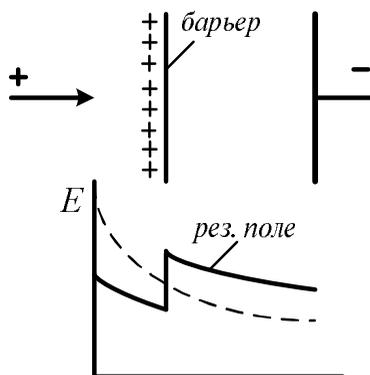


Рис. 1.8. Барьер в резконеоднородном поле

При отрицательной игле барьер задерживает двигающиеся к плоскости электроны, которые образуют на его поверхности отрицательные ионы и тем самым создается концентрированный отрицательный заряд. При положительной игле он также задерживает положительные ионы, которые растекаются по его поверхности, т. о. формируя как бы положительную плоскость.

Наиболее эффективным является расположение барьера на расстоянии  $(0,2-0,3)L$  от иглы. В этом случае разрядные напряжения при положительной игле увеличиваются более чем в два раза, а при отрицательной – не уменьшаются. Расположение барьера у иглы не дает большого эффекта, т. к. при положительной игле ионы располагаются на барьере неравномерно, а при отрицательной – электроны летят с большой скоростью и проходят через барьер, т. е. отрицательный заряд не создается.

Для увеличения пробивного напряжения и устранения короны иногда применяют экранирование электродов. Экран представляет собой цилиндр или сферу, соединенную с электродами.

### 1.9. Понятие лидера и главного разряда

Пересечение стримером всего промежутка между электродами не является конечной стадией разряда. Стример служит как бы продолжением электрода за счет своей проводимости. Напряженность поля в нем невелика. При приближении стримера к противополож-

ному электроду напряженность поля в еще не пробитой части промежутка сильно возрастает и в ней начинается интенсивная ионизация. В результате этот участок превращается в плазму с большой напряженностью на границе. Большая напряженность приводит к быстрому распространению зоны интенсивной ионизации в направлении, обратном развитию стримера. Этот процесс называется *главным*, или *обратным разрядом*.

Разряд в промежутках длиной несколько метров, десятков метров и более имеет некоторые особенности. При таких расстояниях проводимости стримеров недостаточны. При достаточно большом токе в канале стримера вдобавок к ударной начинается термическая ионизация, превращающая его в плазменный канал с высокой проводимостью – *лидер*. Лидер проявляется в виде яркого свечения. Когда он достигает конца стримера, наступает пауза, во время которой происходит образование нового стримера, затем лидер продвигается дальше по каналу стримера. Таким образом, лидер похож на металлический стержень, продвигающийся к противоположному электроду в канале стримера и обеспечивающий высокую напряженность на его конце. Поэтому в длинных промежутках разряд развивается при средней напряженности поля 1–2 кВ/см. Ток лидера достигает сотен ампер. При продвижении лидера вглубь промежутка на его конце может возникать несколько стримеров. Дальнейшее направление движения лидера имеет вероятностный характер. Этим объясняется ветвящийся характер подобных разрядов (молния). После достижения лидером противоположного электрода начинается обратный разряд, который имеет вид более яркого, чем лидер, свечения, распространяющегося в обратном направлении.

### 1.10. Дуговой разряд

*Дуговой разряд* – это самостоятельный разряд в газе, характеризующийся высокой температурой (6000–12 000 °С) и большой плотностью тока. Дуговой разряд возникает между контактами коммутационной аппаратуры, в разрядниках, между проводами ЛЭП.

Канал дуги разделяют на три участка (рис. 1.9): 1 – катодный; 2 – столб дуги; 3 – анодный. Длина катодного участка  $l$  около  $10^{-4}$  см, катодное падение напряжения  $U_k$  составляет 10–20 В, напряжен-

ность поля  $10^2-10^3$  кВ/см. Все это обуславливает мощную эмиссию электронов с поверхности катода. Длина анодного участка 3 чуть выше  $10^{-4}$  см, анодное падение напряжения  $U_a = 2-6$  В. Падение напряжения в столбе дуги 2 равномерно, напряженность поля  $E_c = 15-30$  В/см. Такая напряженность придает электронам ускорение, и в канале создается высокая температура, которая приводит к интенсивной термической ионизации. Длина столба может достигать десятка метров. Он представляет собой плазму с высокой электропроводностью.

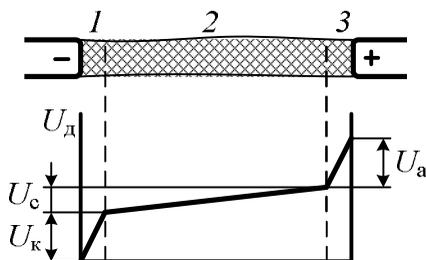


Рис. 1.9. Распределение напряжения в канале дуги

Напряжение дуги:  $U_d = U_k + E_c l_c + U_a$ . У длинной дуги  $U_c \gg U_k + U_a$ , у короткой  $U_c \ll U_k + U_a$ .

На переменном токе дуга будет возникать тогда, когда напряжение между электродами больше электрической прочности промежутка. Поэтому при переменном напряжении имеет место бестоковая пауза  $\Delta t$  (рис. 1.10), в течение которой создаются благоприятные условия для гашения дуги. Для того, чтобы дуга погасла (не загорелась вновь) при прохождении тока через нулевое значение, необходимо, чтобы электрическая прочность промежутка восстанавливалась быстрее, чем скорость нарастания напряжения.

Пробивное напряжение дугового промежутка определяется в основном прочностью катодного участка и столба дуги:  $U_{пр,д} = U_{пр,к} + U_{пр,с}$ . Значение  $U_{пр,к}$  зависит от тока дуги и составляет 250–300 В при  $I = 10^{-6}-10^{-8}$  А и 5–20 В при больших токах.

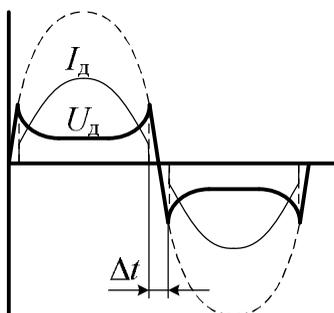


Рис. 1.10. Ток и напряжение дуги на переменном токе

Процесс восстановления электрической прочности дугового промежутка зависит от скорости рекомбинации и диффузии зарядов плазмы, а также от ослабления термической ионизации. Последний процесс в значительной степени зависит от тока дуги.

Для ускорения гашения дуги применяют:

- 1) интенсивное охлаждение (дутье);
- 2) разбиение дуги на ряд коротких дуг;
- 3) уменьшение тока дуги до критического значения.

Критическая длина дуги  $l_k = 0,082UI^{0,25}$  м – для активных цепей;  
 $l_k = 0,2I$  м – для реактивных цепей. Из приведенных формул следует, что критическая длина дуги в сетях, например 35 кВ, достигает 7–20 м, а в сетях 110 кВ – 20–60 м.

### 1.11. Коронный разряд на проводах ЛЭП

*Короной* называется лавинно-стримерная стадия разряда в резонансном поле. В таких полях ионизационные процессы начинаются вблизи электрода с малым радиусом при напряжениях, меньших напряжения перекрытия промежутка. *Коронный разряд* сопровождается свечением, потерей энергии, электромагнитным излучением и может приводить к возникновению химической реакции. Ток короны имеет импульсный характер с амплитудой 6–8 мкА. На ЛЭП за счет ее значительной длины корона носит непрерывный характер, что может привести к большим потерям энергии и значительным помехам.

## 1.12. Корона на проводах постоянного тока

При коронировании у поверхности провода образуются заряды того же знака, что и полярность проводов. Если возле провода будет объемный заряд только одного знака, то такую корону называют *униполярной* (рис. 1.11, а). На двухпроводной линии ионы различных знаков движутся навстречу друг другу (рис. 1.11, б). В области слабых полей происходит частичная рекомбинация зарядов. Значительная часть зарядов проникает в зону короны противоположного знака и усиливает там поле. В результате усиливаются ионизационные процессы и увеличиваются потери. Такая корона называется *биполярной* (рис. 1.11, б).

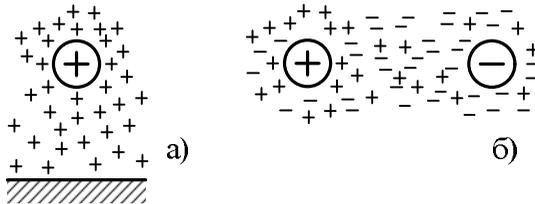


Рис. 1.11. Корона:  
а – униполярная; б – биполярная

Начальная напряженность электрического поля, при которой возникает разряд, определяется выражением

$$E_{\text{н}} = 24,5 \cdot m \delta \left( 1 + \frac{0,65}{(r\delta)^{0,38}} \right) \text{кВ/см}, \quad (1.17)$$

где  $\delta$  – относительная плотность воздуха;

$r$  – радиус провода;

$m = 0,83-0,94$  – коэффициент гладкости поверхности.

При  $r \leq 1$  см хорошие результаты дает также формула Пика

$$E_{\text{н}} = 30,3 \cdot m \delta \left( 1 + \frac{0,3}{\sqrt{r\delta}} \right). \quad (1.18)$$

Напряжение возникновения короны

$$U_H = E_H r \ln \frac{2H}{r}, \quad (1.19)$$

где  $H$  – высота подвеса провода.

На проводах малого радиуса корона возникает в лавинной форме. Зона ионизации однородна и свечение сосредоточено в узком «чехле». При больших радиусах чехол короны имеет большие размеры.

### 1.13. Корона на проводах ЛЭП переменного тока

При переменном напряжении объемный заряд возникает в один из полупериодов, когда  $U \geq U_H$  ( $E \geq E_H$ ). При изменении полярности в каждый из полупериодов объемный заряд отталкивается или притягивается к проводу. При этом лишь незначительная часть заряда достигает соседних фаз. Поэтому влиянием соседних фаз на процесс коронирования можно пренебречь, т. е. корона на проводах ВЛ переменного тока является униполярной.

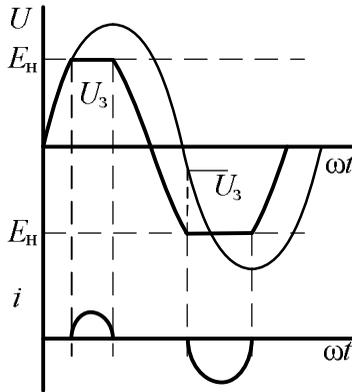


Рис. 1.12. Корона на проводе при переменном токе

В первый полупериод корона возникает, когда  $U \geq U_H$ . При увеличении напряжения в интервале от  $U_H$  до  $U_M$  увеличивается ток

короны и объемный заряд, но напряженность поля остается постоянной  $E_n$ . При достижении  $U = U_M$  коронирование прекращается. Если считать, что заряд неподвижен, то напряженность поля у провода будет снижаться по синусоидальному закону со сдвигом на  $\Delta U$  относительно напряжения.

Когда в отрицательный полупериод напряженность поля достигнет значения  $E_n$ , возникает коронный разряд, но при меньшем значении напряжения зажигания  $U_3 < U_n$ . Во второй и последующий полупериоды коронирование будет более продолжительным, чем в первый. Это объясняется влиянием объемного заряда. В последующий полупериод сначала нейтрализуется объемный заряд, образовавшийся в предыдущий полупериод, а затем образуется заряд противоположного знака.

При увеличении  $U_M$  корона будет возникать при меньших значениях  $U_3 < U_n$ , а при больших значениях  $U_M$  – даже при  $U = 0$ . Так как  $U_3 = U_n - \Delta U$ , а  $\Delta U = U_M - U_n$ , то  $U_3 = 2U_n - U_M$  – характеристика зажигания (рис. 1.13).

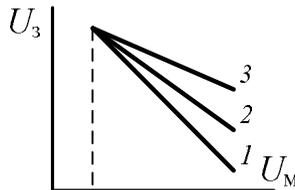


Рис. 1.13. Характеристика зажигания:

1 – по уравнению; 2 – отрицательный полупериод; 3 – положительный

Увеличение  $U_3$  в положительный полупериод объясняется тем, что отрицательный объемный заряд меньше, чем положительный, и в меньшей степени усиливает поле.

Чтобы исключить явление короны необходимо выбрать соответствующий диаметр провода:

$$U_n = E_n r \ln \frac{S}{r}; \quad E_n = 30,3 \cdot m \delta; \quad (1.20)$$

$$U_H = 30,3 \cdot m \delta r \ln \frac{S}{r}, \quad (1.21)$$

где  $S$  – среднегеометрическое расстояние между проводами.

При  $\delta = 1$   $\ln \frac{S}{r} = 6,2$ . Для ЛЭП 110–220 кВ минимальное значение диаметра провода должно быть  $d_{\min} = 1,2$  и 2,4 см. Для напряжения больше 220 кВ целесообразно применять расщепление фазы.

#### 1.14. Потери энергии на корону

Исключить полностью явление коронирования на проводах ЛЭП невозможно, т. к. при различных погодных условиях корона может возникать в местах с сильно неоднородным полем. Потери энергии на корону могут составлять до 40 % энергии потерь на нагрев.

Суммарные потери на корону определяются на основе экспериментальных данных для различных погодных условий:

$$A = P_x t_x + P_d t_d + P_n t_n + P_c t_c, \quad (1.22)$$

где  $P$  и  $t$  – соответственно удельные потери и длительность для хорошей погоды, дождя, изморози и снега.  $\sum t = 8760$  ч.

Потери на корону для каждого из видов погоды определяются по формуле Левитина с использованием зависимости  $f(U_{\max \phi} / U_H)$ . Рекомендуется учитывать потери на корону при  $E_{\max} / E_H > 0,5$ .

#### 1.15. Разряды в воздушном промежутке при импульсном напряжении

Электрическое оборудование подвергается воздействию импульсного напряжения при атмосферных и внутренних перенапряжениях. Электрические импульсы имеют очень короткий фронт (участок возрастания напряжения) и относительно большую длительность и амплитуду.

При импульсном напряжении формирование самостоятельного разряда начинается при  $U > U_H$  (рис. 1.14) с появлением в момент

времени  $t_c$  эффективного электрона (способного образовать лавину).  $t_c$  называют *статистическим временем запаздывания*, которое является случайной величиной. При импульсном напряжении, чтобы сформировался самостоятельный разряд необходимо определенное время для формирования потока лавин электронов  $t_\phi$ , которое также является статистической величиной. Таким образом, для формирования разряда необходимо время  $t_p = t_1 + t_c + t_\phi$ . При этом  $t_c + t_\phi$  называют временем запаздывания разряда.

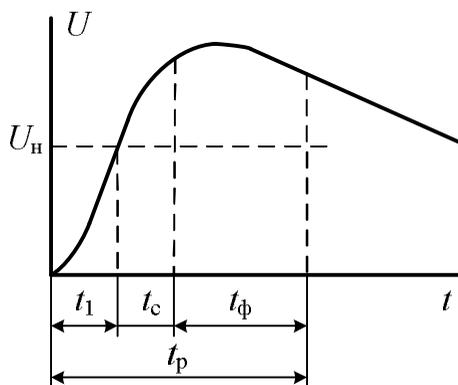


Рис. 1.14. Составляющие времени разряда при импульсном напряжении

Если длительность импульса  $t_n < t_p$  — пробоя не будет, хотя при длительном воздействии напряжения такой величины пробой возможен.

Зависимость максимального напряжения разряда от времени действия импульса называется *вольт-секундной характеристикой* изоляции  $u - t$  (ВСХ).

Для характеристики импульсной прочности изоляции используют стандартный импульс (рис. 1.15). Стандартные импульсы характеризуются длительностью фронта импульса  $\tau_\phi$  и длительностью импульса  $\tau_n$ . Для грозových перенапряжений  $\tau_\phi = 1,2$  мкс и  $\tau_n = 50$  мкс, для внутренних — соответственно 250 и 2500 мкс.

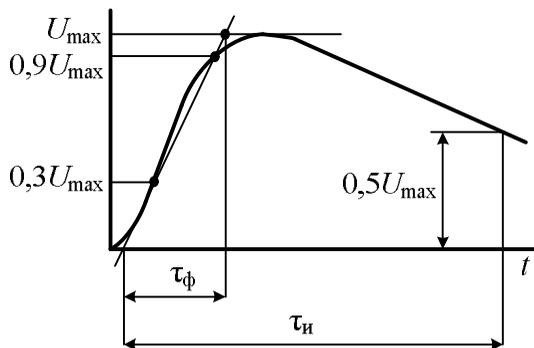


Рис. 1.15. Стандартный импульс

ВСХ изоляционных промежутков зависит от степени неоднородности поля (рис. 1.16). Для однородных и слабонеоднородных полей ВСХ почти параллельна оси времени. Для промежутков с резко неоднородным полем ВСХ имеет большую кривизну. Это объясняется тем, что в однородном поле время разряда определяется в основном временем статистического запаздывания. В резко неоднородных полях время статистического запаздывания невелико, т. к. образование эффективных электронов происходит вблизи электрода с малым радиусом кривизны еще до напряжения пробоя. Это свойство однородного поля используется для измерения напряжения с помощью шаровых разрядников.

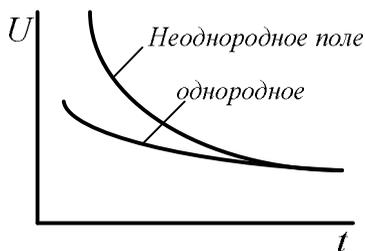


Рис. 1.16. ВСХ

ВСХ используются для координации изоляции. Для защиты изоляции от перенапряжений включают ограничители перенапряжений (ОПН) или разрядники, ВСХ которых должна лежать ниже ВСХ изоляции.

На практике построение вольт-секундных характеристик трудно, поэтому вместо них пользуются 50%-м разрядным напряжением  $U_{50\%}$ . Это напряжение ненамного превышает минимальное импульсное разрядное напряжение и соответствует горизонтальному участку ВСХ и времени разряда 6–10 мкс.

В неоднородных полях разрядное импульсное напряжение значительно больше, чем при переменном напряжении 50 Гц. Отношение  $U_{и}/U_{\sim 50}$  называется коэффициентом импульса  $k_{и}$ .  $k_{и} \cong 1$  для однородного поля и  $k_{и} = 1,1-1,3$  для реальных изоляционных промежутков.

Самые низкие разрядные напряжения имеют промежутки стержень–плоскость:

$$U_p = 5L, \quad (1.23)$$

где  $L$  – расстояние между электродами, см.

Вместе с  $U_{50\%}$  используется разрядное напряжение при времени разряда 2–3 мкс.

### 1.16. Статистическое распределение разрядных напряжений

Электрические разряды в газовой среде являются случайными процессами, т. к. на их возникновение и развитие оказывают влияние многочисленные факторы. Поэтому математическая обработка результатов эксперимента должна производиться методами математической статистики и теории вероятности.

Основными характеристиками случайного процесса являются:

1. Среднее значение разрядного напряжения

$$\bar{U}_p = \frac{\sum U_{pk}}{n}, \quad (1.24)$$

где  $U_{pk}$  – значение разрядного напряжения при  $k$ -м пробое, кВ;  $k = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество пробоев.

2. Среднеквадратичное отклонение, или стандарт распределения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (U_{pk} - \bar{U}_p)^2}{n-1}}. \quad (1.25)$$

3. Функция (закон) распределения или дифференциальная кривая распределения (рис. 1.17)

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(U_{pk} - \bar{U}_p)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1.26)$$

Дифференциальная кривая распределения показывает вероятность  $P_k$  того, что пробой произойдет именно при напряжении  $U_{pk}$ .

Стандарт распределения  $\sigma$  и кривая распределения  $\varphi(U)$  дают возможность определить уровень испытательных напряжений.  $\bar{U}_p \pm \sigma$  – соответствует 76%-й вероятности разряда;  $\bar{U}_p \pm 2\sigma$  – 95 %;  $\bar{U}_p \pm 3\sigma$  – 99,6 %.

4. Интегральная кривая распределения (рис. 1.18)

$$\Psi(U) = \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \varphi(U) dU = 1. \quad (1.27)$$

Интегральная кривая показывает вероятность того, что в данном опыте разрядное напряжение окажется меньше или равно  $U$ .

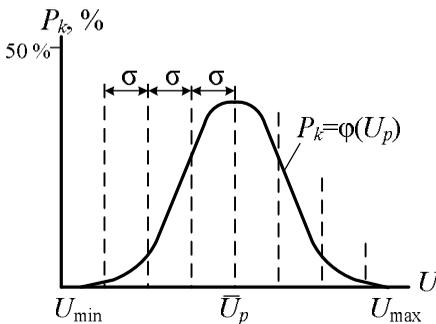


Рис. 1.17. Закон распределения

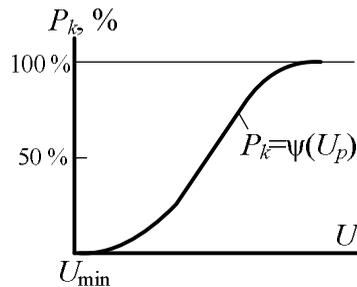


Рис. 1.18. Интегральная кривая распределения

### 1.17. Разряды в воздухе вдоль поверхности твердой изоляции

В электрическом оборудовании всегда имеет место сочетание твердых, жидких и газообразных диэлектриков. Поэтому возможно возникновение разрядного процесса вдоль поверхности раздела этих диэлектриков. Этот разрядный процесс называется *поверхностным*.

Поверхностные разряды могут перекрывать изоляционные промежутки и при большой мощности источника питания носить дуговой характер. Дуговой разряд может привести к разрушению поверхности. Поэтому при разработке изоляционной конструкции необходимо исключить возможность развития поверхностного разряда.

Разрядное напряжение на поверхности изоляции зависит от рода напряжения и формы электрического поля. В зависимости от конструкции изоляции диэлектрик может находиться в однородном поле, когда силовые линии параллельны поверхности диэлектрика (рис. 1.19, а), или в неоднородном поле, когда силовые линии имеют преобладающую тангенциальную (рис. 1.19, б) или нормальную составляющую (рис. 1.19, в).

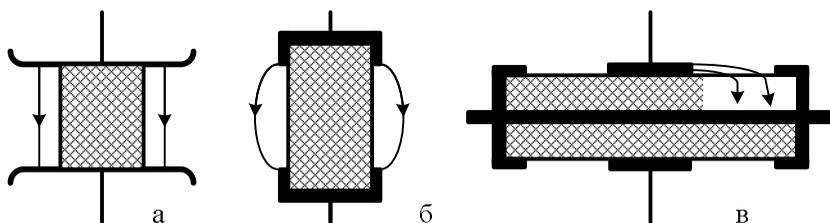


Рис. 1.19. Примеры расположения диэлектрика в электрическом поле

### 1.18. Поверхностный разряд в однородном поле

Напряжение перекрытия по поверхности изолятора даже в однородном поле в 1,5–2 раза ниже разрядного напряжения в воздушном промежутке. Это объясняется конденсацией влаги на поверхности диэлектрика, наличием микротрещин между диэлектриком и фланцем и микронеровностей на поверхности изоляции.

Поверхность диэлектрика во влажном воздухе покрыта тонким слоем влаги. Вода обладает ионной проводимостью, а так как ионы

перемещаются с малой скоростью, то в первую очередь на электроды уходят ионы из прилегающих к ним слоев. В результате этого искажается (усиливается) поле в остальной части промежутка (рис. 1.20). Поле становится неоднородным и разрядное напряжение снижается.

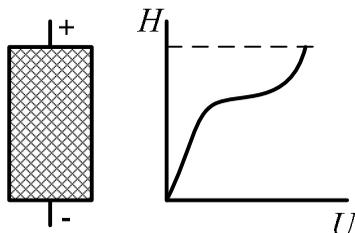


Рис. 1.20. Распределение напряжения по поверхности изоляции

Снижение разрядного напряжения при увлажнении поверхности сильнее влияет на смачиваемые (гидрофильные) диэлектрики. На несмачиваемых (гидрофобных) диэлектриках влияние увлажнения сказывается меньше, т. к. влага оседает в виде отдельных капель.

Разрядные напряжения имеют разброс, т. к. в процессе разряда имеет место подсушивание изоляции. При 100%-й влажности воздуха разброс уменьшится из-за образования сплошной пленки.

Наличие зазоров (трещин) между электродами и твердым диэлектриком приводит к тому, что поле в этих зазорах имеет большее значение  $E$ , т. к.  $\epsilon$  воздуха в 4–5 раз меньше  $\epsilon$  твердого диэлектрика. В результате этого в зазорах происходит интенсивная ионизация.

Для увеличения разрядных напряжений по поверхности применяют:

- 1) гидрофобные материалы и покрытия;
- 2) качественные скрепляющие материалы;
- 3) увеличение длины поверхности;
- 4) выравнивание электрического поля.

### 1.19. Поверхностный разряд в резконеоднородном поле

Резконеоднородные поля с большим значением нормальной составляющей напряженности электрического поля наблюдаются в проходных изоляторах, в изоляции обмоток электрических машин при выходе из паза и других конструкциях.

Эквивалентная схема замещения проходного изолятора (рис. 1.21) состоит из  $\rho_0$  – удельного поверхностного сопротивления и  $C_0$  – емкости единицы поверхности изолятора относительно электрода. Токи, протекающие через сопротивление  $\rho_0$  и емкость  $C_0$ , неодинаковы. В результате имеет место неравномерное распределение напряжения по поверхности изолятора.

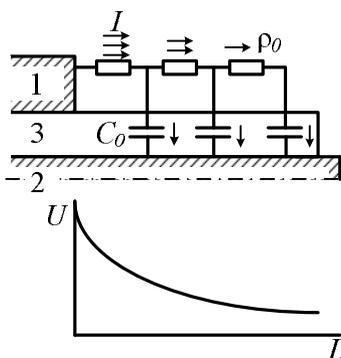


Рис. 1.21. Схема замещения и распределение напряжения по поверхности проходного изолятора

Наибольшее значение напряжения будет иметь место у фланца 1. Неравномерность будет тем больше, чем больше  $\epsilon$  диэлектрика и меньше толщина стенок.

В результате поверхностный разряд развивается от электрода 1 к электроду 2, проходя последовательно стадии коронного разряда, скользящего разряда и перекрытия (пробоя). При перекрытии изолятора в результате термического воздействия в некоторых видах диэлектриков возможно появление проводящих каналов (треков).

Развитие разряда облегчается при импульсных напряжениях и повышенных частотах. Для увеличения напряжения перекрытия применяют ребристые поверхности и материалы с малым значением  $\epsilon$ . В последнем случае уменьшается  $C_0$ .

### 1.20. Разряды вдоль увлажненной и загрязненной поверхности

Увлажнению и загрязнению подвергается изоляция, работающая на открытом воздухе. Причиной загрязнения могут быть как атмо-

сферные осадки, так и выбросы различных производств. В результате увлажнения и загрязнения на поверхности изоляции образуется тонкий проводящий слой и увеличивается ток утечки

$$I_y = \frac{U}{R_y}; \quad (1.28)$$

$$R_y = \frac{\rho_{\text{п}} L_y}{\Delta \pi D}, \quad (1.29)$$

где  $L_y$  – длина пути утечки;

$D$  – диаметр изолятора;

$\rho_{\text{п}}$  – удельное объемное сопротивление проводящего слоя;

$\Delta$  – толщина проводящего слоя.

В результате неравномерного поверхностного загрязнения и увлажнения происходит подсыхание некоторых поверхностей и образование частичных дуг. Эти разряды могут приводить к образованию трековых дорожек, если материал неустойчив к трекингу.

Механизм перекрытия поверхности носит тепловой характер, т. е. развивается во времени медленно и только при длительном воздействии напряжения. Разрядное напряжение зависит от сопротивления и конструкции изолятора:

$$U_p = k L_y \left( \frac{\rho_{\text{п}}}{\Delta D} \right)^{0,4}, \quad (1.30)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от конструкции изолятора и определяемый опытным путем.

Если в процессе частичных разрядов имеет место уменьшение  $I_y$  (увеличивается  $\rho_{\text{п}}$ ), то частичные разряды носят затухающий характер. При загрязнении поверхности наиболее низкие разрядные напряжения наблюдаются при морозящем дожде, тумане, росе. При сильном дожде имеет место очистка поверхности и  $U_p$  увеличивается. Для увеличения  $U_p$  увеличивают длину путей утечки.

## 2. ВНЕШНЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

### 2.1. Назначение, типы и характеристики изоляторов

Изоляторы предназначены для крепления токопроводов, а также для создания изоляционных промежутков между токопроводами различных фаз и между токопроводами и заземленными конструкциями. По назначению изоляторы подразделяются на *станционные, линейные и аппаратные*.

*Станционные* изоляторы предназначены для закрепления токопроводов в закрытых распределительных устройствах, а также для пропуска их через стены и перекрытия. Они соответственно подразделяются на *опорные и проходные*.

*Линейные* изоляторы предназначены для закрепления проводов на ВЛ и ОРУ. Они подразделяются на *штыревые, стержневые и подвесные*.

Изоляторы высоковольтной аппаратуры, опорные и проходные, являются неотъемлемой частью аппаратуры и по конструктивному исполнению могут быть разной формы.

Диэлектрические материалы, из которых изготавливаются изоляторы, должны иметь высокую электрическую и механическую прочность. Эти характеристики должны обеспечиваться как в нормальных условиях эксплуатации, так и в аварийных режимах, при различных атмосферных условиях, быть негигроскопичными, трекингоустойчивыми, работать в широком диапазоне температур и в агрессивной среде.

Всем этим требованиям удовлетворяют следующие материалы: глазурированный электротехнический фарфор, стекло и некоторые пластмассы.

Фарфор обладает следующими характеристиками: электрическая прочность  $E = 20\text{--}25$  кВ/см; механическая прочность фарфора зависит от характера деформации:  $\sigma_{сж} = 400\text{--}700$  МПа,  $\sigma_{из} = 80\text{--}150$  МПа,  $\sigma_p = 45\text{--}70$  МПа; допустимый перепад рабочих температур  $70$  °С. Одно из достоинств фарфора как изоляции – низкая стоимость.

Стекло имеет электрическую прочность  $E = 45$  кВ/см. Механические характеристики стекла примерно такие же, как у фарфора.

Закаленное стекло допускает нагрузку до 530 кН. Стеклопластиковые изоляторы могут изготавливаться методом штамповки и не требуют глазури. Прозрачность стекла позволяет легко обнаруживать трещины и другие дефекты, что облегчает контроль во время производства и эксплуатации.

Общий недостаток фарфоровых и стеклянных изоляторов – значительная масса и размеры.

В настоящее время широкое распространение получили изоляторы на основе стеклопластиков и полимерных покрытий. Полимерные изоляторы практически не повреждаются при транспортировке и имеют значительно меньшую (в 7–10 раз) металлоемкость подвесок, меньшую массу и размеры.

Металлическую арматуру изоляторов изготавливают из стали, ковкого и немагнитного чугунов или цветного металла. Немагнитный чугун и цветной металл применяются при больших токах с целью снижения потерь. Для крепления арматуры к диэлектрику используют высококачественные цементы и другие связующие.

Для изготовления изоляторов высоковольтной аппаратуры используется также эпоксидная смола, бакелизированная бумага и слоистые пластики. В высоковольтных вводах применяют бумажно-масляную и маслобарьерную изоляцию, защищенную фарфоровыми крышками.

Под воздействием токов короткого замыкания, ветра, гололеда и веса проводов высоковольтная изоляция испытывает большие механические нагрузки и вибрации. Кроме того, изоляция ВЛ и ОРУ подвержена воздействию тумана, дождя, загрязнению и резким колебаниям температуры. Поэтому изоляционные материалы должны обеспечивать длительную электрическую прочность с учетом климатических условий и уровня перенапряжений, а также достаточную механическую прочность.

Для обеспечения надежной и безопасной работы изоляция подвергается испытанию повышенным напряжением. Значения испытательных напряжений для изоляции разных классов напряжения приводятся в таблицах. Для изоляторов внутренней установки определяющим является сухоразрядное напряжение  $U_{с,р}$ , а для изоляторов наружной установки – мокроразрядное  $U_{м,р}$  – напряжение перекрытия под дождем.

## 2.2. Конструкции и характеристики стационарных и линейных изоляторов

**Изоляторы для закрытых установок.** Опорные и проходные изоляторы ЗРУ изготавливаются из электротехнического фарфора. На напряжения 6–10 кВ опорные изоляторы изготавливаются с внутренней герметизированной полостью (рис. 2.1, а) или сплошными с внутренней заделкой арматуры (рис. 2.1, б). Внутренняя заделка арматуры выравнивает электрическое поле, а следовательно, улучшает электрические характеристики изолятора. Кроме того, внутренняя заделка позволяет снизить вес и высоту изолятора.

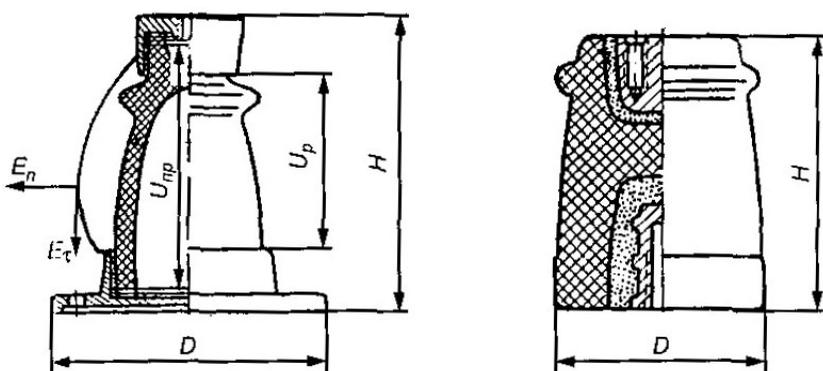


Рис. 2.1. Опорные изоляторы

Металлическая арматура в виде шапок и фланцев в конструкции (рис. 2.1, а) или закладных деталей (рис. 2.1, б) скрепляется с фарфором цементом. Крепление токоведущих частей к изоляторам и изоляторов к несущим конструкциям осуществляется с помощью болтовых соединений.

Механическая прочность изолятора определяется силой, приложенной к головке изолятора, или изгибающим моментом. Эти величины зависят от диаметра  $D$  и высоты изделия  $H$ .

Основными электрическими характеристиками изоляторов являются: сухоразрядное напряжение перекрытия по поверхности  $U_{с.р}$  и напряжение пробоя диэлектрика  $U_{пр}$ . При пробое изолятор теряет свои изоляционные свойства и становится непригодным для дальнейшего использования. При перекрытии изолятора по поверхности

изоляционные свойства восстанавливаются после отключения напряжения. Поэтому напряжения пробоя должно быть значительно больше напряжения перекрытия  $U_{пр} > U_{с.р.}$ .

Электрическое поле опорного изолятора неоднородное, имеет значительную тангенциальную составляющую  $E_{\tau}$ . Кроме того на распределение напряжения по высоте изолятора сильно влияет увлажнение и смачиваемость поверхности. Поэтому разрядное напряжение вдоль поверхности в 1,5–2 раза ниже разрядных напряжений в воздухе.

Для выравнивания электрического поля в области высоких напряженностей верхняя часть изолятора имеет небольшое ребро. На напряжении 20–35 кВ изоляторы могут иметь несколько таких ребер.

Основными каталожными параметрами опорных изоляторов для закрытых установок являются: номинальное напряжение  $U_n$ , сухоразрядное напряжение по поверхности при частоте 50 Гц  $U_{с.р.}$ , импульсное напряжение перекрытия  $U_{и}$ , изгибающий момент  $M_{из}$ , наибольший диаметр диэлектрика  $D$ , высота изолятора  $H$  и длина пути утечки по поверхности  $L$ .

Проходные изоляторы для закрытых установок (рис. 2.2) выполняются цилиндрической формы с небольшими ребрами у торцов. Торцы изоляционного цилиндра 1 армированы металлическими колпаками 4 для крепления шины или токоведущего стержня 3. Фланец 2, с помощью которого изолятор крепится к строительной конструкции или крышке аппарата, и колпаки 4 закрепляются на фарфоровом цилиндре цементом.

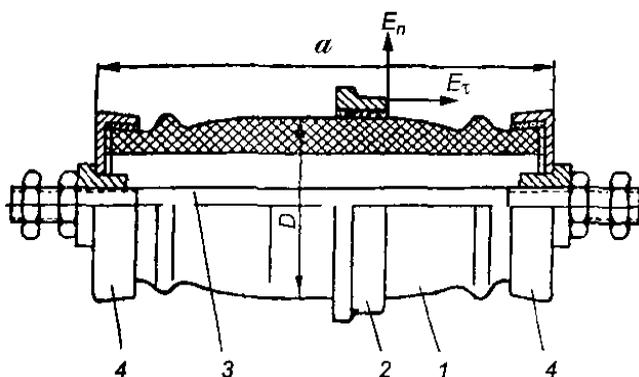


Рис. 2.2. Проходной изолятор

Диаметр изоляционного цилиндра под фланцем выбирается исходя из допустимой механической прочности, т. к. при протекании токов короткого замыкания в этом сечении возникают наиболее опасные механические напряжения.

Электрическое поле проходного изолятора весьма неоднородно и имеет значительную нормальную составляющую  $E_n$  в области сечения под фланцем. Поэтому, при наличии воздушной прослойки между токоведущим стержнем и диэлектриком возможно возникновение короны. При напряжениях до 10 кВ специальных мер по устранению короны не требуется. А при напряжениях 20 кВ и выше для предотвращения короны внутренняя поверхность изолятора металлизирована и ей сообщается потенциал стержня. Кроме этого в проходных изоляторах на напряжение 20 кВ и выше стремятся исключить воздушную прослойку, заполняя внутреннюю полость между стержнем и фарфором твердым или жидким диэлектриком.

Наибольшее значение тангенциальная составляющая электрического поля  $E_t$  будет иметь у фланца. Здесь возможно первоначальное возникновение короны, а при дальнейшем увеличении напряжения – развитие скользящего разряда по поверхности изолятора. Такое неравномерное распределение напряжения поля по внешней поверхности объясняется влиянием распределенной (удельной) емкости  $C_0$  относительно токоведущего стержня и удельного поверхностного сопротивления  $\rho_0$  (см. рис. 1.21). Как видно из рис. 1.21, через сопротивление  $\rho_0$ , расположенное ближе к фланцу 2, будет протекать наибольший ток, а наименьший через сопротивление, расположенное ближе к торцу изолятора. Следовательно, и напряжение вдоль поверхности распределяется неравномерно.

Для выравнивания напряжения по поверхности необходимо уменьшить емкость  $C_0$ . Так как величина емкости зависит от диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и толщины диэлектрика, то уменьшить неравномерность распределения напряжения по поверхности изолятора можно, уменьшив значение  $\epsilon$  и увеличив толщину стенок изолятора.

Напряжения перекрытия по поверхности приближенно можно определить по выражению

$$U_{\text{пер}} = \frac{1}{K} \sqrt[5]{\frac{l_{\text{из}}}{C_0^2}}, \quad (2.1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от рода напряжения;

$l_{\text{из}}$  – длина изолирующей поверхности.

Напряжение возникновения скользящего разряда может быть увеличено за счет снижения напряженности поля у фланца путем металлизации средней части наружной поверхности. В каталогах для проходных изоляторов указываются такие же параметры, что и для опорных, но дополнительно указывается номинальный ток, если изолятор имеет встроенный токоведущий стержень.

Проходные изоляторы для наружной установки в большинстве случаев являются высоковольтными вводами различной аппаратуры.

**Изоляторы для открытых установок.** Для открытых установок применяются *штыревые, опорные и подвесные* изоляторы. Они используются не только для крепления токоведущих частей ОРУ и ВЛ, но также как неотъемлемые элементы высоковольтных аппаратов, например разъединителей. Изоляторы наружной установки имеют сильно развитую поверхность (юбки), что позволяет сохранить сухие участки поверхности при дожде и тем самым увеличить разрядное напряжение.

Штыревые изоляторы применяются для крепления проводов линий до 35 кВ. Они изготавливаются из фарфора, стекла или полимеров. Последние широко применяются на напряжении 0,4 кВ.

Типичные конструкции опорных штыревых изоляторов приведены на рис. 2.3. Изолятор навертывается на металлический штырь, с помощью которого крепится на опоре или на траверсе опоры. Для плотного крепления штырь обматывается синтетической лентой или обеспечивается специальной втулкой. Крепление проводов осуществляется в верхней канавке к шейке изолятора с помощью проволоочной вязки.

Опорные изоляторы в свою очередь подразделяются на *опорно-штыревые* и *стержневые*. Они применяются для крепления жесткой ошиновки ОРУ, когда необходимо обеспечить высокую механическую прочность, а также как элементы разъединителей и выключателей.

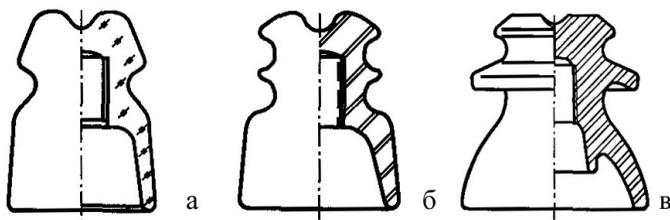


Рис. 2.3. Штыревые изоляторы:  
*а* – НС18А; *б* – НФ018; *в* – НФ10Г

Опорно-штыревой фарфоровый изолятор на 35 кВ (рис. 2.4) состоит из трех диэлектрических элементов, скрепленных между собой и с арматурой цементом. На напряжение 10 кВ изолятор имеет один диэлектрический элемент. На напряжение 110–220 кВ изоляционная колонка собирается из нескольких изоляторов 35 кВ.

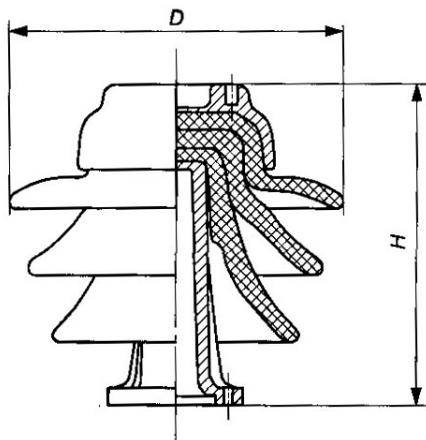


Рис. 2.4. Опорно-штыревой изолятор на 35 кВ

На рис. 2.5 представлены стержневые фарфоровые изоляторы на 35 и 110 кВ. Высокое разрядное напряжение по поверхности стержневой конструкции достигается за счет большого количества ребер. При этом наибольшее разрядное напряжение по поверхности получается при отношении вылета ребра к расстоянию между ребрами равном 0,5.

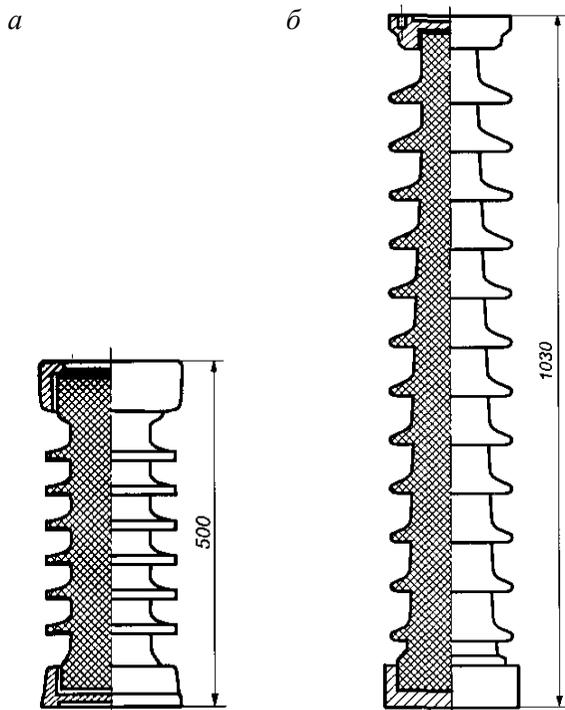


Рис. 2.5. Стержневые изоляторы:  
*a* – 35 кВ; *б* – 110 кВ

Для увеличения механической прочности стержневые изоляторы на напряжение 110 кВ и выше выполняют большого диаметра с внутренней полостью. Однако такие конструкции имеют низкие разрядные напряжения по внутренней поверхности. Для устранения этого недостатка внутренняя полость герметизируется и заливается компаундом.

На напряжение 330 кВ и выше изоляционные конструкции на основе опорных изоляторов получают очень высокими и не обладают достаточной прочностью на изгиб. Поэтому используются конструкции в виде треноги из трех колонок. В этом случае при изгибающих усилиях фарфор работает не только на изгиб, но и на сжатие.

Наряду с производством опорных изоляторов из фарфора широкое распространение получили полимерные изоляторы с кремний-

органическим или полиолефиновым покрытием. Изготавливаются также и гибридные конструкции, у которых стержень состоит из фарфора, а ребра – из кремнийорганической резины (рис. 2.6). Полимерные изоляторы изготавливаются на напряжения до 110 кВ включительно как в обычном исполнении, так и для районов с повышенным загрязнением, и используются как для крепления проводов, так и в качестве опорных колонок разъединителей и других конструкций. Они имеют значительно меньшую массу, чем фарфоровые, при тех же значениях электрических параметров.

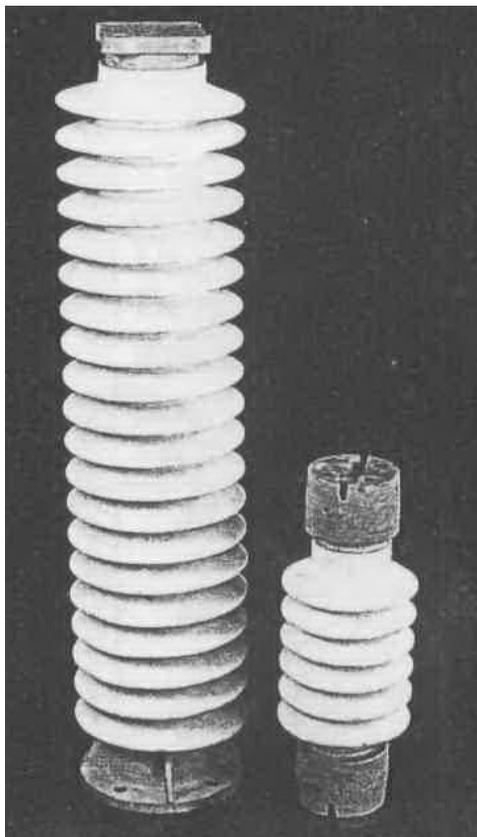


Рис. 2.6. Изоляторы опорные стержневые гибридные для напряжений 110 и 35 кВ

Подвесные изоляторы, тарельчатые и стержневые, предназначены для крепления гибких токопроводов ОРУ и ВЛ.

Тарельчатые изоляторы (рис. 2.7, 2.8) выполняются из фарфора или стекла, армируются сверху металлической шапкой, а снизу – металлическим стержнем. Арматура крепится с помощью цемента. Внутренняя и внешняя поверхность головки, где скрепляется арматура, покрываются слоем битума, что позволяет избежать опасных механических напряжений при резких колебаниях температуры.

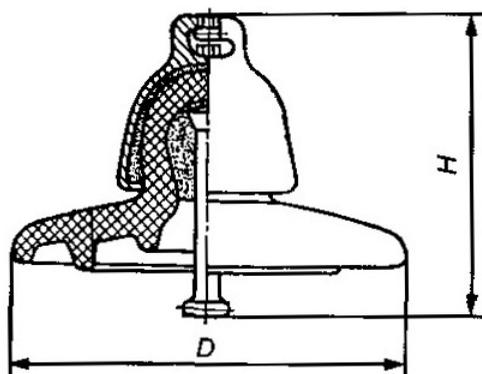


Рис. 2.7. Тарельчатый изолятор

Благодаря конической форме внутренней полости растягивающие усилия, которые действуют на стержень и шапку, вследствие расклинивающего эффекта приводят к тому, что диэлектрик работает на сжатие. Это обеспечивает высокие прочностные характеристики. Размеры, форма тарелки и количество ребер выбираются с учетом климатических условий, чтобы обеспечить высокое значение мокроразрядного напряжения и высокую устойчивость к механическим воздействиям.

Так, в изоляторе типа ПСД 70Е (рис. 2.8, в) наружная и внутренняя поверхности головки изоляционной детали выполнены в виде конических выступов, а тарелка имеет вытянутое нижнее ребро, что обеспечивает наибольшую длину пути утечки. Изоляторы со сферической и сферическо-конической поверхностью (рис. 2.8, а, б) имеют хорошие аэродинамические свойства, что обеспечивает минимальную загрязненность и хорошую самоочистку под действием ветра и

дождя. Изоляторы типа ПСА 70 (рис. 2.8, б) обладают высокой прочностью тарелки даже при обстрелах (антивандальные изоляторы).

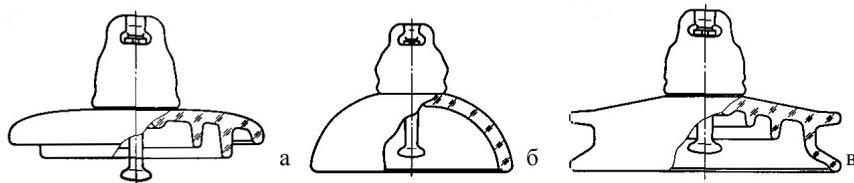


Рис. 2.8. Тарельчатые изоляторы:  
а – ПС 120Б; б – ПСА 70; в – ПСД 70Е

Стеклянные изоляторы по сравнению с фарфоровыми имеют меньшие габариты, лучшие характеристики и более простую технологию изготовления.

Подвесные полимерные стержневые изоляторы изготавливаются на напряжения от 35 до 500 кВ включительно для районов с различной степенью загрязнения и районов 1–4 степени гололеда и ветровых нагрузок. Для ЛЭП 750 кВ и выше из этих изоляторов комплектуются гирлянды. Масса полимерных изоляторов в 15–18 раз, а строительная высота на 50 % меньше эквивалентных гирлянд тарельчатых изоляторов, что позволяет снизить нагрузки на опоры, уменьшить габариты ВЛ или увеличить пролет.

На основе полимерных изоляторов изготавливают также различные распорки, траверсы, растяжки и другие изолирующие элементы ВЛ.

На рис. 2.9 представлен полимерный изолятор нормального исполнения (330, 500 кВ). Такие изоляторы состоят из стеклопластикового стержня, ребристой кремнийорганической или полиолефиновой оболочки и металлических оконцевателей. Металлические оконцеватели комплектуются экранной арматурой (кольцами), что снижает напряженность электрического поля в стеклопластиковом стержне, уровень радиопомех при рабочем напряжении, увеличивает напряжение короны и дугостойкость.



Рис. 2.9. Полимерный подвесной изолятор

### 2.3. Гирлянды изоляторов. Распределение напряжения по элементам гирлянды

На напряжение 35 кВ и выше подвесные изоляторы собираются в гирлянды (рис. 2.10, а). Шарнирное соединение элементов гирлянды обеспечивает гибкость гирлянды, что снижает механические нагрузки на изоляторы при обрыве провода и сильном ветре, а также создает удобства монтажа.

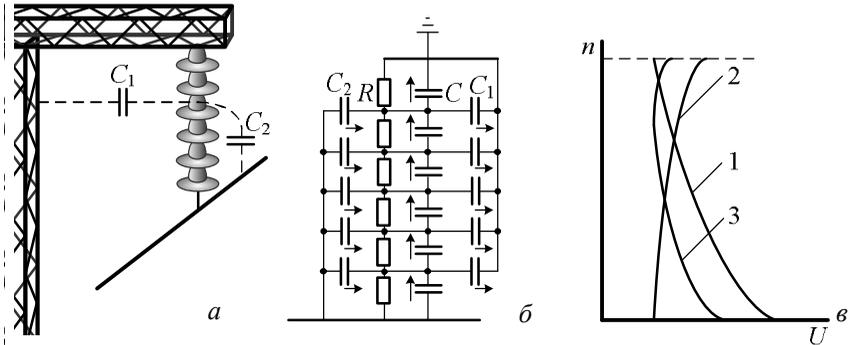


Рис. 2.10. Гирлянды изоляторов:

а – схема подвеса на портале; б – схема замещения гирлянды изоляторов;  
в – распределение напряжения по элементам гирлянды

Гирлянды подразделяются на *поддерживающие* и *натяжные*. Поддерживающие гирлянды монтируются на промежуточных опорах, их нагрузка определяется весом проводов и возможными осадками (гололедом). Для подвеса проводов концевых, угловых и анкерных опор используются натяжные гирлянды изоляторов, которые кроме веса провода и гололеда воспринимают нагрузки, определяемые тяжением провода. Поэтому они располагаются почти горизонтально. При использовании проводов больших сечений применяются сдвоенные и строенные гирлянды.

Основными электрическими характеристиками гирлянды являются сухоразрядное и мокроразрядное напряжения перекрытия. Значения этих напряжений зависят от типа и количества используемых изоляторов.

Проведенные исследования и опыт эксплуатации показывают, что величины разрядных напряжений гирлянды не равны сумме

разрядных напряжений отдельных изоляторов. Это объясняется тем, что при перекрытии гирлянды дуга может на отдельных участках отрываться от поверхности изолятора. Кроме того, в процессе эксплуатации имеет место загрязнение поверхности изолятора продуктами уноса промышленных предприятий и пылью, что снижает величину поверхностного сопротивления и увеличивает вероятность перекрытия.

Поэтому электрическую прочность гирлянды принято оценивать по величине эффективной длины пути утечки  $L_{\text{эф}}$  и коэффициенту удельной эффективной длины утечки

$$\lambda_{\text{эф}} = L_{\text{эф}}/U, \quad (2.2)$$

где  $U$  – амплитуда линейного напряжения.

Вероятность перекрытия будет тем меньше, чем больше значение  $\lambda_{\text{эф}}$ .

Значение  $L_{\text{эф}}$  зависит от геометрических размеров изолятора  $H$  и  $D$  (см. рис. 2.7) и для внешней изоляции может быть определено по выражению

$$L_{\text{эф}} = L/K. \quad (2.3)$$

Коэффициент  $K$  зависит от отношения  $L/H$ . Значение коэффициента  $K$  лежит в пределах 1,0–1,4.  $\lambda_{\text{эф}}$  нормируется и приводится в таблицах для районов с различной степенью загрязнения.

Для надежной работы изоляции необходимо, чтобы длина утечки была

$$L \geq K \cdot \lambda_{\text{эф}} U_{\text{раб max}}, \quad (2.4)$$

где  $U_{\text{раб max}}$  – наибольшее длительно допустимое напряжение между фазами.

Второй отличительной особенностью работы изоляторов в гирлянде является неравномерность распределения напряжения по отдельным элементам гирлянды.

Электрическая схема замещения гирлянды приведена на рис. 2.10, б. Здесь  $C$  – собственная емкость изолятора;  $C_1$  – емкость изолятора относительно опоры;  $C_2$  – емкость изолятора относительно провода. Для используемых в эксплуатации тарельчатых изоляторов значения емкостей колеблются в пределах  $C = 30\text{--}70$  пФ;  $C_1 = 4\text{--}5$  пФ,  $C_2 = 0,5\text{--}1,0$  пФ.

Рассмотрим характер изменения напряжения по гирлянде изоляторов для случая, когда провод имеет положительный потенциал относительно опоры. Направление токов для этого случая показано на рис. 2.10, б.

Допустим, что  $C_1 > 0$ , а  $C_2 = 0$ . Тогда наибольший ток будет протекать через первый от провода изолятор (емкость  $C$ ). По мере приближения к опоре токи, протекающие через изоляторы, будут уменьшаться в результате шунтирующего влияния емкостей  $C_1$ , и через последний изолятор будет протекать минимальный ток. В этом случае характер распределения по элементам гирлянды будет иметь вид кривой 1 (рис. 2.10, в).

Для случая  $C_1 = 0$  и  $C_2 > 0$  наибольший ток будет протекать через изолятор, расположенный у опоры, а наименьший – через первый изолятор за счет шунтирующего влияния емкостей  $C_2$ . Поэтому характер распределения напряжения по элементам гирлянды будет иметь вид кривой 2.

При  $C_1 > 0$  и  $C_2 > 0$  токи, протекающие через изоляторы (емкости  $C$ ), будут определяться соотношением токов  $i_1 = \omega C_1 U_1$  и  $i_2 = \omega C_2 U_2$ . Так как  $C_1 > C_2$ , то  $i_1 > i_2$  и напряжение на первом от провода изоляторе будет больше, чем на последующих.

При значительном количестве изоляторов ( $n > 6$ ) ток, протекающий через  $n$ -й изолятор, может быть больше тока через  $n - 1$ -й за счет соотношения токов  $i_1$  и  $i_2$ . В этом случае напряжение на  $n$ -м изоляторе может быть больше, чем на  $n - 1$ -м, а характер распределения напряжения по гирлянде будет иметь вид кривой 3. Таким образом, причиной неравномерного распределения напряжения по изоляторам является влияние емкостей  $C_1$  и  $C_2$ .

При количестве изоляторов 6 и более на первый изолятор от провода приходится 20–25 % полного фазного напряжения. Нерав-

номерность распределения напряжения не снижает электрическую прочность гирлянды, однако при напряжении 154 кВ и более на первом изоляторе возможно возникновение короны. Корона увеличивает потери энергии, вызывает коррозию металла и создает значительные радиопомехи. Поэтому требуются специальные меры по выравниванию напряжения на гирлянде изоляторов.

Наиболее эффективным способом выравнивания напряжения является использование защитной арматуры в виде металлических колец, овалов, восьмерок, укрепленных на обоих концах гирлянды или только на линейном конце. Арматура увеличивает емкость изоляторов относительно провода, что приводит к выравниванию напряжения.

Сравнительно равномерное распределение напряжения имеет место и при использовании расщепленных проводов. При дожде неравномерность распределения напряжения уменьшается за счет увеличения токов утечки по поверхности изоляторов, а при сухой погоде уменьшение неравномерности достигается за счет интенсивной ионизации у наиболее загруженного по напряжению изолятора.

При использовании более массивных изоляторов или сдвоенных гирлянд неравномерность уменьшается за счет увеличения значения сквозного тока, протекающего через собственные емкости изоляторов  $C$ . Защитная арматура предохраняет фарфоровую поверхность изолятора от повреждения дугой при перекрытиях, так как разряд отводится от поверхности изолятора и дуга горит на кольцах защитной арматуры. Разрядные характеристики гирлянд, снабженных арматурой, практически не отличаются от характеристик гирлянд без арматуры.

## 2.4. Выбор изоляторов

**Выбор изоляторов закрытых установок.** Условия работы изоляции ЗРУ более благоприятные, т. к. изоляция менее подвержена воздействию различных атмосферных условий. Кроме того, абсолютные значения внутренних и атмосферных перенапряжений в сетях до 20 кВ значительно меньше, чем в сетях 35 кВ и выше. Поэтому запас электрической прочности изоляторов на напряжение до 20 кВ достаточно высок.

Однако в диапазоне генераторных напряжений значения токов короткого замыкания могут достигать десятков и сотен тысяч ампер.

Поэтому опорные и проходные изоляторы ЗРУ, выбранные по номинальным значениям напряжения и тока, обязательно должны проверяться на динамическую стойкость при коротких замыканиях (КЗ).

Сущность этого расчета сводится к определению изгибающего момента, действующего на изолятор при максимальном значении ударного тока КЗ для принятого расположения шинопроводов. Иногда расчет сводят к определению критического пролета между изоляторами по каталожному значению изгибающего момента для выбранного изолятора. Подробно эти вопросы рассматриваются в курсе «Электрические станции».

**Выбор изоляторов наружной установки.** Для обеспечения надежной работы выбор типа и количества изоляторов в гирлянде необходимо производить с учетом климатических условий и степени загрязнения атмосферы. По степени загрязнения атмосферы районы подразделяются на 6 категорий. К I категории относятся районы, имеющие наименьшую степень загрязнения атмосферы: это сельскохозяйственные районы, луга, леса, болота, тундра. Ко II категории относятся районы с сильной ветровой эрозией почвы, сельскохозяйственные районы, где применяются химические удобрения и гербициды, промышленные города. Территория вблизи промышленных предприятий в зависимости от вида и объема производства, а также территории вблизи морей, соленых почв и озер относятся к III–VI зонам загрязнения.

Размеры этих зон – минимальный защитный интервал для различных производств определяется руководящими указаниями по выбору изоляции. Если имеет место наложение зон загрязнения от двух источников, то степень загрязнения определяется по источнику, создающему наибольшее загрязнение.

Для конкретных климатических условий с учетом степени загрязнения атмосферы электрическая прочность гирлянды будет обеспечена, если

$$nL_1 \geq K \cdot \lambda_{\text{эф}} U_{\text{раб max}}, \quad (2.5)$$

где  $n$  – число изоляторов в гирлянде;

$L_1$  – длина пути утечки одного изолятора.

Количество изоляторов в гирлянде

$$n \geq \frac{K \cdot \lambda_{\text{эф}} U_{\text{раб max}}}{L_1} \quad (2.6)$$

Значения  $K = f(L/H)$  приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения  $K = f(L/H)$

$L/H$	1,5	2,0–2,3	2,3–2,7	2,7–3,2	3,2–3,5
$K$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

Для обеспечения надежной работы гирлянд под дождем при воздействии внутренних перенапряжений количество элементов в гирлянде должно удовлетворять условию

$$n \geq \frac{K_p \cdot U_{\text{раб max}}}{E_{\text{м,р}} H}, \quad (2.7)$$

где  $E_{\text{м,р}}$  и  $H$  – соответственно расчетная мокроразрядная напряженность и строительная высота принятого изолятора;

$K_p$  – расчетная кратность внутренних перенапряжений. Значение  $K_p$  принимается 3 для ЛЭП 110–220 кВ; 2,7 – для 330 кВ; 2,5 – для 500 кВ.  $E_{\text{м,р}} = 2,0–2,5$  кВ/см.

В процессе эксплуатации возможны повреждения отдельных элементов, поэтому правила устройства электроустановок (ПУЭ) рекомендуют увеличить количество изоляторов, определенных расчетным путем, на один – для ВЛ 110–220 кВ и два – для 330 кВ и выше.

Рекомендуемое количество элементов наиболее распространенных типов изоляторов в поддерживающих гирляндах ВЛ 110–500 кВ на металлических и железобетонных опорах при высоте до 1000 м над уровнем моря приведено в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Количество элементов наиболее распространенных типов изоляторов в гирлянде, шт.

Тип изолятора	Напряжение ЛЭП, кВ			
	110	220	330	500
ПФ6-А	7	13	19	–
ПФ6-Б	7	14	20	27
ПФ6-В	7	12	18	25
ПФ16-А	6	11	17	23
ПФ20-А	–	10	14	20
П-8,5	6	11	16	22
П-11	6	11	15	21
ПФЕ-11	6	11	16	21
ПС6-А	8	14	21	29
ПС-11	7	12	17	24
ПС12-А	7	13	19	26
ПС16-А	6	11	16	22
ПС16-Б	6	12	17	24
ПС22-А	–	10	15	21
ПС30-А	–	11	16	22
ПС30-Б	–	11	16	22

Количество подвесных изоляторов в натяжных гирляндах увеличивается на один по сравнению с рекомендуемым для поддерживающих гирлянд. На переходных опорах высотой более 40 м количество изоляторов в гирлянде следует увеличивать по сравнению с принятыми для всех остальных опор этой ВЛ на один изолятор на каждые 10 м высоты опоры сверх 40 м. Для ВЛ, проходящих на высоте более 1000 м над уровнем моря, количество элементов в гирлянде увеличивается на один.

Количество изоляторов на ВЛ, проходящих в местах с сильным загрязнением атмосферы, должно выбираться с учетом местных условий. При этом для районов IV–VI следует рассматривать возможность использования специальных изоляторов.

Выбор типа и числа подвесных и опорных изоляторов для ОРУ производится аналогичным образом, как и для ВЛ. Однако следует учитывать, что к изоляции ОРУ предъявляются более высокие требования, так как повреждение изоляции ОРУ может привести к тяжелым авариям и повреждению дорогостоящего оборудования. Поэтому для оборудования, предназначенного для установки в ОРУ, значение эффективной длины утечки  $\lambda_{\text{эф}}$  устанавливается в зависимости от категории исполнения А, Б или В (табл. 2.3). Оборудование категории А предназначено для районов со степенью загрязнения I–II. Оборудование категории Б имеет усиленное исполнение и предназначено для районов III–IV категории. При степени загрязнения VI используется оборудование категории В.

При степени загрязнения III–VI рекомендуют выносить ОРУ из зоны повышенных загрязнений, а размещение ОРУ 500–750 кВ в районах IV–VI вообще не допускается.

Таблица 2.3

Эффективная длина утечки  $\lambda_{\text{эф}}$  для категорий оборудования

Категория электро- оборудования	$\lambda_{\text{эф}}$	
	с заземленной нейтралью	с изолированной нейтралью
А	1,50	1,7
Б	2,25	2,6
В	3,10	3,5

Для увеличения разрядных напряжений в условиях загрязненной атмосферы применяют изоляторы с поверхностью, покрытой полупроводниковой глазурью или водоотталкивающей смазкой. В условиях эксплуатации применяется также периодическая обмывка изоляции.

Коэффициент запаса механической прочности принятых изоляторов согласно ПУЭ должен составлять: для ВЛ в нормальном режиме – не менее 2,7; при среднегодовой температуре, отсутствии гололеда и ветра – не менее 5,0; в аварийном режиме для ВЛ 500 кВ – не менее 2,0; а на напряжения 330 кВ и ниже – не менее 1,8.

## 2.5. Выбор основных изоляционных промежутков ЛЭП и РУ

Воздушные промежутки являются естественной изоляцией ВЛ и РУ. Напряжение пробоя воздушных промежутков зависит от многих факторов: климатических условий, однородности поля, конструкции опор и расположения проводов. В установках 330 кВ и выше напряжения пробоя зависит также от расщепления проводов, полярности и значения напряжения соседних фаз.

При выборе расстояния между токоведущими частями, между токопроводами и заземленными конструкциями необходимо учитывать безопасность обслуживания и экологическое влияние высокого напряжения на персонал, а также требования техники безопасности при движении транспортных средств.

Во всех случаях разрядные напряжения воздушных промежутков должны быть на 10–15 % больше, чем воздействующие напряжения. Кроме того, электрическая прочность промежутков должна быть скоординирована с электрической прочностью гирлянд изоляторов при рабочих напряжениях, грозовых и внутренних перенапряжениях.

Для ОРУ напряжением до 220 кВ за основу принимают испытательные напряжения грозовых импульсов, а для ОРУ 330 кВ и выше – испытательные напряжения промышленной частоты.

По условию воздействия атмосферных перенапряжений расчетная величина импульсного разрядного напряжения принимается равной 50%-му разрядному напряжению гирлянды при положительной полярности.

По условиям внутренних перенапряжений разрядное напряжение воздушного промежутка должно удовлетворять условию

$$U_p \geq 1,1-1,5 \frac{K \cdot U_{\text{раб max}}}{\beta}, \quad (2.8)$$

где  $K$  – коэффициент кратности внутренних перенапряжений;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий метеорологические условия, равный 0,89, 0,84, 0,74 соответственно для высот 500, 1000 и 2000 м над уровнем моря.

Наименьшие размеры воздушных промежутков для ВЛ и РУ, принятые на основе исследований и опыта эксплуатации, приводятся в ПУЭ.

Изоляционные расстояния между фазами в РУ принимаются на 10 % больше, чем между фазой и землей. При гибкой ошиновке изоляционные расстояния должны быть увеличены с учетом возможных сближений проводов под действием ветра и токов короткого замыкания.

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала в тех местах, где это необходимо, расстояния должны быть увеличены на следующие величины: минимальное расстояние от токоведущих конструкций до земли на 270 см, при этом расстояние от нижней кромки диэлектрической части изолятора до земли не должно быть меньше 250 см; минимальное расстояние между токоведущими частями и ограждениями, зданиями и сооружениями на 200 см; минимальное расстояние от токоведущих частей до транспортируемого оборудования на 75 см.

Расстояние провод–земля выбирается по уровню внутренних перенапряжений исходя из условия проезда транспорта высотой 4 м под ЛЭП в точке наибольшего провисания проводов, а при напряжениях 750–1150 кВ – исходя из допустимого значения напряженности поля на высоте 1,8 м (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Допустимое значение напряженности поля на высоте 1,8 м

$U$ , кВ/м	6–20	35–110	150	220	330	500	750	1150
$h$ , м	6	6	6,5	7	7,5	8		
$E$ , кВ/м						7	12,0	14,0

С точки зрения экологического влияния высоких и сверхвысоких напряжений кроме минимальных расстояний регламентируется время пребывания персонала в электрическом поле. Для этого в ОРУ и в полосе ВЛ по результатам измерений составляется карта напряженности электрического поля.

Допустимая продолжительность пребывания человека в электрическом поле в течении суток приведена в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Длительность пребывания в электрическом поле

Напряженность поля, кВ/м	5	10	15	20	25
Время пребывания, мин	не огр.	180	90	10	5

Если напряженность на рабочем месте превышает 25 кВ/м или продолжительность работы превышает допустимое время, то работы должны производиться с применением средств защиты, например, экранирующей одежды.

Если кроме обслуживающего персонала рядом могут находиться местные жители, то напряженность электрического поля не должна превышать 15 кВ/м в населенных пунктах и 20 кВ/м в ненаселенной местности.

Для ВЛ сверхвысокого напряжения устанавливаются зоны влияния. Например, для ЛЭП 750 кВ зона влияния составляет 40 м. Время пребывания в зоне влияния не должно превышать 1,5 ч в сутки.

Для обеспечения безопасности местного населения в зоне вывешиваются предупредительные знаки и проводится периодический инструктаж. В зоне влияния запрещается складирование материалов и горючего, установка различных металлических емкостей, строительство загонов для скота.

В пролетах ВЛ расстояния между проводами сохраняются такими же, как и на опорах. Расстояния между проводами и тросами в середине пролета зависят от длины пролета (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Расстояния между проводами и тросами в середине пролета

$l$ , м	100	200	300	400	500	600
$S$ , м	3,2	4,0	5,5	7,0	8,5	10,0

### 3. ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ

#### 3.1. Общие сведения и требования

Изоляционные конструкции, обеспечивающие изоляцию токоведущих частей машин, аппаратов, кабелей, конденсаторов, приборов и других элементов, относятся к внутренней изоляции.

По конструктивному исполнению внутренняя изоляция может иметь различную форму и одновременно выполнять функцию крепежных деталей и теплоотводящей среды. По агрегатному состоянию внутренняя изоляция может быть газообразной, жидкой, твердой или комбинированной. Наиболее широкое применение получили сложные изоляционные конструкции и комбинации: бумажно-масляная изоляция (БМИ), маслобарьерная изоляция (МБИ), комбинированная изоляция на основе слюдопластов, стеклопластов, полимеров, связующих и других материалов.

Основными достоинствами внутренней изоляции являются:

- 1) высокая электрическая прочность (в 5–10 раз выше, чем воздуха), что позволяет резко сократить размеры изоляции;
- 2) высокая механическая прочность;
- 3) жидкая и газообразная изоляция обеспечивает хорошие условия охлаждения.

Характерными особенностями внутренней изоляции являются:

- 1) сложный характер зависимости электрической прочности при длительном воздействии напряжения;
- 2) зависимость электрической прочности от механических, тепловых и других внешних факторов, таких как увлажнение, загрязнение и т. п., которые в конечном итоге приводят к старению и разрушению изоляции;
- 3) для твердой изоляции, в том числе и комбинированной, электрический пробой носит необратимый характер.

Все эти специфические свойства внутренней изоляции не позволяют определить электрическую прочность перед вводом в эксплуатацию, т. к. после испытания электрооборудование будет не пригодно к эксплуатации. Поэтому электрическая прочность внутренней изоляции оценивается косвенным путем: измерением  $\operatorname{tg} \delta$ , интенсивности частичных разрядов, величины сопротивления изоляции  $R_{\text{из}}$ ,

по результатам испытания на моделях и другими методами. Учитывая высокую стоимость оборудования и требования к надежности электроснабжения, электрическая прочность внутренней изоляции должна быть выше прочности внешней.

Исходя из вышеизложенного можно сформулировать общие требования к внутренней изоляции:

1) высокая кратковременная и длительная прочность, малые диэлектрические потери, стойкость к частичным разрядам (ЧР), отсутствие газовых включений;

2) хорошие тепловые свойства: теплопроводность, стойкость к тепловому старению, высокая допустимая рабочая температура, пожаро- и взрывобезопасность;

3) механические свойства: прочность конструкции, отсутствие трещин, расслоений и др. дефектов;

4) технологичность материала с точки зрения организации высокопроизводительного процесса при изготовлении электрооборудования;

5) материал должен удовлетворять экологическим требованиям: не выделять вредных газов, хорошо перерабатываться без загрязнения окружающей среды;

6) материалы не должны быть дефицитными и дорогими;

7) материал должен удовлетворять специфическим требованиям для данного оборудования (высокая  $\varepsilon$ , высокая рабочая температура, низкий  $\operatorname{tg} \delta$  и т. д.).

Всем вышеперечисленным требованиям удовлетворяют комбинированные и композиционные конструкции на основе газообразных, жидких и твердых материалов органического и неорганического происхождения.

### **3.2. Газовая изоляция**

Преимущества газовой изоляции: самовосстанавливаемость, стойкость к старению, пожаробезопасность, высокое удельное сопротивление  $\rho$ , малый  $\operatorname{tg} \delta$ . Применение газов в качестве изолирующей среды позволяет снизить массу и габариты конструкции. Для обеспечения безопасной и надежной конструкции необходимо, чтобы газы удовлетворяли следующим требованиям:

1) газы должны быть стойкими к электрическим разрядам и не выделять токсичных веществ;

2) не вступать в химические реакции с контактирующими материалами;

3) обладать высокой теплопроводностью и иметь низкую температуру сжижения, допускающую работу при высоких давлениях;

4) быть негорючими;

5) иметь низкую стоимость.

В настоящее время в качестве изоляции применяют следующие газы: воздух, элегаз, азот и смесь азота с элегазом.

**Элегаз.** Прочность элегаза в 2,5 раза выше электрической прочности воздуха. Она возрастает пропорционально давлению, однако увеличение давления ограничивается возможностью сжижения: температура сжижения  $T_{\text{сж}} = -45^\circ\text{C}$  при давлении  $P = 8$  МПа.

Механизм развития разрядных процессов в элегазовой изоляции такой же, как и в воздухе. В резконеоднородных полях зависимость  $U_{\text{пр}} = f(P)$  имеет максимум (рис. 3.1). Максимум объясняется образованием при ионизации объемного заряда вокруг электрода, который как бы увеличивает радиус его кривизны, выравнивая тем самым поле. Снижение  $U_{\text{пр}}$  после достижения максимума объясняется частичной нейтрализацией положительного объемного заряда электронами лавин. Затем разряд переходит в стримерную стадию и напряжение пробоя уменьшается, приближаясь к начальному напряжению возникновения короны. Выбирая рабочее давление изоляционного газа, следует учитывать эту аномалию (рис. 3.1).

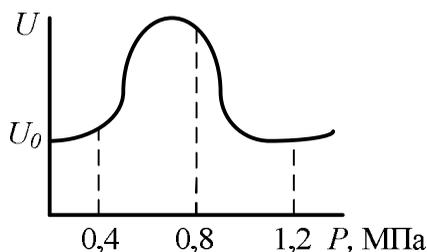


Рис. 3.1. Зависимость пробивного напряжения от давления для элегаза

Напряжение возникновения короны и электрическая прочность элегазовой изоляции зависит от однородности поля и площади элект-

родов. Напряжение перекрытия по поверхности твердой изоляции в среде элегаза так же, как и в воздушных промежутках, ниже, чем прочность чистого элегаза. Это объясняется в основном неоднородностью электрического поля возле поверхности изоляции, вызванной наличием загрязнений, влаги и т. п.

Недостатки элегазовой изоляции:

1) необходимость хорошей герметизации конструкции;

2) необходимость высокой степени чистоты всей конструкции от пыли, влаги, металлической стружки, волокон. Наличие этих веществ приводит к разложению элегаза и образованию химически активных веществ.

Применение элегаза – изоляция КРУЭ на напряжение 110–220 кВ при  $P = 0,3$  МПа (разрабатывается КРУЭ и на 1150 кВ); изоляция кабелей, трансформаторов, конденсаторов. Использование элегаза позволяет на порядок увеличить ток отключения и время отключения тока коммутационными аппаратами.

**Азот.** Применяется как изолирующая среда трансформаторов (в качестве прослойки, изолирующей трансформаторное масло от воздуха для исключения его увлажнения и окисления), конденсаторов, как чистый, так и в смеси с элегазом.

### 3.3. Вакуумная изоляция

К вакуумной относится газовая изоляция, находящаяся под давлением 0,01–0,2 кПа (для сравнения атмосферное давление составляет 100 кПа). Глубокий вакуум возникает при  $P \leq 10^{-3}$  Па. Характерной особенностью вакуумной изоляции является высокая электрическая прочность ( $E = 10^6$  В/см при  $L = 10^{-3}$  см), хорошие дугогасящие свойства, низкая теплопроводность.

Механизм пробоя вакуума в основном объясняется автоэлектронной и вторичной эмиссией. При локальных нагревах электродов могут образовываться газо- или парообразные выбросы с их поверхности. Пробивные напряжения зависят от чистоты поверхности, формы поля, числа разрядов и других факторов. В силу этого  $U_{пр}$  имеет большой разброс. Для увеличения  $U_{пр}$  вакуумной изоляции применяют тренировку (выдержка под напряжением).

Недостатки вакуумной изоляции:

- 1) сложность получения глубокого вакуума;
- 2) сложность осуществления привода подвижных частей электрооборудования;
- 3) сложность обработки токоведущих частей.

Область применения вакуума: КРУ, электровакуумные приборы, высоковольтные выключатели, конденсаторы, вакуумные разрядники.

### 3.4. Жидкая изоляция

Жидкая изоляция, как и газовая, обладает самовосстанавливающимися свойствами и хорошими теплопроводящими свойствами. Кроме того, некоторые жидкие диэлектрики обладают и дугогасящими свойствами.

В качестве жидких диэлектриков в настоящее время используются различные нефтяные масла, а также синтетические, кремнийорганические и фторорганические жидкости.

Электрические разряды в жидких диэлектриках могут иметь электрический, тепловой или электрохимический характер или их сочетание. На электрическую прочность жидких диэлектриков значительное влияние оказывают различные примеси: вода, газы, волокнистые материалы, а также однородность поля и температура.

### 3.5. Кратковременная и длительная электрическая прочность внутренней изоляции

В течение длительного времени происходит старение изоляции и снижение ее главного параметра – *электрической прочности*. Однако если рассматривать зависимость пробивного напряжения на большом промежутке времени ( $10^{-6}$ – $10^6$  с), то выясняется, что на отдельных интервалах времени механизм разрушения изоляции имеет различную физическую природу. При этом границы действия того или иного механизма разрушения весьма условны и зависят от конструкции изоляции, вида материала и условий работы. Кроме того, зависимость пробивного напряжения от времени его воздействия  $U_{пр} = f(\tau)$  (кривая «жизни» изоляции) (рис. 3.2) является статистической характеристикой, для которой среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  пробивных напряжений может достигать значительной величины.

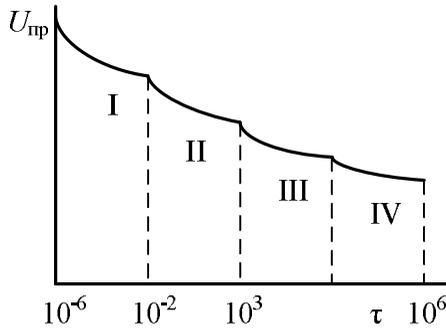


Рис. 3.2. Зависимость пробивного напряжения от времени воздействия напряжения

Зависимость  $U_{\text{пр}} = f(\tau)$  можно разбить на несколько зон (рис. 3.2), в каждой из которых главную роль будет играть определенный механизм разрушения. Границы разделения зон носят ориентировочный характер и для различных видов изоляции могут отличаться.

В интервале времени I от микросекунд до нескольких миллисекунд главную роль в разрушении изоляции играют электрические процессы. В этом интервале свободные электроны под действием электрического поля приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных молекул и образования лавины электронов. Для развития электрического пробоя в этом случае необходимо, чтобы время приложения напряжения  $\tau$  было больше времени развития разряда  $\tau > \tau_p$ . Очевидно, что это время будет зависеть от толщины и свойств материала, а также от наличия примесей. Так, для жидких диэлектриков при  $\tau = 10^{-3}$  с снижение электрической прочности можно объяснить влиянием примесных твердых частиц, вокруг которых происходит некоторое увеличение напряженности электрического поля. Электрические процессы, аналогичные рассматриваемым, могут развиваться в изоляции при воздействии атмосферных и внутренних перенапряжений. Поэтому для обеспечения надежной работы оборудования, импульсная прочность внутренней изоляции должна быть больше возможных атмосферных и внутренних перенапряжений с учетом их ограничения защитной аппаратурой.

В интервале II (от долей секунд до нескольких часов) главным механизмом пробоя являются тепловые процессы. Реальная изоля-

ция обладает конечным значением проводимости, кроме того, в изоляции протекают поляризационные процессы, связанные с потерей энергии. Поэтому при длительном воздействии напряжения имеет место разогрев изоляции, что в свою очередь приводит к дальнейшему увеличению диэлектрических потерь и дальнейшему увеличению мощности, рассеиваемой в диэлектрике. Значительную часть тепла изоляция может получать от токоведущих частей, нагревающихся при протекании по ним тока. При нарушении баланса получаемой и отводимой от изоляции тепловой энергии процесс может приобретать лавинный характер, что в конечном итоге приводит к тепловому разрушению и пробоем изоляции. Также в этом интервале возможно старение изоляции от возникновения частичных разрядов в газовых включениях и расслоениях изоляции, которые могут возникать в изоляции в результате импульсных перенапряжений.

В интервале времени от нескольких часов до нескольких лет (зоны III и IV) старение изоляции и пробивные напряжения определяются медленно протекающими процессами. Главную роль здесь играют частичные разряды слабой интенсивности. В жидкой изоляции процесс медленного старения связан с окислительными процессами, которые развиваются при соприкосновении жидкости с металлами, кислородом и озоном.

Электрическая прочность внутренней изоляции при длительном воздействии напряжения должна быть выше уровня возможных отклонений рабочего напряжения. Однако, определение электрической прочности изоляции при длительном воздействии напряжения экспериментально невозможно, т. к. для этого требуется длительный срок. Поэтому прочность изоляции в больших интервалах определяют по результатам измерения интенсивности процесса старения ( $R_{из}$ ,  $\text{tg } \delta$ , ЧР и т. п.).

В связи с изложенным можно говорить о прочности изоляции при атмосферных перенапряжениях, внутренних перенапряжениях и длительном воздействии напряжения.

### **3.6. Допустимые напряжения для внутренней изоляции**

Внутренняя изоляция должна выдерживать грозовые и внутренние перенапряжения. Эти перенапряжения не должны вызывать пробоя и сокращения сроков службы изоляции, т. е. не должны вы-

зывать местных повреждений и дефектов изоляции (ЧР, образования расслоений и газовых включений). Таким образом, кратковременная электрическая прочность не всегда определяется напряжением пробоя. Электрическая прочность может определяться напряжением возникновения ЧР определенной интенсивности. Поэтому при заводских испытаниях отсутствие пробоя не всегда означает, что испытание прошло успешно. Нужно также убедиться, что отсутствуют дефекты.

Испытательные напряжения выбираются из следующих соотношений

$$U_{\text{и исп}} < U_{\text{и доп}}; \quad U_{50 \text{ исп}} < U_{50 \text{ доп}}; \quad U_{\text{исп}} > U_{\text{пер}}, \quad (3.1)$$

где  $U_{\text{и доп}}$ ,  $U_{50 \text{ доп}}$  – соответственно допустимые импульсное напряжение и напряжение переменного тока частотой 50 Гц;

$U_{\text{и исп}}$ ,  $U_{50 \text{ исп}}$  – соответствующие испытательные напряжения;  
 $U_{\text{пер}}$  – уровень перенапряжений для испытываемой изоляции.

При этом результаты испытаний должны гарантировать надежность работы изоляции с вероятностью  $p$  0,99 и 0,999.

Для электрооборудования, выпускаемого большими партиями, значение  $U_{\text{доп}}$  определяется на основании опытных испытаний образцов

$$U_{\text{доп}} \leq \bar{U} - 3,14\sigma, \quad \text{при } p = 0,99;$$

$$U_{\text{доп}} \leq \bar{U} - 4,49\sigma, \quad \text{при } p = 0,999.$$

Для дорогостоящих конструкций значение допустимых напряжений  $U_{\text{и доп}}$  и  $U_{50 \text{ доп}}$  определяют на основании допустимых напряженностей электрического поля  $E_{\text{и доп}} \leq 400 \text{ кВ/см}$ ,  $E_{50 \text{ доп}} \leq 200 \text{ кВ/см}$ , откуда

$$U_{\text{и доп}} = \frac{d \cdot E_{\text{и доп}}}{k_{\text{н}}}, \quad U_{50 \text{ доп}} = \frac{d \cdot E_{50 \text{ доп}}}{k_{\text{н}}}, \quad (3.2)$$

где  $d$  – толщина изоляции;

$k_{\text{н}}$  – коэффициент неоднородности электрического поля.

### 3.7. Частичные разряды во внутренней изоляции

Частичными разрядами называются разрядные процессы, развивающиеся под действием приложенного напряжения на части изоляции. Наиболее интенсивный характер ЧР имеют в резко неоднородных полях на ослабленных участках изоляции – в газовых включениях. Такие участки возникают при технологических дефектах или механических повреждениях изоляции.

Для выяснения сущности ЧР воспользуемся схемой замещения изоляции (рис. 3.3, б).

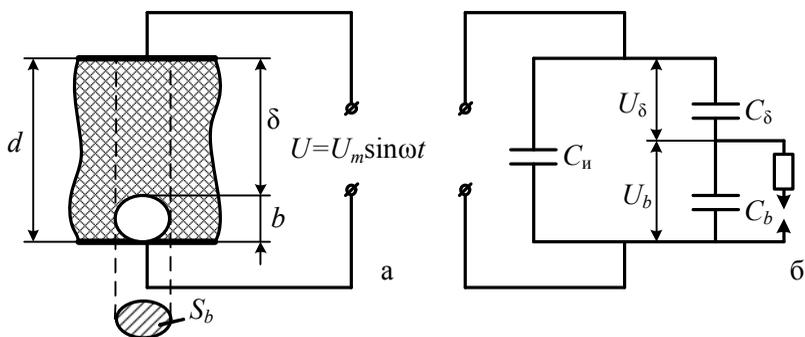


Рис. 3.3. Изоляция с повреждением (а) и ее схема замещения (б)

Частичные разряды в воздушном включении толщиной  $b$  (рис. 3.3, а) возникнут, если напряжение на промежутке  $U_b$  будет равным или большим некоторого критического значения  $U_{крb}$ , при котором возникают ЧР ( $U_b \geq U_{крb}$ ). Если к изоляции приложено внешнее синусоидальное напряжение  $U = U_m \sin \omega t$ , при котором возникают ЧР на промежутке  $b$ , то

$$U_b = U_m \frac{C_\delta}{C_\delta + C_b}. \quad (3.3)$$

Тогда напряжение, приложенное к изоляции, при котором возникают ЧР на промежутке  $b$  из последнего выражения будет

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{кр}b}}{\sqrt{2}} \frac{C_{\delta} + C_b}{C_{\delta}}. \quad (3.4)$$

Так как  $d \gg b$ , то  $\delta \approx d$  и для емкостей  $C_{\delta}$  и  $C_b$  можно записать

$$C_{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_b}{d} \quad \text{и} \quad C_b = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_b S_b}{b}, \quad (3.5)$$

а напряжение возникновения ЧР, приложенное к изоляции, будет

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{кр}b}}{\sqrt{2}} \frac{\varepsilon_b \cdot d}{\varepsilon \cdot b}, \quad (3.6)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_b$  – соответственно диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика и газового включения;

$S_b$  – максимальная площадь в поперечном сечении газового включения.

В случае неоднородного поля

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{кр}b}}{k_{\text{н}} \sqrt{2}} \frac{\varepsilon_b \cdot d}{\varepsilon \cdot b}. \quad (3.7)$$

Из последнего выражения следует, что увеличить значение разрядного напряжения  $U_{\text{ЧР}}$  можно путем увеличения  $\varepsilon_b$ , т. е. пропиткой или более плотной намоткой изоляции.

Разряд в воздухе наступает при минимальном напряжении  $U = 300 \text{ В}$ , следовательно

$$U_{\text{ЧР}} = 0,2 \frac{\varepsilon_b \cdot d}{\varepsilon \cdot b \cdot k_{\text{н}}}, \text{ кВ}. \quad (3.8)$$

При воздействии синусоидального напряжения (рис. 3.4) ЧР могут возникать многократно в течение полупериода, если напряжение на газовом включении  $U_b > U_{\text{кр}b}$ , и погасать, если  $U_b < U_{\text{пог}b}$ , где  $U_{\text{пог}b}$  – напряжение погасания частичного разряда.

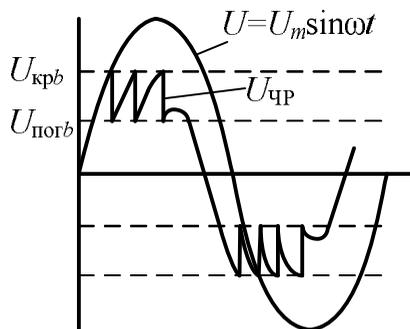


Рис. 3.4. Изменение напряжения на газовом включении при ЧР

Если значения  $U_{прб}$  и  $U_{порб}$  не зависят от полярности, то число ЧР в единицу времени будет

$$n_f = 4f \frac{U - \eta U_{чр}}{U_{чр}(1 - \eta)}, \quad (3.9)$$

где  $U$  – действующее на изоляцию напряжения;

$$\eta = U_{порб}/U_{прб} = 0,5-0,8.$$

При наличии в изоляции нескольких газовых включений

$$n_f = 4f \sum \frac{U - \eta U_{чр}}{U_{чр}(1 - \eta)}. \quad (3.10)$$

Выделяющаяся в канале энергия  $W_{чр}$  идет на разрушение изоляции

$$W_{чр} = C_{эк} \left( \frac{U_{крб}^2 - U_{порб}^2}{2} \right). \quad (3.11)$$

При оценке интенсивности ЧР пользуются величиной кажущегося заряда  $q_x$  – единичного частичного разряда, который связан с

нейтрализуемся при каждом частичном разряде зарядом, приводящим к уменьшению напряжения на электродах на величину  $\Delta U_x$ :

$$q_x = \Delta U_x C_x, \quad (3.12)$$

где  $C_x$  – емкость всего диэлектрика.

Также для оценки интенсивности пользуются величиной среднего тока ЧР  $I = n \cdot q_x$ , где  $n$  – число разрядов в секунду.

Разрушение изоляции имеет место, если  $q_x = 10^{-9} - 10^{-6}$  Кл. Начальные ЧР возникают при  $q_x = 10^{-14} - 10^{-11}$  Кл для *бумажно-масляной изоляции* (БМИ) и  $q_x = 10^{-12}$  Кл для *маслобарьерной* (МБИ). Эти разряды возникают в местах с сильно неоднородным полем и, хотя не вызывают разрушения изоляции, но увеличивают  $\text{tg}\delta$  и количество растворенных газов, особенно в МБИ и БМИ, что в конечном итоге может привести к тепловому пробою. При  $q_x = 10^{-7} - 10^{-9}$  Кл ЧР могут привести к пробою и считаются критическими. Такие ЧР недопустимы.

В сплошных изоляционных конструкциях (МБИ и БМИ) ЧР могут возникать вдоль поверхности твердой изоляции. В этом случае на поверхности могут возникать проводящие ветвистые каналы (дендриты), длина которых при перенапряжениях может увеличиться, что в конечном итоге приведет к пробою или перекрытию изоляции по поверхности. Эти процессы наиболее интенсивно развиваются в неоднородном электрическом поле и в том случае, если барьеры расположены не перпендикулярно силовым линиям электрического поля. Такие разряды могут возникать и в щелях между твердой изоляцией.

### **3.8. Факторы, влияющие на электрическую прочность внутренней изоляции**

**1. Толщина изоляции.** Зависимость  $U_{\text{пр}} = f(d)$  имеет нелинейный характер (рис. 3.5). Снижение темпов роста электрической прочности объясняется ростом неоднородности поля при увеличении толщины и влиянием примесей.

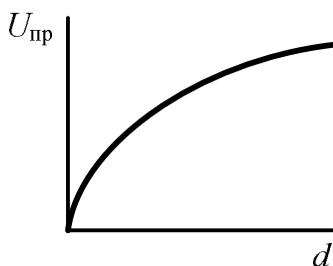


Рис. 3.5. Электрическая прочность в зависимости от толщины

**2. Форма (поверхность) электрода.** С увеличением площади электрода  $U_{\text{пр}}$  уменьшается. Это объясняется неоднородностью изоляции и влиянием примесей. Изоляция будет повреждаться в более слабом месте. Также на электрическую прочность может влиять неоднородность поля.

Для увеличения электрической прочности производят сушку и пропитку изоляции под вакуумом. На величину  $U_{\text{пр}}$  оказывает влияние качество процесса намотки и опрессовки.

### 3.9. Маслбарьерная изоляция

Основу МБИ составляет трансформаторное масло и твердые изолирующие материалы: картон, бумага, слоистые пластики толщиной 2–3 мм. Масло в МБИ играет роль изолирующей и охлаждающей среды. Проникая в поры твердой изоляции и полости конструкции, масло вытесняет газы и тем самым повышает электрическую прочность.

Барьеры препятствуют перемещению твердых, волокнистых примесей и капелек влаги в области высоких напряженностей электрического поля, а также выравнивают напряженность электрического поля и тем самым увеличивают напряжение пробоя  $U_{\text{пр}}$  в 2–2,5 раза. При этом наибольший эффект наблюдается, если барьер располагается перпендикулярно силовым линиям электрического поля. В резконеоднородных полях достигается увеличение прочности за счет барьеров на 30–50 %. При импульсных напряжениях в однородных и слабонеоднородных полях применение барьеров менее эффективно.

При импульсных напряжениях в МБИ возможны ЧР с зарядом  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  Кл. Такие разряды интенсивно разлагают масло и целлюлозу барьера и оставляют на поверхности твердой изоляции обугленные каналы, что увеличивает вероятность развития разрядов по поверхности и снижает электрическую прочность. Поэтому пробивные напряжения определяются по прочности одного масляного канала.

МБИ применяется в трансформаторах, реакторах и в другой электрической аппаратуре с большим объемом масла. Технология изготовления МБИ включает сборку конструкции, сушку под вакуумом с  $t_c = 100$ – $120$  °С и заполнение под вакуумом дегазированным маслом.

Достоинства МБИ: простая технология изготовления, интенсивное охлаждение, возможность восстановления качества изоляции в эксплуатации путем сушки конструкции и замены масла.

Недостатки: невысокая электрическая прочность по сравнению с другими видами изоляции, например, БМИ, пожаро- и взрывоопасность, необходимость специальной защиты конструкции от увлажнения в процессе эксплуатации.

### 3.10. Бумажно-масляная изоляции

Основой БМИ является тонкая электротехническая бумага толщиной 80–170 мк, различные масла и другие жидкие диэлектрики с добавкой некоторых компонентов. Слои бумаги наматываются на изолируемые проводники с перекрытием или с зазором, вручную или на специальных станках. Используется листовая (3 м шириной) или рулонная (шириной 20–40 мм) бумага. При плотной намотке зазоры между слоями составляют менее 0,01 мм. Однако зазоры и микропоры могут составлять до 50 % общего объема изоляции. Поэтому непропитанная бумажная изоляция обладает низкой электрической прочностью. В последнее время применяют сочетание бумаги и синтетической пленки.

Основные показатели БМИ: электрическая прочность  $E = 100$ – $250$  кВ/см (что выше, чем отдельно бумага и масло),  $\text{tg}\delta = 0,003$ – $0,005$ , рабочая температура  $t_{\text{раб}}$  до 90 °С.

Электрическая прочность БМИ зависит от толщины слоя изоляции и плотности бумаги, однако с увеличением плотности увеличивается  $\epsilon$ , что приводит к увеличению напряженности поля в масле,

снижению прочности, уменьшению срока службы при длительном воздействии напряжения за счет ЧР и ухудшения теплоотвода. Поэтому максимальная электрическая прочность наблюдается при 6–10 слоях бумаги. Рост давления незначительно увеличивает напряжение пробоя  $U_{пр}$ .

Кратковременная прочность вдоль слоев в 2–3 раза ниже электрической прочности БМИ в нормальном направлении. Критические ЧР  $q_x = 10^{-7} - 10^{-8}$  Кл могут привести к тепловыделению и разрушению изоляции вдоль слоев в глубину, появляются следы ветвистых разрядов, что приводит к уменьшению электрической прочности.

Технология производства БМИ включает следующие операции: намотку, сушку под вакуумом для удаления влаги и газов, пропитку дегазированным маслом. Область применения БМИ: изоляция проводов, кабелей, конденсаторов, высоковольтных выводов. Недостатки БМИ: узкий диапазон рабочих температур, пожароопасность, затруднения при выполнении изоляции проводников сложной формы, необходимость защиты от воздействия влаги.

### 3.11. Изоляция силовых трансформаторов

**Структура изоляции.** Изоляция трансформаторов подразделяется на внешнюю и внутреннюю. Внешняя изоляция состоит из воздушных промежутков между вводами и заземленным баком, между выводами различных напряжений, а также вдоль фарфоровых покрывок вводов. Выбор воздушных промежутков внешней изоляции производится аналогично выбору соответствующей изоляции любого другого подстанционного оборудования.

К внутренней изоляции относят изоляцию обмоток, внутреннюю изоляцию вводов, отводов и переключающего устройства. Внутренняя изоляция подразделяется на главную и продольную. К главной изоляции относят изоляцию между обмотками и магнитопроводом, между обмотками и баком, а также изоляцию обмоток разных напряжений и фаз между собой (междуфазовая изоляция). К продольной изоляции относят витковую изоляцию между катушками и слоями обмотки одной фазы.

**Главная изоляция.** Главная изоляция трансформаторов выполняется в виде МБИ и состоит из чередующихся слоев твердой изо-

ляции (барьеров) из электротехнического картона и масляных каналов (трансформаторное масло) (рис. 3.6). Барьеры изготавливаются в виде цилиндров и шайб. Они препятствуют перемещению примесей в область сильных полей и увеличивают прочность изоляции на 20–30 %. Наибольший эффект увеличения прочности имеет место, если барьер располагается перпендикулярно силовым линиям поля. Благодаря ему отсутствует тангенциальная составляющая напряженности поля. Толщина барьеров 3–6 мм. Количество барьеров определяется классом напряжения и принимается равным 1 при  $U \leq 35$  кВ и 2–6 при  $U \geq 110$  кВ. Между барьерами устанавливаются дистанцирующие прокладки из бакелита.

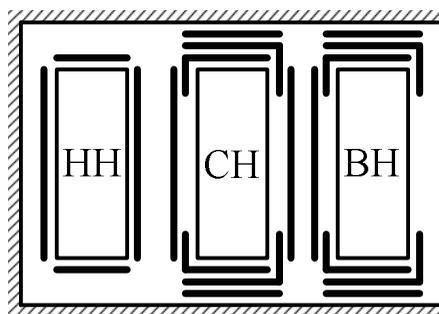


Рис. 3.6. Схема изоляции трансформатора

Для трансформаторов до 35 кВ расстояние между обмоткой низшего напряжения (НН) и стержнем магнитопровода принимается равным 20 мм, между обмоткой НН и высшего напряжения (ВН) – 15–27 мм. Расстояния между обмоткой и верхним ярмом – 90 мм, между обмоткой и нижним ярмом – 70 мм.

В трансформаторах на 110 кВ и выше между ярмом и обмоткой устанавливаются угловые шайбы. Это требуется для усиления изоляции у краев обмотки, т. к. поле там резконеоднородное. Напряженность поля у торца обмотки ВН в 3–4 раза превышает напряженность поля в средней цилиндрической части. Первые катушки с торцов обмотки также имеют усиленную изоляцию и меньшие размеры. Для снижения неоднородности электрического поля в торце обмотки устанавливается емкостное кольцо. При напряжении 220 кВ и выше применяют обмотки с выводом высокого напряжения от сред-

ней точки (рис. 3.7). Два конца обмотки соединяются вместе и с другими обмотками и образуют нейтраль трансформатора. Выполнение изоляции у торцов облегчается. В зоне высоковольтного ввода поле также становится более равномерным, что упрощает решение проблемы изоляции высоковольтных частей.

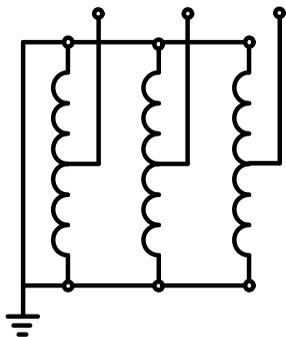


Рис. 3.7. Выводы от средней точки обмотки

Для работы во взрывоопасных помещениях могут применяться специальные трансформаторы с воздушной или элегазовой изоляцией.

Расчет главной изоляции производят в два этапа. Первый – оценочный, когда производится выбор основных размеров, число барьеров и размер каналов. На втором этапе производят уточненный расчет напряженности электрического поля в первом масляном канале при всех видах испытательных напряжений  $U_{\text{исп}}$  или  $U_{50 \text{ исп}}$  длительностью приложения 1 мин. Для первого масляного канала принимают  $E_{\text{МК доп}} = 0,85 E_{\text{МК пр min}}$ , где  $E_{\text{МК доп}}$  и  $E_{\text{МК пр min}}$  – допустимая и пробивная напряженности электрического поля первого масляного канала.

$$E_{\text{доп}}/E_{\text{б}} = \varepsilon_{\text{б}}/\varepsilon_{\text{МК}}; \quad E_{\text{МК}}/E_{\text{б}} = 1,8, \quad (3.13)$$

где  $E_{\text{б}}$  и  $E_{\text{МК}}$  – напряженности в барьере и масляном канале;

$\varepsilon_{\text{б}}$  и  $\varepsilon_{\text{МК}}$  – соответствующие диэлектрические проницаемости.

Расчет главной изоляции выполняется отдельно для зон середины и краев обмотки. В зоне середины обмотки ширина главного канала между обмотками

$$b_{\text{МК}} = \frac{U_{\text{рас}} \cdot K}{E_{\text{МК доп}}}, \quad (3.14)$$

где  $K = 1,1-1,2$  – коэффициент, учитывающий увеличение напряженности электрического поля за счет барьера и цилиндричности конструкции.

$U_{\text{рас}}$  – расчетное напряжение (в кВ).

Число барьеров

$$n = \frac{U_{\text{рас}}}{100} \quad (3.15)$$

Суммарная толщина барьеров

$$b_{\Sigma \bar{b}} = (0,2-0,25)b_{\text{МК глав}}, \quad (3.16)$$

где  $b_{\text{МК глав}}$  – ширина главного масляного канала.

Обычно толщина барьера  $b_{\bar{b}} = 3$  мм.

Количество угловых шайб принимают вдвое меньшим, чем количество цилиндрических барьеров.

Расчет главной изоляции в зоне краев обмотки ведут исходя из картины электрического поля при расчетном напряжении. Расстояние между обмоткой и ярмом выбирают в 1,5–2 раза больше, чем между обмотками. В случае, когда расчетная напряженность  $E_{\text{МК рас}} > E_{\text{МК доп}}$ , увеличивают расстояние до ярма или применяют методы выравнивания поля (экранирование). Значение  $E_{\text{МК доп}}$  определяют на модели.

Для ряда конструкций трансформаторов в силу несовершенства системы защиты от воздействия окружающей среды рабочие напряженности можно уменьшить в два раза:  $E_{\text{МК доп раб}} = 4,5$  кВ/мм – для середины обмотки;  $E_{\text{МК доп раб}} = 4,0$  кВ/мм – для краев обмотки.

**Продольная изоляция.** Продольная изоляция включает витковую изоляцию обмоточных проводов и изоляцию между катушками. Витковая изоляция проводов выполняется из слоев кабельной

бумаги, накладывается на провод внахлест. Изоляция между катушками состоит из масляного канала шириной 8–30 мм и бумажной изоляции проводов. При необходимости применяют дополнительную подмотку бумагой всей катушки.

Требования к электрической прочности продольной изоляции определяется спецификой переходных процессов при воздействии импульсных перенапряжений. Обмотка трансформатора представляет собой линию с распределенными параметрами (рис. 3.8). Поэтому распределение напряжения по обмотке при импульсных перенапряжениях нелинейно. Кроме того, распределение напряжения по обмотке зависит от режима работы нейтрали. При заземленной нейтрали трансформатора наибольшее напряжение при импульсном воздействии имеет место на расстоянии  $1/3$  длины обмотки от начала и может на 15–20 % превышать воздействующее напряжение. При изолированной нейтрали наибольшее импульсное напряжение возникает на конце обмотки и может превышать воздействующее напряжение на 50–80 %.

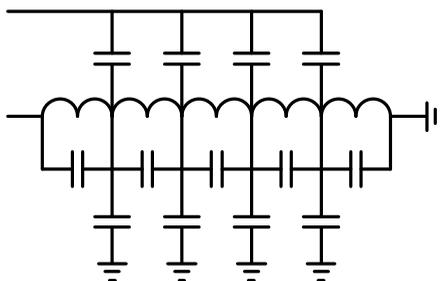


Рис. 3.8. Схема замещения обмотки трансформатора

Для выравнивания распределения напряжения по обмотке и электрического поля у краев обмотки при импульсном перенапряжении у катушек входной зоны ставят емкостное кольцо, увеличивающее емкость между катушками входной зоны обмотки. Емкостное кольцо должно быть разрезано. В трансформаторах 500 кВ и выше обмотка выполняется переплетенной (рис. 3.9). Выводы обмотки ВН выполняют из середины обмотки.

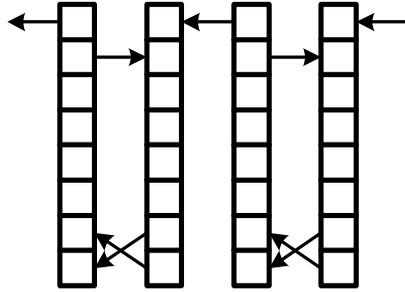


Рис. 3.9. Схема переплетенной обмотки

Для расчета продольной изоляции исходной величиной является напряжение между катушками  $\Delta U_k$  и между витками при импульсном напряжении. Напряженность в масле в аксиальном направлении будет

$$E_{\text{МК}} = \frac{\Delta U_k}{b_k + d_{\text{из}} \frac{\epsilon_{\text{МК}}}{\epsilon_6}}, \quad (3.17)$$

где  $b_k$  – ширина масляного канала между катушками (8–20 мм);  
 $d_{\text{из}}$  – толщина твердой изоляции.

Полученное значение сравнивают с  $E_{\text{МК доп}}$ . Необходимая витковая изоляция определяется по зависимости  $E_{\text{пр}} = f(d)$  для импульса  $\tau = 3\text{--}20$  мкс.

**Изоляция выводов.** Для выводов трансформатора характерно неравномерное распределение электрического поля в радиальном и аксиальном направлениях, что может вызвать возникновение местных разрядов в виде короны, а затем скользящих разрядов, приводящих к радиальному пробою и продольным перекрытиям.

Для создания равномерного распределения радиального и аксиального напряжения используют изоляторы конденсаторного типа, в которых принудительное распределение напряжения достигается за счет металлических обкладок, закладываемых в изоляцию в процессе намотки.

На токоведущий стержень наматывается кабельная бумага в виде рулонов или лент. Между слоями бумаги закладываются металлические прокладки из алюминиевой фольги. Бумага высушивается под вакуумом и пропитывается трансформаторным маслом. Остов из токоведущего стержня и намотанной изоляции помещается в фарфоровую покрывку и заливается трансформаторным маслом. Иногда в качестве токоведущего стержня используют высоковольтный кабель.

Для того, чтобы напряжение распределялось по изоляции ввода равномерно, необходимо равенство отдельных емкостей, образующих многослойный конденсатор (рис. 3.10):  $C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_N$ . Емкость  $C_i$  рассчитывается по следующей формуле:

$$C_i = \frac{\varepsilon \cdot 2\pi r_i l_i}{\Delta r_i}. \quad (3.18)$$

Из (3.18) следует, что при одинаковой толщине между обкладками  $\Delta r_i$  равенство емкостей достигается при  $r_i l_i = \text{const}$ . Поэтому ширина алюминиевой фольги  $l_i$ , образующей обкладку, уменьшается по мере удаления от токоведущего стержня (рис. 3.10).

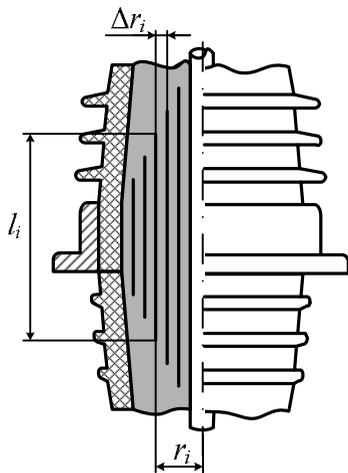


Рис. 3.10. Ввод конденсаторного типа

Продольные размеры фарфоровых покрышек  $H_b$  выбираются на основе зависимости разрядного напряжения от разрядного расстояния по воздуху с коэффициентом запаса 1,1–1,65. Длина фарфоровой покрышки в нижней части ввода  $H_n$ .

$$E_{\text{акс}} = 3\text{--}3,5 \text{ кВ/мм}.$$

$$E_{\text{рад}} = 12(\Delta r)^{-0,58},$$

где  $\Delta r$  – толщина слоя, мм.

Основными факторами, вызывающими старение МБИ, являются:

- 1) воздействие электрического поля и ЧР;
- 2) увлажнение изоляции за счет проникновения влаги из атмосферы и в результате разложения трансформаторного масла и целлюлозных материалов;
- 3) окислительные процессы под воздействием повышенной температуры и растворимого в масле кислорода.

В результате всех этих процессов выделяются газы  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_2$ .

### 3.12. Испытания трансформаторов

При выпуске трансформаторы подвергаются всем видам испытаний. Внешняя и внутренняя изоляция испытывается полными и срезанными стандартными импульсами и переменным напряжением промышленной частоты.

При импульсных испытаниях наибольшую трудность представляет обнаружение дефектов продольной изоляции (проколов и пробоев между витками). Для обнаружения этих дефектов используют осциллографирование тока в нейтрали трансформатора. Полученные осциллограммы сравнивают с типовыми для исправных трансформаторов данного типа. По виду осциллограммы удается установить не только наличие замыканий между витками и катушками, но и определить место повреждения.

Если линейные выводы и нейтраль трансформатора имеют изоляцию одинакового уровня, то внутренняя изоляция испытывается напряжением промышленной частоты от постороннего источника, при этом оба конца обмотки изолируются от земли и вся обмотка

находится под одним и тем же напряжением. Если нейтраль трансформатора имеет сниженный уровень изоляции, то испытания проводят напряжением повышенной частоты (не выше 400 Гц). При этом на первичную обмотку подают такое напряжение, чтобы на испытываемой обмотке напряжение было равно испытательному, а нейтраль заземляется. Повышенная частота выбирается с таким расчетом, чтобы индукция в сердечнике не превышала величину, равную номинальному значению при частоте 50 Гц.

Кроме испытаний повышенным напряжением измеряют  $\text{tg}\delta$ ,  $R_{\text{из}}$ ,  $C_{\text{из}}$  и интенсивность ЧР. Трансформаторы большой мощности на 110 кВ и выше транспортируются без масла. Поэтому после монтажа подвергаются следующим испытаниям:

1) определяется электрическая прочность заливаемого масла в стандартном разряднике на частоте 50 Гц ( $U_{\text{пр}} = 15 \text{ кВ}$  для  $U_{\text{н}} \leq 15 \text{ кВ}$  и  $U_{\text{пр}} = 50 \text{ кВ}$  для  $U_{\text{н}} \leq 330 \text{ кВ}$ );

2) измеряется  $R_{\text{из}15}$ ,  $R_{\text{из}60}$  и  $K_{\text{аб}} \leq 1,3$ ;

3) измеряются емкости  $C_2$  и  $C_{50}$ ,  $K = C_2/C_{50} \leq 1,1-1,3$ ;

4) измеряются  $\text{tg}\delta$  при различных температурах.  $\text{tg}\delta$  могут измерять для отдельных элементов и зон.

Эксплуатационные испытания проводятся в том же объеме, как и при первом включении, но с напряжением  $U_{\text{ис}} = (0,8-0,9)U_{\text{ис.з}}$ , где  $U_{\text{ис.з}}$  – величина заводского испытательного напряжения. Так как во время эксплуатации имеет место увлажнение изоляции, то допускается несколько большее значение  $\text{tg}\delta$ .

В последнее время широко внедряется контроль состояния изоляции по интенсивности ЧР и результатам хроматографического анализа газов.

В соответствии с правилами технической эксплуатации (ПТЭ) необходимо соблюдать тепловой режим, нормы качества масла, состояние системы охлаждения, устройства РПН. Допустимая температура масла в верхних слоях: +95 °С для трансформаторов с естественным масляным охлаждением; +80 °С – с масловоздушным охлаждением; +70 °С – с масловодяным.

Не допускается превышение напряжения более чем на 5 %, т. к. это приводит к увеличению индукции и появлению высших гармоник.

### 3.13. Изоляция кабелей. Общие сведения и классификация

*Электрическими кабелями* называют изолированные проводники, снабженные защитными оболочками, предохраняющими изоляцию кабеля и токоведущие проводники от механических повреждений и внешних воздействий. Кабельные линии значительно дороже воздушных, но из-за ряда преимуществ в настоящее время сооружаются на напряжение до 750 кВ.

Главными преимуществами кабельных линий являются:

- 1) более безопасные условия обслуживания;
- 2) возможность прокладки кабелей в земле, по стенам зданий и сооружений;
- 3) кабельные линии не подвержены атмосферным воздействиям, если не связаны с воздушными линиями;
- 4) возможность передачи больших мощностей к потребителям в районы интенсивной застройки, где сооружение воздушных линий экономически невыгодно или невозможно.

К изоляционным защитным и проводниковым материалам кабеля предъявляются высокие требования. Они должны обладать высокой механической прочностью, чтобы обеспечить многократный изгиб при намотке на барабан и прокладке, обладать достаточной долговечностью, так как при повреждении кабельных линий, особенно проложенных в земле, затрачиваются значительное время и средства на отыскание и исправление повреждений. Изоляционные материалы должны обладать высокой электрической прочностью, чтобы уменьшить толщину изоляции и защитных оболочек, а, следовательно, улучшить условия теплоотдачи от токоведущих жил, увеличить допустимый ток, а также обеспечить большую гибкость кабеля. В последнее время большое внимание уделяется разработке пожаробезопасной, самозатухающей и экологически чистой изоляции.

Для изоляции кабелей используются различные эластичные материалы: резина, бумага, синтетические пленки, поливинилхлоридный пластикат (ПВХ), термопластичный и сшитый полиэтилен (СПЭ), а также бумажно-масляная изоляция (БМИ). В кабелях напряжением 110 кВ и выше также используют масляную и газовую изоляцию.

В качестве проводниковых материалов используется медь и алюминий. Проводимость меди в 1,65 раз больше проводимости алю-

миния, однако алюминий имеет в 3,3 раза меньшую плотность, поэтому алюминиевые проводники при том же сопротивлении весят в два раза меньше, несмотря на большие сечения. Кроме того, медь является дефицитным материалом и поэтому применяется только для кабелей ответственных установок.

Токоведущие жилы выполняются как сплошными, так и витыми из тонких проволок. Для уменьшения диаметра кабеля при больших сечениях они имеют секторную форму, а многопроволочные жилы опрессовываются. Жилы маслонаполненных и газонаполненных кабелей на 110–750 кВ выполняются в виде полых цилиндров.

Герметизирующая оболочка, защищающая изоляцию от увлажнения и повреждения, изготавливается из алюминия или свинца. Алюминиевая оболочка по сравнению со свинцовой обладает большей прочностью, повышенной стойкостью к вибрации, легче и может использоваться в качестве нулевого проводника. Кабели с алюминиевой оболочкой нельзя применять в условиях воздействия агрессивных сред (растворы и пары щелочей). При больших диаметрах кабеля сплошные оболочки обладают чрезвычайной жесткостью. В этих случаях их выполняют гофрированными.

От механических повреждений кабели защищаются оболочкой из стальных лент или проволоки (броня). Если кабель предназначен для прокладки в земле, то поверх брони накладывается оболочка из джутовой оплетки или пластмассы, защищающей броню от коррозии. В кабелях 110–750 кВ для увеличения механической прочности предусмотрена дополнительная оболочка из стальной проволоки.

Кроме перечисленных выше элементов в кабелях на высокие напряжения предусматривают экраны из полупроводящей бумаги, пленки или металлические фольги для улучшения электрических характеристик, а также дополнительные водонепроницаемые оболочки и слой (подушка) под броню и другие элементы.

Кабельная продукция классифицируется по различным признакам: назначению, количеству жил, рабочему напряжению, изоляции роду тока и т. п.

Классификация кабелей по напряжению приведена на (рис. 3.11). Основными каталожными параметрами кабелей являются: номинальное напряжение, номинальный (допустимый) ток, диапазон допустимых (рабочих) температур, допустимая температура воздуха при прокладке.

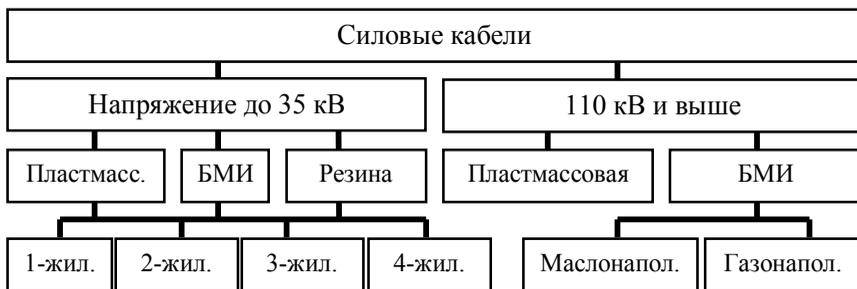


Рис. 3.11. Классификация кабелей

В процессе заводских и профилактических испытаний кабели нормируются следующими параметрами:  $R_{из}$ ,  $I_{ут}$ ,  $tg\delta$ ,  $\Delta tg\delta = f(U)$ .

### 3.14. Кабели с пластмассовой изоляцией (до 35 кВ)

Интенсивное применение пластмассовой изоляции в кабельном производстве стало возможным благодаря снижению стоимости пластмасс, а также разработке прогрессивной технологии нанесения пластмассы на проводник. В настоящее время производство кабелей с пластмассовой изоляцией (ПМИ) составляет в отдельных странах 100 %.

Преимущества кабелей с ПМИ заключаются в следующем:

- 1) простая технология изготовления методом экструзии, при которой исключается необходимость сушки и пропитки изоляции;
- 2) большая пропускная способность за счет увеличения допустимой температуры жилы (на 15–30 % больше чем у кабелей с БМИ);
- 3) высокая термическая стойкость при коротком замыкании;
- 4) хорошие электрические характеристики изоляции (высокая пробивная напряженность  $E_{пр}$ , низкий  $tg\delta$ );
- 5) меньшая масса и габариты кабеля по сравнению с кабелями с БМИ, что облегчает прокладку кабеля как на сооружениях, так и в земле на сложных трассах, меньший радиус изгиба;
- 6) высокая влагостойкость, что исключает необходимость применения металлических оболочек;
- 7) возможность прокладки с любым углом наклона;

8) возможность прокладки при температурах до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  без предварительного подогрева;

9) низкая удельная повреждаемость (на 1–2 порядка ниже, чем у кабелей с БМИ);

10) при однофазной конструкции возможно изготавливать кабели с жилами до  $800\text{ мм}^2$  и большой строительной длиной;

11) более высокая экологическая безопасность за счет отсутствия в конструкции масла, битума и свинца.

В качестве изоляционных пластмасс применяют поливинилхлоридный пластикат (ПВХ), термопластичный полиэтилен, сшитый полиэтилен (СПЭ).

Полиэтилен применяется на напряжения 10 кВ выше, так как может быть получен в более чистом виде и обладает высокой электрической прочностью, малым значением  $\text{tg}\delta$ , хорошей водостойкостью и гибкостью, повышенной радиационной стойкостью и нагревостойкостью.

Сравнительная характеристика силовых кабелей с изоляцией из СПЭ и БМИ на напряжение 6–35 кВ приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сравнительная характеристика кабелей с БМИ  
и изоляцией из СПЭ

Материал изоляции	СПЭ	БМИ
Допустимая температура нагрева $t_{\text{раб доп}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	90	60
Допустимая температура в аварийном режиме (6 ч) $t_{\text{доп пер}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	130	80
Предельно допустимая температура при КЗ $t_{\text{КЗ доп}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	250	200
Длительная токовая нагрузка в зависи- мости от сечения жилы	120–130	100
Относительная диэлектрическая прони- цаемость при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,3	4,0

Материал изоляции	СПЭ	БМИ
Удельное объемное сопротивление при температуре +20 °С	$10^{16}$	$10^{13}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при +20 °С	0,001	0,008
Минимально допустимая температура прокладки без подогрева, °С	от -15 до 20	0
Минимальный радиус изгиба ( $D_n$ – наружный диаметр кабеля)	$(7,5-15) D_n$	$(15-25) D_n$
Разница уровней по трассе, м	не огр.	15

Основные эксплуатационные характеристики для кабелей с ПМИ приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

#### Эксплуатационные характеристики кабелей с ПМИ

Материал	$t_{\text{раб доп}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{доп пер}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{КЗ доп}}, ^\circ\text{C}$
Поливинилхлоридный пластикат	70	80	160
Термопластичный полиэтилен	70	80	130
Сшитый полиэтилен	90	130	250

### 3.15. Провода и кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ

Провода установочные применяются для электрических установок при стационарной прокладке в осветительных и силовых сетях, а также для монтажа электрооборудования машин, механизмов и станков на номинальное напряжение до 450 В частотой до 400 Гц и на постоянные напряжения до 1000 В.

Токоведущие жилы  $l$  такого кабеля однопроволочные (рис. 3.12, *а*) или многопроволочные (рис. 3.12, *б, в*) из алюминия (провода АПВ) или меди (ПВ). Изоляция проводов 2 (рис. 3.12) выполнена из ПВХ пластиката. Толщина изоляции составляет от 0,6 мм при диаметре

жилы 0,5–1 мм и до 2,6 мм при диаметре 400 мм. Такая изоляция не поддерживает горение и является стойкой к воздействию влаги, плесневых грибов, механических ударов, вибрации.

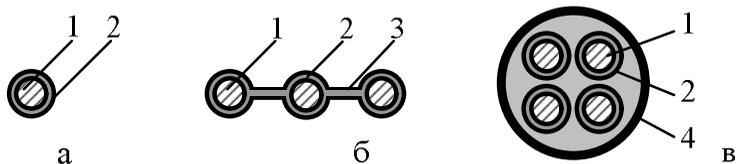


Рис. 3.12. Конструкция проводов с пластмассовой изоляцией

Для стационарной прокладки осветительной сети применяют провода с параллельно расположенными жилами (рис. 3.12, б). У них изоляция из ПВХ пластиката между проводами имеет разделительную ленточную полосу 3 шириной 1 мм и толщиной 0,5 мм.

Многожильные провода круглой формы (рис. 3.12, в) могут иметь три и более жилы. Изоляция 2 каждой жилы выполняется из ПВХ пластиката различной расцветки. Нулевая жила при наличии окрашивается в голубой цвет. Защитная оболочка 4 накладывается на скрученные жилы без заполнения или с заполнением промежутка между ними, придавая проводу круглую форму. Если количество жил пять и более, допускается их скручивание вокруг сердечника.

Кабели на напряжение до 1 кВ на большие токи (рис. 3.13, а) имеют токоведущие жилы 1 секторной формы, фазную изоляцию 2 и защитную оболочку 3, выполненные из ПВХ пластиката. Толщина изоляции в зависимости от сечения составляет 1,2–1,7 мм. Кабели с повышенной огнестойкостью на напряжения до 1 кВ (рис. 3.13, б) выполняются двух-, трех- и четырехжильными с максимальным сечением  $3 \times 240 + 120 \text{ мм}^2$ . Изоляция жил 2 выполняется из СПЭ, подушка 3 – из мягких материалов. Пластмассовая защитная оболочка 4 и подушка 3 не содержат галогенных полимеров и серы. Поэтому при возгорании такая изоляция не выделяет токсичных газов и характеризуется низкой плотностью дыма. Ее огнестойкость может быть повышена за счет полимерных композиций, которые после сгорания образуют шлак с высокими электрическими характеристиками ( $t_{\text{доп}} = 750\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 60 мин) или за счет слюдосодержащих лент (барьеров).

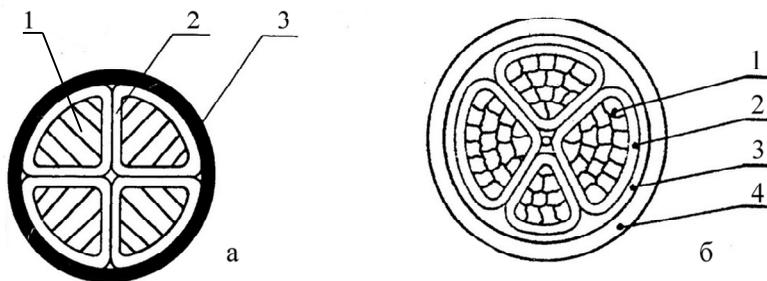


Рис. 3.13. Кабели с пластмассовой изоляцией до 1 кВ

Многожильные кабели, предназначенные для пожароопасных и взрывоопасных помещений, имеют следующую конструкцию:

1) токоведущая жила, медная или алюминиевая, однопроволочная или многопроволочная;

2) изоляция жилы из сшитого полиэтилена. Изоляция жил имеет отличительную расцветку, которая может быть сплошной или иметь вид продольной полосы шириной 1 мм. Изоляция нулевой жилы голубого цвета, жилы заземления – комбинация зеленого и желтого;

3) изолированные жилы скручиваются в сердечник вокруг жгута из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности;

4) поясная изоляция из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности накладывается поверх скрученных жил с заполнением промежутков между ними;

5) оболочка накладывается поверх поясной изоляции из стеклоленты или слюдосодержащей ленты с перекрытием;

6) защитный покров из двух оцинкованных стальных лент (двухслойный) и защитного шланга из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности.

### 3.16. Кабели с пластмассовой изоляцией на напряжения 6–500 кВ

Кабели на напряжения 6 кВ и выше преимущественно изготавливаются однофазными. Область применения трехфазных кабелей ограничена напряжениями 6–35 кВ.

Токоведущие жилы кабеля выполняются однопроволочными или многопроволочными опресованными из алюминия или меди сече-

нием 35–500 мм<sup>2</sup>. Многопроволочные жилы используются при больших сечениях. В трехфазных кабелях для уменьшения диаметра кабеля жилы имеют секторную форму. Сегментированные жилы используют в одножильных кабелях 220–500 кВ при больших сечениях для уменьшения поверхностного эффекта.

Основная изоляция жил выполняется из ПВХ пластиката на напряжение 6 кВ и СПЭ – 10 кВ и выше. Конструкция одножильного кабеля напряжением 10–500 кВ (рис. 3.14) имеет многослойную структуру, состоящую из 9–11 слоев в зависимости от назначения и способа прокладки.

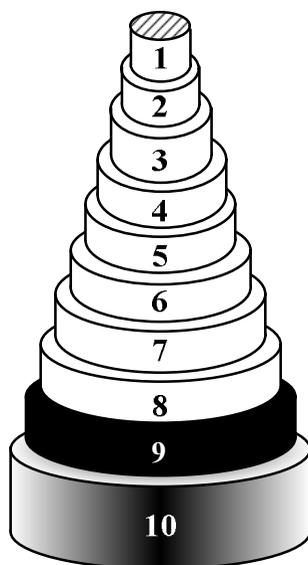


Рис. 3.14. Конструкция одножильного кабеля с пластмассовой изоляцией

Назначение и материал слоев кабеля: 1 – токоведущая жила; 2 – полупроводящий слой из полимерной сшитой композиции толщиной 0,6–1,5 мм, исключая осевую составляющую электрического поля и создающий радиальное электрическое поле. Кроме того, полупроводящий слой обеспечивает перемещение жилы относительно изоляции при изгибе, увеличивая тем самым механическую прочность кабеля; 3 – изоляция из СПЭ (ПВХ на 6 кВ), создает герметичную и электрически прочную изоляцию; 4 – полупроводящий

слой из полимерной сшитой композиции толщиной 0,5–1,5 мм создает радиальное поле. Полупроводящие слои и изоляция наносятся методом тройной экструзии; 5 – разделительный слой толщиной приблизительно 0,2 мм из электропроводящих бумажных или полимерных лент исключает оплавление изоляции при протекании тока КЗ по экрану 6, обеспечивает герметизацию изоляции; 6 – комбинированный экран защищает изоляцию и внешние оболочки 7–10 от воздействия тока КЗ, экранирует внешние конструкции от электромагнитного поля тока жилы, улучшает однородность электрического поля. Экран выполняется из повива медной проволоки диаметром 0,7–2,0 мм, поверх которой наложена медная лента толщиной 0,1 мм и шириной 20 мм для скрепления отдельных проволок и выравнивания потенциала по ним; 7 – разделительный слой из стеклоленты толщиной 0,2 мм защищает от оплавления при протекании тока КЗ по экрану оболочку 8–9, а также экран 6 от проникновения влаги при повреждении внешней оболочки; 8 – водоблокирующий слой из алюмополимерной ленты или стеклоленты; 9 – защитная оболочка из ПВХ пластиката защищает кабель от внешних воздействий, обеспечивает нераспространение горения; 10 – металлическая броня из стальных оцинкованных лент защищает кабель от механических повреждений.

Трехфазные кабели на напряжения 6–35 кВ имеют следующую конструкцию:

- 1) токоведущая жила, медная или алюминиевая, многопроволочная опрессованная или круглой формы;
- 2) полупроводящий слой (экран) по жиле;
- 3) изоляция из СПЭ;
- 4) полупроводящий слой (экран) по изоляции;
- 5) комбинированный экран по жиле;
- 6) экранированные жилы скручиваются в сердечник вокруг жгу-та из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности;
- 7) междуфазное заполнение, выполненное экструзией из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности, имеет толщину не менее 0,3 м для придания кабелю круглой формы;
- 8) оболочка, выпресованная из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности;
- 9) броня из двух стальных лент толщиной 0,3 или 0,5 мм;
- 10) оболочка из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности.

Трехфазные кабели на напряжения 6–35 кВ (рис. 3.15) с уплотненными жилами секторной формы имеют следующую конструкцию:

- 1) токоведущая жила;
- 2) экран по жиле (полупроводящий слой);
- 3) изоляция и СПЭ;
- 4) экран по изоляции (полупроводящий слой). Секторные жилы скручиваются в сердечник;
- 5) комбинированный экран, состоящий из водоблокирующей полупроводящей бумаги или ленты, повива из медных проволок, поверх которых наложена медная лента;
- 6) разделительный слой из электропроводящей ленты или кабельной бумаги, прорезиненной ткани, полипропиленовой ленты и других композиций;
- 7) оболочка из полиэтилена или ПВХ пластиката толщиной не менее 1 мм;
- 8) броня из двух стальных лент;
- 9) защитная оболочка из полиэтилена.



Рис. 3.15. Трехфазный кабель с изоляцией из СПЭ

Некоторые марки кабелей не имеют брони 10 (рис. 3.14) и внешней защитной оболочки 9.

Для воздушных линий напряжением 1–35 кВ изготавливаются самонесущие изолированные провода (СИП-1, СИП-2, СИП-3 и СИП-4). СИП имеют следующую конструкцию:

- 1) токопроводящая жила, выполненная из круглых проволок алюминиевого сплава, уплотненная;
- 2) изоляция выпрессована из светостабилизированного СПЭ толщиной 2,3–3,5 мм в зависимости от напряжения.

**Маркировка кабелей.** Жилы: А – алюминиевая; медная – без обозначения. Изоляция: ПВ – СПЭ; В – ПВХ пластикат. Броня: Бб – броня из двух стальных оцинкованных лент без подушки; Б – броня

из двух стальных оцинкованных лент. Оболочка: В – оболочка из ПВХ пластиката; ШВ – защитный шланг из ПВХ пластиката. Индексация после обозначения оболочки: Г – кабель без защитного повива (голый); НГ-LS – изоляция и оболочка (защитный шланг) из ПВХ пластиката пониженной пожароопасности; LS – низкое дымо- и газовыделение; А – предел распространения горения, указывается только для кабелей с СПЭ изоляцией; FR – огнестойкий.

### **3.17. Некоторые вопросы эксплуатации кабелей с пластмассовой изоляцией**

Соединительные и концевые муфты кабелей с ПМИ работают при отсутствии гидростатического давления и вакуума, поэтому менее чувствительны к увлажнению. Маслоканифольные компаунды не могут использоваться в арматуре кабеля, т. к. температура разогрева этих компаундов перед заливкой выше максимально допустимой температуры нагрева термопластичной изоляции. Кроме того, масло, содержащееся в этих компаундах, оказывает разрушающее действие на изоляцию. Битумные составы можно применять лишь в отдельных случаях для кабеля до 1 кВ при защите пластмассовой изоляции подмоткой из стеклоленты.

Муфты с эпоксидными компаундами могут применяться для кабелей до 6 кВ с поливинилхлоридной изоляцией, т. к. эпоксидный компаунд имеет плохую адгезию к полиэтилену. При разделке кабелей с ПМИ применяют низкомолекулярный полиэтилен, самоклеивающуюся ленту, термоусаживаемые трубки, эластичные муфты, материалы с высокими адгезивными свойствами. Для повышения огнестойкости муфт, устранения ядовитых газов подбирают соответствующие комбинации наполнителя, компаунда и корпуса. В качестве наполнителя применяют гидроокись алюминия, что снижает объем горючих материалов. При  $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  гидроокись алюминия выделяет воду. В результате действует как охладитель и предотвращает тепловое разрушение изоляции.

### **3.18. Кабели с бумажно-масляной изоляцией (до 35 кВ)**

Основой БМИ является кабельная бумага толщиной 0,08–0,17 мм и маслоканифольный или синтетический состав повышенной вязко-

сти. Технология изготовления включает намотку, сушку, пропитку под вакуумом и герметизацию.

Конструкция кабеля на напряжение 10 кВ (рис. 3.16) включает: токоведущую жилу 1, выполненную сплошной или многопроволочной сечением 25–240 мм<sup>2</sup>; фазную 2 и поясную 3 изоляцию, общую для всех жил; защитную оболочку 4; подушку под броню 5; защитную броню из двух стальных лент 6 и антикоррозийное покрытие 7 из стеклопряжи.

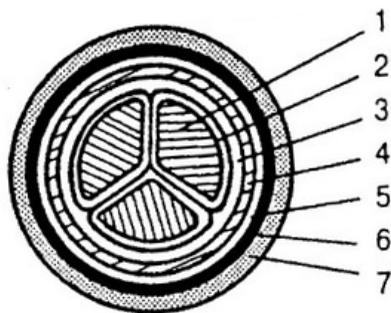


Рис. 3.16. Кабель на 10 кВ с БМИ

Фазная и поясная изоляция выполнены из бумажной ленты. Чтобы изоляция обладала достаточной гибкостью и не рвалась при изгибе кабеля, лента накладывается с зазором 1,5–3,5 мм. Зазоры между лентами одного слоя перекрываются лентами другого слоя. Толщина междуфазной изоляции примерно на 30 % больше толщины поясной, т. к. междуфазная изоляция всегда находится под линейным напряжением, а поясная может находиться под линейным напряжением только при металлическом замыкании одной фазы на землю. Толщина изоляции составляет 0,75–0,95 мм для кабелей на 6 кВ и 2,75 мм для кабелей на 10 кВ.

Кабели данной конструкции предназначены для прокладки в земле с различной коррозионной активностью. Длительно допустимые температуры для данной конструкции составляют 80–70 °С соответственно для напряжений 6–10 кВ. Максимально допустимая температура при КЗ – 200 °С.

Отличительной особенностью кабеля с БМИ на напряжения 20–35 кВ (рис. 3.17) является наличие полупроводящих слоев 2 и 4

соответственно по жиле 1 и изоляции 3, а также отдельных защитных оболочек 5 по каждой фазе. Жилы трехфазного кабеля скручиваются с заполнением между фазами пропитанной кабельной пряжей 6 до круглого сечения, обматываются тканевой лентой и бронируются круглой проволокой 7, поверх которой наносится антикоррозийный покров 8.

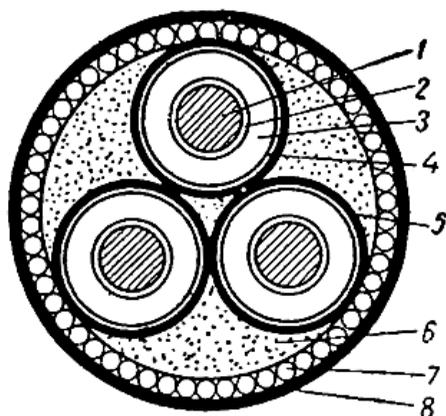


Рис. 3.17. Кабель на 35 кВ с БМИ

Главным достоинством такой конструкции является то, что электрическое поле в изоляции радиальное. Наличие полупроводящего слоя по жиле исключает местное увеличение напряженности поля у многопроволочных жил. Применение полупроводящих слоев и отдельных защитных оболочек позволяют повысить максимальную напряженность поля в изоляции до 3–3,5 кВ/мм. Отсутствие поясной изоляции улучшает теплоотвод от жилы, что позволяет увеличить токоведущую нагрузку по сравнению с кабелями с поясной изоляцией при таких же сечениях на 10–20 %.

Одним из недостатков БМИ с вязкой пропиткой является наличие газовых включений. Эти включения образуются как в процессе производства (примерно 0,1–0,3 % от объема), так и в процессе эксплуатации. В процессе эксплуатации имеет место циклический нагрев и охлаждение кабеля. При нагреве все материалы кабеля увеличивают свой объем. Особенно увеличивается объем пропиточного материала (примерно на 0,8 % на каждый градус). В результате

имеет место расширение защитной оболочки. После охлаждения кабеля объем пропитанного материала уменьшается, а размер металлической оболочки не уменьшается, т. к. ее деформация носит необратимый характер. В результате чего в изоляции возникают пустоты. Так как кабель охлаждается снаружи, то вязкость пропитки увеличивается в первую очередь в наружных слоях и происходит подтягивание менее вязкой пропитки от жилы к оболочке. Поэтому больше газовых включений образуются в области более сильного поля у жилы. Газовые включения образуются и при стекании пропитки, если трасса проходит на различных уровнях. Поэтому кабели с маслоканифольной пропиткой не рекомендуется прокладывать при разности уровней более 10–15 м.

Возникающие в газовых включениях ЧР приводят к разрушению изоляции. Для улучшения электрических характеристик кабелей с БМИ применяют специальные синтетические пропитывающие составы с высокой вязкостью. При вертикальной прокладке используют кабели со стопорными муфтами и кабели с обедненной изоляцией. Изоляция таких кабелей после пропитки нагревается до 70 °С в течение определенного времени. В результате около 70 % пропиточной массы вытекает. Необходимая электрическая прочность обедненных кабелей достигается за счет увеличения толщины изоляции примерно на 40 %.

### **3.19. Кабели с резиновой изоляцией (до 35 кВ)**

Кабели с резиновой изоляцией выпускаются со сплошными и многопроволочными жилами. Основным преимуществом кабелей с резиновой изоляцией является их гибкость, позволяющая при прокладке и намотке делать меньший радиус изгиба. Они находят широкое применение в передвижных установках.

По электрическим характеристикам они уступают кабелям с БМИ и пластмассовой изоляцией. С течением времени под воздействием озона, кислорода, света, температуры и других факторов резина теряет свои эластичные свойства, снижаются физико-механические и электрические параметры.

Наиболее разрушительное действие оказывает озон. Поэтому применяют озоностойкую резину на основе бутилкаучука и этиленпропиленового каучука, применяют полупроводящие экраны.

Изоляция кабеля (рис. 3.18) состоит из фазной изоляции 2 и защитной оболочки 3. Толщина изоляции принимается 1,3–1,8 мм для кабелей на напряжение до 6 кВ и 5 мм для кабелей 10 кВ. Толщина защитной оболочки принимается соответственно 1,2–3,8 мм и 1,0–1,2 мм. Защитная оболочка может быть свинцовая, резиновая или поливинилхлоридная.

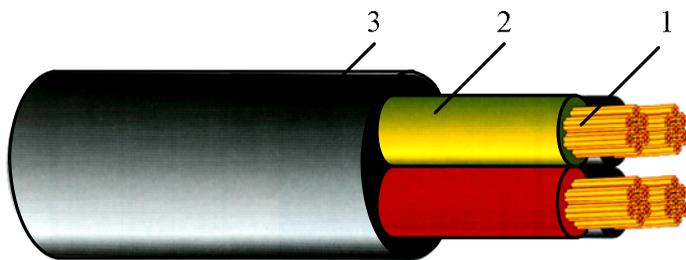


Рис. 3.18. Кабель с резиновой изоляцией

### 3.20. Маслонаполненные кабели (110–750 кВ)

На напряжения 110–750 кВ изготавливаются кабели двух модификаций: с полыми жилами и в стальных трубах, заполненных маслом. В процессе производства изоляция таких кабелей пропитывается дегазированным, маловязким, стойким к разложению в электрическом поле и обладающим хорошими газопоглощающими свойствами маслом. В процессе эксплуатации пропитанная изоляция находится под избыточным давлением масла, которое циркулирует в полых жилах кабеля или в трубе. Масло проникает в изоляцию через зазоры в жиле и тем самым исключает появление газовых включений, что значительно повышает электрическую прочность изоляции.

Давление масла в каналах поддерживается в определенных пределах. Для этого вдоль трассы кабеля через 1–2,5 км устанавливаются специальные баки питания (компенсаторы), которые подключены к концевым и стопорным муфтам и регулируют давление при колебаниях температуры.

В настоящее время изготавливаются кабели низкого (до 0,2 МПа), среднего (0,4–0,6 МПа) и высокого (1–1,6 МПа) давления. С увеличением давления улучшается пропитка изоляции, но в то же время

требуется более прочная защитная оболочка и защитные покровы. Для кабелей со свинцовой оболочкой экономически выгодно использовать давление 0,24–0,29 МПа, для кабелей с алюминиевой оболочкой – 0,2–0,5 МПа.

На рис. 3.19 представлена конструкция маслонаполненного кабеля на напряжение 110–220 кВ. Токоведущая жила 2 имеет в центре канал 1, по которому циркулирует масло. Диаметр канала 12–14 мм для кабелей 110–220 кВ и 14–18 мм для кабелей 330–500 кВ.

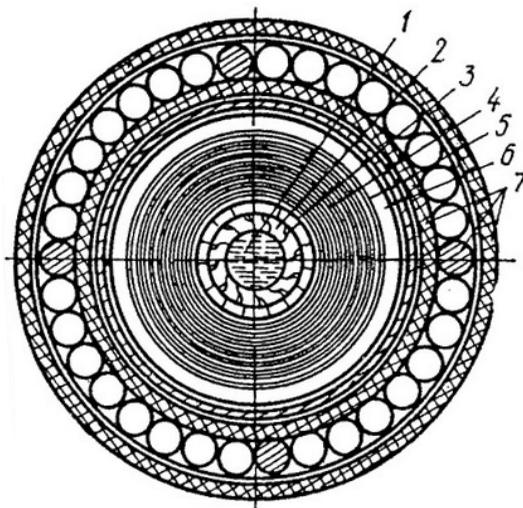


Рис. 3.19. Маслонаполненный кабель

Канал образуется с помощью луженых проводов Z-образной формы, поверх которых наносится второй повив из проволоки сегментной формы. Такая конструкция жилы обладает достаточной устойчивостью и гладкой внешней поверхностью, что весьма существенно при высоких напряжениях, т. к. неровность на поверхности жилы создает местное увеличение напряженности электрического поля. Лужение проводников предотвращает контакт меди с маслом и исключает старение масла.

При сечении жилы свыше  $600 \text{ мм}^2$  целесообразно применять секционированные жилы, скрученные из четырех или шести изолированных друг от друга сегментов, что уменьшает активное сопротивление жилы за счет снижения поверхностного эффекта и эффекта

близости. Изоляция сегментов – полупроводящая бумага. Общая изоляция – градирующая. Изготавливаются такие полые жилы путем намотки круглой проволоки на поддерживающую металлическую плоскую спираль. Полые жилы различной конструкции в настоящее время изготавливаются сечением 120–2000 мм<sup>2</sup>.

В изоляции маслонаполненного кабеля малая вероятность образования газовых включений и развития ЧР. Однако, возникает возможность теплового пробоя при возрастании диэлектрических потерь. Поэтому главным требованием к бумаге является низкое значение  $\text{tg}\delta$  и произведения  $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$ .

В настоящее время для снижения диэлектрических потерь применяют специальные сорта бумаги: бумагу с добавлением волокнистых материалов на основе полиэфиров и связующего на основе поликарбонатов; полипропиленовую пленку, проложенную между слоями бумаги и другие комбинации. Такая бумага обладает малым  $\text{tg}\delta$  и произведением  $\varepsilon \cdot \text{tg}\delta$ , а также высокой электрической и механической прочностью. Некоторые зарубежные фирмы используют нетканые материалы на основе полипропилена и полипропиленового волокна. Эти материалы хорошо пропитываются маслом, обладают гидрофобными свойствами, что позволяет упростить пропитку и просушку.

Поверх токоведущей жилы 2 и изоляции 4 наносятся полупроводящие экраны из полупроводящей бумаги 3 и 5. Защитная оболочка кабеля 6 выполняется из свинца или алюминия. Поверх защитной оболочки накладывают упрочняющий покров 7 из синтетических лент и лент из немагнитных материалов (металл). Если оболочка выполнена из алюминия, то упрочняющего покрова не требуется.

Защитный покров у кабелей со свинцовой оболочкой состоит из следующих слоев: битум, лента поливинилхлоридного пластиката, лента пропитанной кабельной пряжи, бронь из стальной проволоки. Для кабелей с алюминиевой оболочкой применяют защитный покров повышенной влагостойкости из полиэтилена и поливинилхлоридного пластиката.

Маслонаполненный кабель низкого давления на напряжение 750 кВ (рис. 3.20) отличается от рассмотренной выше конструкции тем, что имеет два масляных канала: один – в полый жиле 2; второй – под металлической свинцовой оболочкой 6. Свинцовая оболочка выпол-

нена из двух коаксиальных цилиндров 5 и 6. Наличие масляного канала под оболочкой уменьшает перепад давления масла в изоляции при нагревании и охлаждении.

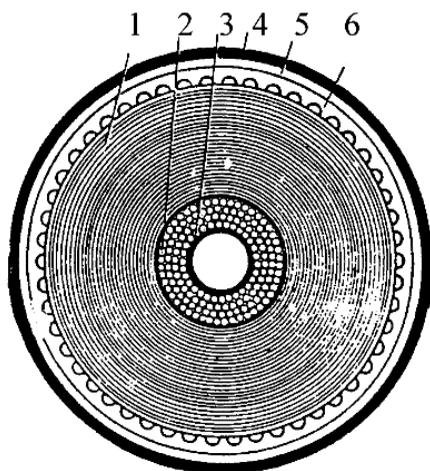


Рис. 3.20. Маслонаполненный кабель низкого давления

Токоведущая жила кабеля 2 выполнена из круглой проволоки, повитой на плоскую спираль. Остальные элементы кабеля выполнены так же, как и в кабелях среднего давления.

В ряде стран находят применения трехжильные маслонаполненные кабели на напряжения 88–132 кВ круглого и плоского типа. У трехжильных кабелей каналы для масла выполнены из трех спиральных лент под металлической оболочкой. Для увеличения гибкости трехжильных круглых кабелей металлическая оболочка выполняется гофрированной и защищается от коррозии пластиковым шлангом. Кабели такой конструкции значительно дешевле одножильных маслонаполненных, но обладают низкой термической устойчивостью при КЗ (применяются на 110 кВ). Плоский кабель состоит из трех экранированных и изолированных жил в общей свинцовой оболочке. Упрочняющий покров содержит рифленые полосы из бронзы. Полосы стягиваются медными проволоками и оказывают давление на свинцовую оболочку, благодаря чему внутри поддерживается давление 0,2 МПа. Такие кабели не нуждаются в подпитке и применяются на подводных трассах.

Маслонаполненные кабели в стальных трубах (рис. 3.21) применяются на напряжения 110–500 кВ. Они представляют собой стальной маслотрубопровод под давлением 1,5 МПа, внутрь которого затянuty три одножильных кабеля. Давление в трубопроводе поддерживается автоматически специальными устройствами, расположенными на расстоянии 10–15 км.

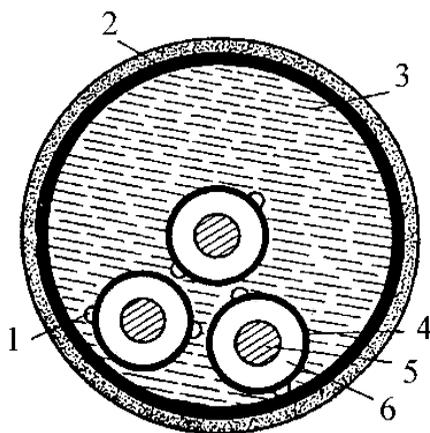


Рис. 3.21. Маслонаполненный кабель в трубе

Преимущества такой конструкции в следующем: не нужна защитная оболочка, воспринимающая давление масла 3; увеличивается электрическая прочность, т. к. масло находится под высоким давлением; стальная труба надежно защищает кабель от механических повреждений. Однако монтаж таких линий несколько сложнее, а стоимость выше по сравнению с одножильными кабелями.

Трубопровод 2 выполняется из стальной трубы длиной 10–12 м. Наружная поверхность трубопровода имеет антикоррозийное покрытие толщиной 10 мм. Внутренняя поверхность после тщательной зачистки покрывается лаком, чтобы исключить контакт масла с металлом и сохранить стабильность характеристик масла. Внутренний диаметр труб составляет  $(2,7-2,8)d_k$ , где  $d_k$  – наружный диаметр одной фазы кабеля, что позволяет обеспечить радиус изгиба кабеля за счет температурных изменений длины не менее  $40d_k$ . Наружный диаметр трубы 219–273 мм, толщина стенки – 10 мм.

Токоведущие жилы круглой формы 5 скручиваются из медной луженой проволоки. Если сечение жилы более  $700 \text{ мм}^2$ , то жила скручивается из четырех секторов, два из которых изолированы. Изоляция жилы 6 содержит те же элементы, что и кабели с полыми жилами. Для уменьшения электрических потерь применяют металлический экран 4, состоящий из двух лент, разделенных полупроводящей бумагой. Толщина изоляции для кабелей различных напряжений приведена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Толщина изоляции маслонаполненных кабелей

$U$ , кВ	110	220	330	500
$d$ , мм	9,6–12,4	17,5–20,7	23–25	30–31

Поверх перфорированной ленты навивают две-три медные или бронзовые проволоки  $l$  с шагом 100–300 м, для облегчения затягивания кабеля в трубу. Наличие проволоки создает зазор между отдельными фазами, что улучшает условия охлаждения. На место монтажа отдельные жилы кабеля доставляются в свинцовой оболочке или специальных контейнерах, чтобы предохранить изоляцию от увлажнения. В трубу кабель затягивается без свинцовой оболочки. Свинцовая оболочка может заменяться полиэтиленовой, которая не демонтируется и защищает изоляцию от увлажнения и загрязнения. Эластичная оболочка свободно передает давление масла в трубе изоляции и тем самым исключает образование газовых включений в изоляции при колебаниях температуры. Масло в трубе не соприкасается с изоляцией и выполняет роль охлаждающей среды, поэтому может иметь другие характеристики. Допустимая температура до  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , значение  $\text{tg}\delta = 0,0013\text{--}0,0015$ .

### 3.21. Газонаполненные кабели

Кабели с газонаполненной изоляцией (рис. 3.22) нашли широкое применение в ряде стран на напряжение 35–275 кВ.

Преимущества кабелей с газовой изоляцией:

1) дешевле кабелей с БМИ, т. к. не содержат дорогого дегазированного масла, а бумагу можно пропитать обычным маслोकанифольным составом;

2) используется подпитывающая аппаратура, обеспечивающая стабильность давления при колебаниях температуры, а пункты на трассе могут располагаться на значительном расстоянии;

3) прокладка может осуществляться на трассах различной сложности.

Недостатки: меньшая электрическая прочность, зависимость прочности от давления и температуры. В качестве изолирующего газа применяется сухой очищенный азот, элегаз, смесь азота с элегазом.

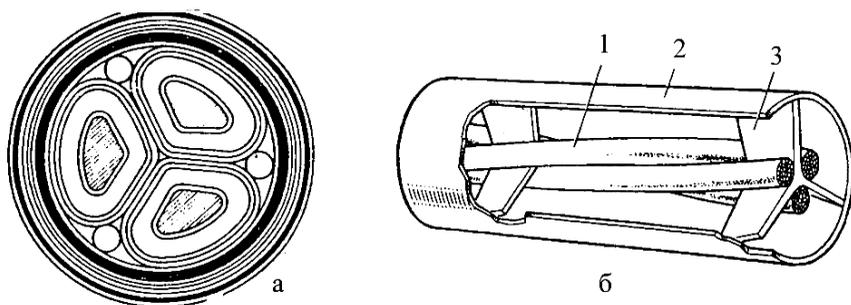


Рис. 3.22. Газонаполненные кабели:  
*a* – с полыми каналами; *б* – в трубопроводе

По конструктивному исполнению выпускаются следующие модификации:

1) кабели с подачей газа в полый проводник, как в маслonaполненных кабелях;

2) трехжильные кабели с подачей газа по каналам, расположенным под защитной металлической оболочкой между фазами (рис. 3.22, *a*);

3) кабель в трубопроводе с газовым наполнением (рис. 3.22, *б*).

Кабели с полыми жилами получили широкое применение на напряжение 110 кВ и выше и по конструкции не отличаются от маслonaполненных кабелей. В них применяется обедненная БМИ. Бумажная лента накладывается на жилу. Затем после сушки и пропитки излишки пропиточного состава удаляются. Пропиточный состав

остается только в капиллярах бумаги. Промежутки между лентами заполняются газом. Поверх изоляции наносится эластичная оболочка, играющая роль мембраны. Электрическая прочность такой изоляции выше, чем в кабелях других модификаций, т. к. изоляция у жилы, где максимальная напряженность электрического поля, находится под высоким давлением. Давление газа у жилы мало зависит от утечки газа через оболочку или кожух муфты. В трехфазных кабелях два газовых канала образованы металлическими спиралями и дают свободный доступ газу в изоляцию по всей длине. Третий канал представляет собой трубу со сплошными стенками.

В газонаполненной кабеле в стальной трубе изоляция жил выполнена из бумаги, пропитанной маслоканифольным составом, и покрыта сверху пластиковой оболочкой. Давление на изоляцию передается через оболочку.

Перспективной является конструкция с чисто газовой изоляцией. В такой конструкции токопровод изолируется с помощью изолирующих распорок из эпоксидного компаунда и закрепляется в специальной трубе. Пространство между токопроводом и трубой заполняется газом под давлением. Внешняя оболочка для увеличения гибкости может выполняться гофрированной. Строительная длина 100–200 м, наружный диаметр – 127 мм (275 кВ).

Преимущества: передача больших мощностей, малая емкость, самовосстанавливающаяся изоляция.

### **3.22. Кабели постоянного тока**

В настоящее время изготавливаются на напряжение до 400 кВ как одножильные, так и двухжильные. По конструкции кабели постоянного тока аналогичны кабелям переменного тока. Однако, толщина изоляции у них значительно меньше, т. к. при постоянном напряжении более благоприятное распределение напряженности электрического поля и процесс поляризации носит замедленный характер. Выпускаются следующие виды кабелей постоянного тока:

- 1) кабели с БМИ с вязкой пропиткой;
- 2) маслонаполненные кабели;
- 3) газонаполненные кабели.

### 3.23. Кратковременная и длительная электрическая прочность изоляции кабелей

В кабелях с БМИ пробой изоляции начинается с пробоя масляного зазора. Поэтому уменьшение толщины бумаги приводит к увеличению прочности изоляции при напряжении промышленной частоты. Увеличение плотности бумаги приводит к увеличению кратковременной электрической прочности, при этом несколько снижается длительная электрическая прочность. Увеличение избыточного давления масла приводит к значительному увеличению кратковременной электрической прочности примерно в 1,8 раза при напряжении промышленной частоты. ЧР в БМИ возникают вследствие пробоя прослойки пропитывающего материала или наличия газовых включений, что характерно для изоляции с вязкой пропиткой. В маслонаполненных кабелях 2Р разряды возникают вследствие пробоя масляных промежутков, т. е. при соблюдении технологии производства газовые включения отсутствуют.

Напряженность возникновения ЧР в маслонаполненных кабелях определяется по выражению

$$E_{\text{мн}} = A\sqrt[3]{\Delta_{\text{м}}}, \quad (3.19)$$

где  $\Delta_{\text{м}}$  – толщина масляного канала, мм;

$A = f(p)$  – коэффициент, зависящий от давления.

Увеличение давления приводит к увеличению длительной электрической прочности (рис. 3.23). Увеличение влажности изоляции вследствие плохой сушки и пропитки приводит к росту  $\text{tg}\delta$  при увеличении температуры и росту ЧР.

Причиной старения изоляции являются ЧР и воздействие повышенной температуры. В маслонаполненных кабелях причиной старения изоляции является рост  $\text{tg}\delta$  и увеличение температуры. В кабелях с ПМИ причиной старения изоляции являются дендриты – ветвистые разряды, которые могут возникать в микротрещинах, газовых включениях и местах с резконеоднородным полем.

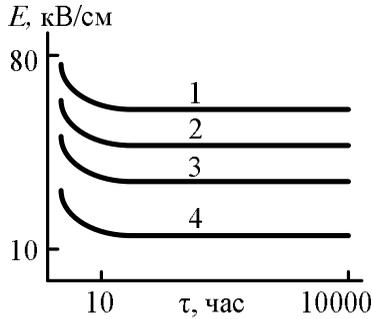


Рис. 3.23. Электрическая прочность кабелей:  
 1 – маслонаполненный кабель при  $p = 1,5$  МПа; 2 – при  $p = 1,0$  МПа;  
 3 – при  $p = 0,1$  МПа; 4 – кабели с вязкой пропиткой

Зависимость пробивной напряженности от времени выдержки определяется следующим выражением

$$E_{\text{пр}} = A\tau^{-t/n}, \quad (3.20)$$

где  $A$  – зависит от вида диэлектрика, пропитывающего состав и давления,  $n = 6-12$ .

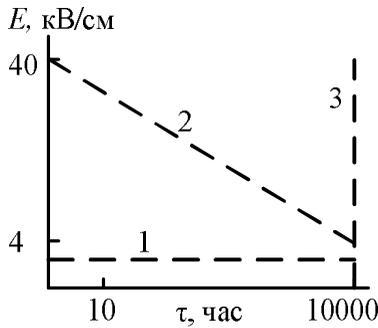


Рис. 3.24. Напряженность поля кабелей:  
 1 – допустимая в эксплуатации напряженность;  
 2 –  $E = f(\tau)$ ; 3 – период эксплуатации (30 лет)

Длительная рабочая напряженность электрического поля в кабелях  $E_{\text{раб}}$  (табл. 3.4) должна выбираться с учетом длительно воздей-

ствующего рабочего напряжения, при отсутствии ЧР и с учетом кратковременных перенапряжений в процессе эксплуатации

Таблица 3.4

Допустимая напряженность в кабелях

Тип кабеля	Класс напряж., кВ	Доп. напряженность при различных воздействиях, кВ/м		
		$U_{\text{раб.наиб}}$	$U_{50}$ длит. 24 час	Грозовые импульсы
Кабели с БМИ с вязкой пропиткой и поясной изоляцией	До 10	До 3,2	–	–
Кабель с БМИ и вязкой пропиткой, экранированный	20–35	До 4,2	–	–
МНК давлением до 0,5 МПа	110–220	8–10	30	100
МНК давлением 1,5 МПа	110–750	10–15	45	100
С пластмассовой изоляцией	До 35	2,5–4	–	–
	110–220	6–10	–	–

Цель испытаний кабеля – выявление сосредоточенных дефектов. Испытательное напряжение в эксплуатации  $U_{\text{исп}}$  выбирается на 10–20 % ниже заводских норм. Испытываются в основном кабели на напряжение до 35 кВ. Испытания могут производиться как переменным, так и постоянным напряжением. В процессе испытаний замеряют  $I_{\text{ут}}$  и  $\text{tg}\delta$ .

### 3.24. Изоляция электрических машин высокого напряжения

К этой категории относятся электрические машины большой мощности: генераторы, синхронные компенсаторы и электрические двигатели большой мощности, работающие при напряжениях 3–20 кВ. Изоляция электрических машин данного типа работает в тяжелых условиях эксплуатации: перенапряжения, высокая рабочая температура, цикличность нагрева и охлаждения, механические усилия и вибрация, воздействие продуктов разложения, частичные разряды, неоднородные поля. Необходимо также учитывать технологические

трудности изготовления изоляции и возможность повреждения изоляции при изготовлении и укладке. Стоимость изоляции мощных электрических машин составляет 50–80 % от совокупной стоимости всех материалов электрических машин.

Изоляция электрических машин подразделяется на корпусную (между обмоткой и магнитопроводом), междуфазную, витковую (между витками одной секции и катушки), изоляцию отдельных проводников или стержней. Конструкция изоляции зависит от мощности машины, способа охлаждения и применяемых материалов.

В генераторах старой конструкции применялась термопластичная изоляция на основе микаленты и битумного лака (компаундированная изоляция). Ее недостатки в том, что с ростом температуры компаунд размягчается, становится текучим, в нем образуются газовые включения. В современных машинах применяют термореактивную изоляцию на основе слюдинитовой бумаги, эпоксидных компаундов и стеклоткани или стеклопластика.

Витковая изоляция выполняется из стеклослюдяной ленты или на основе эмалированных проводов со стекловолоконистой обмоткой, пропитанной эпоксидным компаундом. Основные типы термореактивной изоляции: монолит – 1, 2, 3, 4; ВЭС-2; слюдотерм; монотерм. Основные этапы технологии изготовления витковой изоляции: намотка сухими лентами; обжимка, вакуумная пропитка, отвердевание. Конструкция изоляции турбогенераторов показана на рис. 3.25.

Токоведущие стержни 3 выполняются прямоугольной формы (могут быть полые проводники 4 для непосредственного охлаждения). Вследствие этого электрическое поле в пазах статора неоднородно. Степень неоднородности зависит от радиуса закругления и толщины изоляции и составляет  $k_H = 2,2-2,4$ . Для уменьшения неоднородности поля применяют прокладки из алюминия корытного профиля 11 и изоляционные прокладки 10 с закругленными краями, а также закругление стержней. Поверх корпусной изоляции 6 накладывается слой из полупроводящей ленты 7 (асбестожелезистая лента) для ослабления электрического поля в воздушных включениях между изоляцией и стенками паза, что уменьшает интенсивность ЧР, скользящих разрядов (СР) и короны. Для уменьшения ЧР и СР используют также стойкую изоляцию с повышенным содержанием слюды.

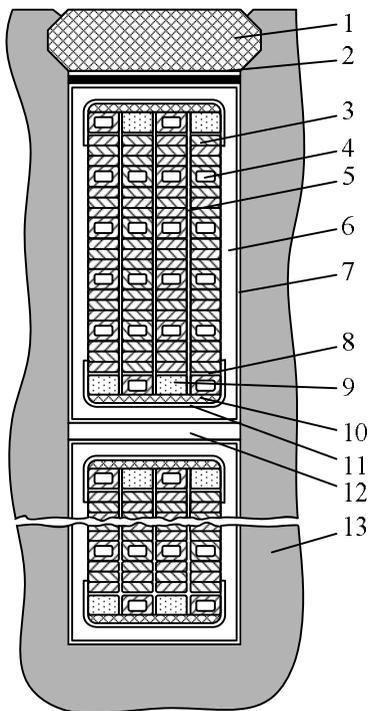


Рис. 3.25. Поперечный разрез паза статора:

- 1 – клин;
- 2, 12 – изоляционные прокладки;
- 3 – медный сплошной проводник;
- 4 – медный полый проводник;
- 5 – изоляционный разделитель групп транспонированных проводников;
- 6 – корпусная изоляция;
- 7 – полупроводящая лента;
- 8 – изоляция мест переходов транспозиции проводников;
- 9 – изоляционная замазка;
- 10 – изоляционная прокладка с закруглением;
- 11 – алюминиевая прокладка;
- 13 – сталь статора

В лобовых частях обмотки для устранения разрядных процессов по поверхности при выходе обмотки из статора полупроводящее покрытие (полупроводящий лак или медьсодержащая лента) выводится за пределы паза и делается несколькими ступенями с различным удельным

поверхностным сопротивлением  $\rho$  ( $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ) (рис. 3.26). Плотность поверхностного тока утечки при этом уменьшается по мере удаления от паза и распределение напряжения в лобовых частях выравнивается.

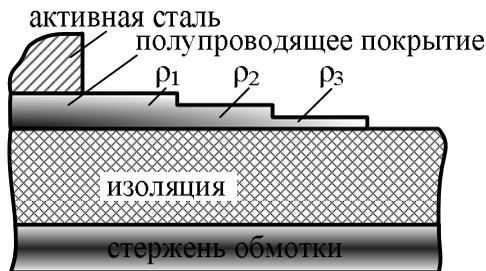


Рис. 3.26. Схема противокоронной защиты в месте выхода стержня из паза

Испытания изоляции генераторов, которые проходят в процессе производства, указаны в табл. 3.5. Анализ результатов испытаний показывает, что пробой на ребрах проводника составляют 35–40 % от их общего количества, на узких гранях – 10–15 %; на широких – 45–50 %. При выпуске машины испытательное напряжение  $U_{\text{исп}} = 2U_{\text{н}} + 3 \text{ кВ}$ , где  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение электрической машины, кВ. При приемосдаточных испытаниях  $U_{\text{исп}} = 0,8(2U_{\text{н}} + 3) \text{ кВ} \approx 1,75U_{\text{н}}$ .

Таблица 3.5

Виды испытаний и испытательные напряжения для изоляции генераторов

Вид исп. \ $U_{\text{н}}, \text{кВ}$	$\leq 6 \text{ кВ}$	10,5–20 кВ	24 кВ
Испытание стержней до укладки в паз	$3,3U_{\text{н}} + 3,25$	$2,75U_{\text{н}} + 7$	$2,7U_{\text{н}} + 5$
После укладки и уплотнения нижнего ряда	$3,0U_{\text{н}} + 2,5$	$2,6U_{\text{н}} + 5$	$2,4U_{\text{н}} + 4$
После укладки	$3,0U_{\text{н}} + 0,5$	$2,4U_{\text{н}} + 4$	$2,2U_{\text{н}} + 4$
После пайки, запечки и заклинивания	$2,9U_{\text{н}}$	$2,2U_{\text{н}} + 4$	$2,1U_{\text{н}} + 4$

Импульсная прочность изоляции составляет  $E = 30\text{--}35 \text{ кВ/мм}$  при толщине  $d = 3\text{--}12 \text{ мм}$ , однако имеет место значительный статистический разброс. Электрическая прочность изоляции всей машины ниже, чем электрическая прочность отдельных стержней. В эксплуатации в результате механических воздействий кратковременная (импульсная) прочность снижается. Для новых машин коэффициент импульса  $k_{\text{и}} = U_{\text{и}}/U_{50} = 1,5\text{--}2,0$ . Для машин, находящихся в длительной эксплуатации,  $k_{\text{и}} < 1$ , что объясняется образованием трещин. На основании опыта эксплуатации толщина изоляции может быть определена по следующему выражению:

$$d = 1,45 + 0,24U \text{ [кВ]}, \text{ мм} . \quad (3.21)$$

В наиболее тяжелом режиме работает витковая изоляция. Для нее более опасными являются импульсные перенапряжения, менее опасны ЧР.

### 3.25. Изоляция силовых конденсаторов

Высоковольтные конденсаторы в энергетических установках применяются для компенсации реактивной мощности, для компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП и высокочастотной обработки ЛЭП, для создания ГИН и ГИТ.

Энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, определяется выражением

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2 V}{2}, \quad (3.22)$$

где  $V$  – объем активной массы диэлектрика;

$E = U/d$  – напряженность поля в диэлектрике.

Поэтому массогабаритные показатели конденсатора будут определяться в основном коэффициентом диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и электрической прочностью диэлектрического материала. Чем выше  $\epsilon$  и  $E_{\text{доп}}$ , тем меньше габариты конденсатора, с теми же значениями энергии  $W$ .

Для изготовления конденсаторов в настоящее время применяется БМИ, которая состоит из конденсаторной бумаги, пропитанной жидкими диэлектриками, и полимерной пленки. Пленка вкладывается между слоями бумаги или в виде покрытия наносится на фольгу. Используется бумага марок КОН, МКОН, ЭМКОН толщиной 4–30 мкм, плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup>,  $\text{tg } \delta = 0,0012\text{--}0,0026$ . Из полимерных пленок используют полипропиленовую пленку ( $\epsilon = 2,25$ ,  $\text{tg } \delta = (2\text{--}3) \cdot 10^{-4}$ ) для конденсаторов промышленной частоты и полиэтилентерефталатную (лавсановую) пленку для импульсных конденсаторов ( $\epsilon = 3,2$ ,  $\text{tg } \delta = (3\text{--}4) \cdot 10^{-4}$ ), а также поливинилденфторидную пленку ( $\epsilon = 10\text{--}12$ ,  $\text{tg } \delta = (12\text{--}22) \cdot 10^{-4}$ ). Полимерные пленки обладают более высокой

прочностью  $E_{\text{пр}} = 60\text{--}80 \text{ кВ/мм}$  и термостойкостью ( $t_{\text{плав}} = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и механической прочностью. Бумага в комбинированной бумажно-пленочной изоляции обеспечивает хорошую пропитку.

В качестве пропитывающих материалов используют конденсаторное (нефтяное) масло, хлордефинилы, дибутилфталат, касторовое масло (в импульсных конденсаторах). Хлордефинилы токсичны и требуют тщательной герметизации, хотя обладают высокими значениями  $\varepsilon_r$ , стойки к ЧР и разложению. В качестве электродов используют алюминиевую фольгу толщиной 7–12 мкм. В некоторых низковольтных конденсаторах используют слой металла из цинка или алюминия, нанесенный на поверхность бумаги или пленки. Такие конденсаторы обладают самовосстанавливающимися свойствами: в месте пробоя происходит разрушение металлического слоя (выгорание), при этом несколько уменьшается емкость.

Технология изготовления включает следующие операции: намотку на специальных станках на оправку или цилиндрический каркас, снятие и опрессовку, пропитку под вакуумом и герметизацию. Намотка выполняется со скрытой или выступающей фольгой. При выступающей фольге обеспечивается лучший теплоотвод и уменьшается индуктивность. Со слепой фольгой выполняются конденсаторы на высокие напряжения.

Конденсатор обычно собирается из секций (рис. 3.27), соединенных переключками в параллельную, последовательную или комбинированные схемы. Секции могут иметь несколько подсекций, соединенных последовательно. После опрессовки секция помещается в бак, вакуумируется, пропитывается и герметизируется. Каждая секция имеет свой плавкий предохранитель.

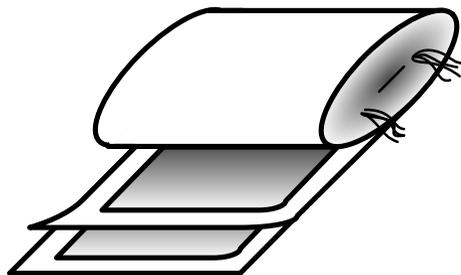


Рис. 3.27. Рулонная секция

Кратковременная электрическая прочность изоляции конденсатора определяется в основном прочностью твердой изоляции. В процессе изготовления изоляции в пленку или бумагу попадают частицы металла, их окислы и соли. Вследствие малой толщины бумаги образуются токопроводящие включения (ТПВ) со сравнительно малым сопротивлением (около 200 кОм). Число таких включений на квадратный метр может достигать 40–100 шт. Пробой изоляции происходит в местах этих включений в области равномерного поля. Пробивная напряженность изоляции конденсатора определяется по выражению

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{б}}(n-1)/n, \quad (3.23)$$

где  $E_{\text{б}}$  – пробивная напряженность листа бумаги при отсутствии ТПВ;  
 $n$  – число листов в слое.

Зависимость пробивной напряженности  $E_{\text{пр}}$  от толщины  $d$  изоляции представлена на рис. 3.26.

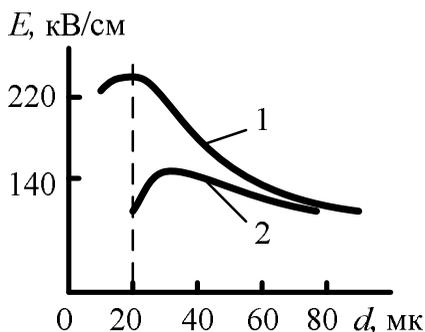


Рис. 3.26. Электрическая прочность изоляции секции:  
 1 – бумажно-пленочная изоляция; 2 – бумажная изоляция

Частичные разряды в изоляции конденсаторов возникают в жидких диэлектриках, т. к. при разложении масла образуются газовые включения. В изоляции конденсаторов высокого переменного напряжения ЧР возникают на краю электродов. Переход ЧР в критические связан с появлением скользящих разрядов на краю фольги,

либо с возникновением в толще изоляции газовых включений, что наиболее характерно для изоляции, пропитанной нефтяным маслом.

Длительная электрическая прочность в основном определяется развитием ЧР и повышением температуры (тепловое старение). Процесс старения в значительной степени зависит от типа жидкого диэлектрика. Для нефтяного масла процесс старения в основном определяется интенсивностью появления газовых пузырьков, после чего сильно снижается напряжение возникновения ЧР. Для конденсаторов с трихлордифениловой пропиткой процесс старения определяется увеличением  $\text{tg}\delta$ , снижением прочности за счет разложения жидкого диэлектрика и взаимодействия продуктов разложения с твердым диэлектриком.

Рабочие напряженности: для БМИ при  $f = 50$  Гц  $E_0 = 20\text{--}28$  кВ/см; в комбинированной изоляции  $E_0 = 35\text{--}38$  кВ/см,  $E_{\text{пл}} = 50\text{--}60$  кВ/см; для конденсаторов с изоляцией из пленок при  $d = 30\text{--}36$  мм  $E_{\text{раб}} = 50\text{--}60$  кВ/см; для конденсаторов с металлизированными пленками при  $d = 6\text{--}8$  мм  $E_{\text{раб}} = 60\text{--}70$  кВ/см; для конденсаторов на постоянном токе  $E_{\text{раб}} = 35\text{--}40$  кВ/см; для конденсаторов импульсных установок  $E_{\text{раб}} = 60\text{--}65$  кВ/см; при пропитке касторовым маслом или диэлектриками высокой газостойкости  $E_{\text{раб}} = 80\text{--}120$  кВ/см.

### 3.26. Изоляция герметичных распределительных устройств

В герметичных РУ все токоведущие элементы расположены в закрытых металлических кожухах. В качестве изолирующей среды используется сжатый элегаз под давлением около 200 кПа.

Преимущества элегазовых комплектных распределительных устройств (КРУЭ):

- 1) меньшие размеры по сравнению с ОРУ (на напряжение 220 кВ в 30 раз, на 1150 кВ – в 50 раз);
- 2) не создает радиопомех, работает бесшумно, что особенно важно в черте города;
- 3) более безопасное обслуживание;
- 4) более высокая степень надежности;
- 5) пожаробезопасность.

Стоимость КРУЭ может быть в 2 и более раз выше стоимости ОРУ, но в ряде случаев (строительство под землей, в условиях крайнего севера) она соизмерима со стоимостью обычных РУ.

КРУЭ выполняются из однофазных или трехфазных ячеек. Для увеличения надежности и облегчения монтажа КРУЭ выполняются из отдельных отсеков, отделенных друг от друга герметизированными прокладками. Крепления и перемещения токоведущих частей обеспечиваются изоляционными элементами из твердых диэлектриков. Применяются дисковые, конические, шайбообразные и стержневые изоляторы.

Для обеспечения необходимой электрической прочности изоляции в условиях эксплуатации необходимо обеспечить чистоту и давления элегаза в заданных пределах. Электрическая прочность снижается при появлении пыли, влаги, грязи. Допустимая концентрация паров воды 0,015 г на 1 кг элегаза. Для удаления влаги используются фильтры и поглотители (адсорбирующие патроны). Обеспечивается автоматическая подпитка и циркуляция элегаза.

КРУЭ поставляется на место строительства отдельными секциями или ячейками, заполненными сухим воздухом или азотом. После монтажа производится проверка герметичности, откачка воздуха или азота и заполнение секций элегазом до необходимого давления. Перед вводом в эксплуатацию изоляция испытывается импульсным напряжением и напряжением промышленной частоты.

КРУЭ практически не нуждаются в обслуживании, т. к. рабочие элементы РУ не имеет контакта с атмосферой. Однако необходим постоянный контроль плотности элегаза и регулирование давления. Один раз в 5–10 лет проводится ревизия выключателей и другой аппаратуры ГРУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части курса лекций по дисциплине «Техника высоких напряжений» изложена теория электрических разрядов в газах, рассмотрена конструкция внешней изоляции линий электропередачи и распределительных устройств и внутренней изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей и другого высоковольтного электрооборудования. Авторы преследовали своей целью представить в данном издании все лучшие наработки классического курса «Техники высоких напряжений», а также существенно дополнить его сведениями о новых разработках в области изоляции высоковольтного оборудования. За истекшие 10–20 лет развития электроэнергетики была существенно улучшена конструкция изоляции электрических машин. Новая изоляция линий электропередачи и распределительных устройств на основе полимерных соединений позволяет снизить нагрузки на опорные конструкции. Применение сшитого полиэтилена в составе изоляции кабелей дает возможность увеличить их токовую нагрузку, упростить эксплуатацию и существенно расширить область применения. Основными источниками информации стали каталоги фирм-производителей современного высоковольтного электрооборудования.

Представленное пособие должно помочь студентам электроэнергетических специальностей вузов в изучении курсов «Техника высоких напряжений» и «Изоляция и перенапряжения». Его содержание соответствует учебным программам указанных курсов.

Учебное издание

КРАСЬКО Александр Сергеевич  
ПОНОМАРЕНКО Евгений Геннадьевич

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
(ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ)

Курс лекций

В 2 частях

Часть 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ.  
ВНЕШНЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.  
ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Редактор Т.А. Подолякова  
Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

---

Подписано в печать 30.06.2011.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 6,92. Уч.-изд. л. 5,41. Тираж 100. Заказ 864.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.