

**В. Ф. Важов, В. А. Лавринович, С. А. Лопаткин**

# **ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

**курс лекций для бакалавров направления  
140200 «Электроэнергетика»**

**Томск, 2006 г.**

УДК 621.3.027.3(07)

**Важов В. Ф., Лавринович В. А., Лопаткин С. А.**

Техника высоких напряжений / Курс лекций для бакалавров направления 140200 "Электроэнергетика" — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. — 119 с.

В краткой форме в соответствии с программой по ТВН изложены основы электрических разрядов в газообразных, жидких, твердых и комбинированных диэлектриках, конструкции внешней изоляции линий электропередач и подстанций, изоляция оборудования высокого напряжения (силовых трансформаторов, высоковольтных конденсаторов, кабелей, электрических машин, коммутационных аппаратов), высоковольтные испытательные установки, испытания и измерения, внутренние и грозовые перенапряжения в электрических системах, меры и средства защиты от них.

Курс лекций предназначен для студентов электроэнергетического направления, может быть полезен инженерно-техническим работникам заводов, энергосистем и проектных институтов.

## Оглавление

Введение .....	5
1. Разряды в газах.....	6
1.1. Конфигурация электрических полей .....	6
1.2. Ионизационные процессы в газе.....	8
1.3. Виды ионизации.....	10
1.4. Лавина электронов.....	14
1.5. Условие самостоятельности разряда .....	16
1.6. Образование стримера.....	17
1.7. Закон Пашена .....	18
1.8. Разряд в неоднородных полях .....	21
1.9. Эффект полярности .....	23
1.10. Барьерный эффект .....	25
1.11. Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции (вольт- секундная характеристика — ВСХ).....	27
1.12. Коронный разряд .....	30
1.13. Потери энергии при коронировании.....	33
1.14. Разряд в воздухе по поверхности изоляторов.....	35
1.15. Пробой жидких диэлектриков .....	41
1.16. Пробой твердой изоляции.....	49
2. Высоковольтная изоляция.....	56
2.1. Высоковольтные изоляторы .....	56
2.2. Изоляция высоковольтных конденсаторов .....	60
2.3. Изоляция трансформаторов .....	61
2.4. Изоляция кабелей.....	62
2.5. Изоляция электрических машин .....	63
2.6. Профилактика изоляции.....	64
3. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения .....	74
3.1. Установки для получения высоких переменных напряжений.....	74
3.2. Установки для получения высоких постоянных напряжений .....	75
3.2.1. Каскадный генератор постоянного тока .....	78
3.3. Импульсные испытательные установки .....	78
3.3.1. Генератор импульсных токов (ГИТ) .....	80
3.4. Измерение высоких напряжений .....	80
3.4.1. Шаровые разрядники .....	80
3.4.2. Электростатические вольтметры .....	82
3.4.3. Делители напряжения (ДН) .....	83
3.4.3.1. Омический делитель ( $R_1 \gg R_2$ ) .....	83
3.4.3.2. Емкостный делитель ( $C_2 \gg C_1$ ) .....	84
3.4.3.3. Смешанный делитель напряжения .....	84

4. Перенапряжения и защита от них .....	86
4.1. Классификация перенапряжений .....	86
4.2. Внутренние перенапряжения .....	87
4.3. Грозозащита воздушных линий электропередач и подстанций ....	88
4.3.1. Защита от прямых ударов молнии .....	89
4.3.2. Зона защиты стержневого молниеотвода.....	89
4.3.3. Зона защиты тросового молниеотвода .....	90
4.3.3. Грозоупорность объектов (ВЛ) .....	92
4.4. Средства защиты от перенапряжений .....	93
4.5. Волновые процессы в линиях .....	95
4.5.1. Преломление и отражение волн в узловых точках .....	95
4.5.2. Перенапряжения при несимметричном отключении фаз....	97
4.6. Волновые процессы в обмотках трансформаторов .....	101
4.6.1. Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформаторов .....	102
4.6.2. Установившийся режим (или принужденный режим) .....	103
4.6.3. Переходный процесс .....	104
4.6.4. Распределение напряжения вдоль обмоток 3-х фазного трансформатора .....	105
4.6.4.1. Звезда с заземленной нейтралью.....	106
4.6.4.2. Звезда с изолированной нейтралью .....	106
4.6.4.3. Соединение обмоток треугольником .....	108
4.6.5. Передача волн перенапряжения из одной обмотки в другую.....	109
4.7. Перенапряжения при отключении ненагруженных ЛЭП и батарей конденсаторов .....	111
4.7.1. Отключение ненагруженных ВЛ .....	111
4.7.2. Отключение батарей конденсаторов .....	113
4.7.3. Дугогасящие аппараты .....	114
Заключение .....	116
Литература .....	117
Дополнительная .....	117

## Введение

Техника высоких напряжений (ТВН) возникла в связи с необходимостью электропередачи больших электрических мощностей на дальние расстояния. В 1880 году профессор Петербургского лесного института Д. А. Лачинов разработал и изложил теорию передачи электроэнергии на большие расстояния — повышение напряжения и уменьшение тока по мере увеличения дальности и передаваемой мощности.

Соответственно запросам энергетики развивалась техника высоких напряжений. Потребовалось создание промышленных высоковольтных установок переменного, постоянного и импульсного напряжений, а также установок для проведения исследований и испытаний изоляции при воздействии различных видов высокого напряжения. Повышение уровня напряжений требовало изучения физических явлений, механизмов воздействия электромагнитных полей высокого напряжения на изоляцию в различных условиях эксплуатации.

В настоящее время номинальное напряжение ЛЭП достигает 1 150 000 В, а передаваемая мощность по одной цепи такой линии составляет 6 Гигаватт. Общая протяженность электрических сетей в России с номинальным напряжением 35–1150 кВ превосходит 800 000 км. Чрезвычайно большое значение при этом приобретают вопросы создания и эксплуатации комплекса оборудования, необходимого для генерирования, передачи, преобразования и распределения электрической энергии: генераторов, трансформаторов, воздушных и кабельных линий, конденсаторов и др. аппаратов.

Высокие напряжения широко используются в электротехнологиях: окраска, электрофильтры, очистка воды, электрогидравлические и электроимпульсные технологии — бурение, дробление, резание горных пород и др.; в электрофизических установках — управляемый термоядерный синтез, ускорители, лазеры и др.

Курс лекций состоит из 4-х крупных разделов:

1. Разряды в диэлектриках.
2. Высоковольтная изоляция.
3. Высоковольтное оборудование и измерения.
4. Перенапряжения и защита от них.

Поскольку основной причиной выхода из строя высоковольтного оборудования являются отказы изоляции, то наибольшие усилия направляются на сохранение ее в целостности. И здесь особую роль играет знание закономерностей зарождения и развития разрядов в диэлектриках (в изоляции).

В высоковольтном оборудовании используются газообразные, жидкие, твердые изоляционные материалы и их комбинации.

Изоляция разделяется на внешнюю (воздух и все, что находится в воздухе) и внутреннюю (эта изоляция отделена от окружающей среды корпусами и может быть газообразной, жидкой, твердой, комбинированной).

## 1. Разряды в газах

Воздух до сих пор остается основным видом внешней изоляции линий электропередачи, энергетического оборудования и высоковольтной техники. Традиционный путь создания изоляционных конструкций, включающий их полномасштабные натурные испытания еще на поисковом этапе работы, с увеличением номинальных напряжений становятся все менее перспективным. Техника испытаний становится трудоемкой и требует все больше временных и материальных затрат. В связи с этим возникает потребность в численных оценках электрической прочности воздушных промежутков на основе расчетных моделей, достоверно отражающих закономерности развития разряда в воздухе.

### 1.1. Конфигурация электрических полей

Диэлектрики служат для изоляции токоведущих электродов разной полярности друг от друга. Изолируемые электроды (шины распределительных устройств, провода линий электропередач, наружные токоведущие части электрических аппаратов и т. п.) создают электрические поля различной конфигурации.

От формы электрического поля зависит электрическая прочность и пробивное напряжение. Формы электрических полей подразделяются на однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные. Типичными примерами однородного поля является поле между двумя плоскопараллельными электродами и электродами Роговского, слабонеоднородное поле реализуется в системе электродов шар-шар (рис. 1.1) при расстоянии между электродами  $S$  меньше диаметра шара  $D$  ( $S < D$ ), резконеоднородное поле — при электродах стержень-плоскость или стержень-стержень. Степень неоднородности электрического поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности  $K_H$ , который равен отношению максимальной напряженности электрического поля  $E_{\text{макс}}$  к средней напряженности  $E_{\text{ср}}$  между электродами, т. е.

$$K_H = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}}. \quad (1.1)$$

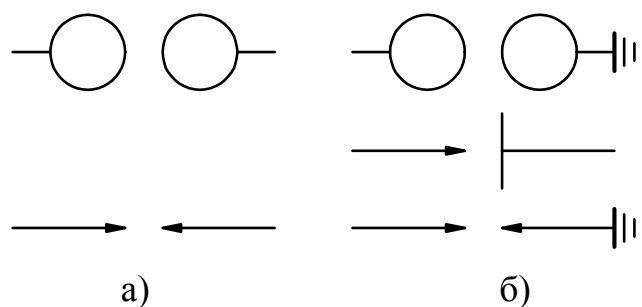


Рис. 1.1. Формы электрических полей: а — симметричная система электродов; б — несимметричная система электродов

Средняя напряженность есть отношение напряжения, приложенного к электродам,  $U$ , к расстоянию между электродами,  $S$ ,

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S}. \quad (1.2)$$

Максимальная напряженность зависит от приложенного к электродам напряжения, конфигурации, размеров электродов и расстояния между ними. Например, для коаксиальных цилиндров (кабель) (рис. 1.2) максимальная напряженность определяется, как

$$E_{\text{макс}} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}, \quad (1.3)$$

а средняя напряженность

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{R - r}, \quad (1.4)$$

где

$U$  — приложенное напряжение, кВ;

$r$  — внешний радиус внутреннего цилиндра (жила кабеля), см;

$R$  — внутренний радиус наружного цилиндра (оплетка кабеля), см.

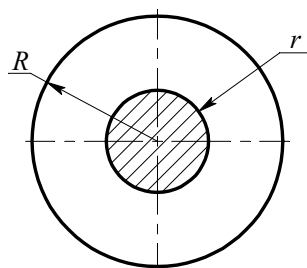


Рис. 1.2. Схема коаксиальных электродов

Подставив (1.3) и (1.4) в (1.1), получим:

$$K_H = \frac{R-r}{r \ln \frac{R}{r}}, \quad (1.5)$$

т. е.  $K_H$  зависит от геометрических размеров электродов.

Для однородного поля коэффициент неоднородности  $K_H = 1$ , для слабонеоднородного —  $K_H \leq 3$ , для резконеоднородного —  $K_H > 3$ .

Кроме этого различают симметричную и несимметричную систему электродов. Симметричная форма — электроды имеют одинаковую форму и размеры и отсутствует заземление какого-либо из них (рис. 1.1, а). Несимметричная форма — электроды имеют отличающуюся конфигурацию, размеры или один из них заземлен (рис. 1.1, б). Пробивные напряжения в несимметричной системе электродов ниже, чем в симметричной.

## 1.2. Ионизационные процессы в газе

В отсутствие внешнего электрического поля частицы газа находятся в состоянии хаотического (теплого) движения, постоянно сталкиваясь с другими частицами. Если на единице длины пути частица испытала  $Z$  столкновений, то средняя длина ее свободного пробега  $\lambda$  равна:

$$\lambda = \frac{1}{Z}. \quad (1.6)$$

Значение  $\lambda$  зависит от концентрации частиц и, следовательно, от давления и температуры газа. С увеличением давления и уменьшением температуры  $\lambda$  уменьшается. Частицы газа при тепловом движении перемещаются беспорядочно. Наличие внешнего электрического поля приводит к возникновению направленного движения заряженных частиц, если таковые имеются, т. е. к появлению в газе электрического тока. Подвижность частицы в электрическом поле зависит от ее массы: чем больше масса частицы, тем меньше ее подвижность.

При рассмотрении процессов возникновения и исчезновения заряженных частиц в газе можно считать электроны частицами и не учитывать их волновые свойства. Когда электроны находятся на наименьших стационарных орбитах, то потенциальная энергия атома минимальна. Такое состояние атома является устойчивым и называется нормальным. Переход одного или нескольких электронов с нормальных орбит на более удаленные от ядра называется возбуждением атома. Энергию, необходимую для возбуждения, атом (молекула) может получить при столкновении с другой частицей или при поглощении коротковолнового излучения (фотовозбуждение). Время пребывания атома в



возбужденном состоянии составляет  $\sim 10^{-10}$  с. Возвращение атома в нормальное состояние происходит самопроизвольно и сопровождается излучением фотона.

Когда электрон удаляется от ядра настолько, что взаимодействие его с ядром практически исчезает, то электрон становится свободным. Происходит ионизация атома, в результате которой образуются две независимые частицы: электрон и положительный ион. Энергия, поглощенная атомом, называется энергией ионизации. Энергия возбуждения и ионизации выражается в электронвольтах (эВ). Минимальные энергии возбуждения и ионизации некоторых содержащихся в воздухе газов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Энергии возбуждения и ионизации газов

Газ	Минимальная энергия, эВ	
	возбуждения	ионизации
N <sub>2</sub>	6,1	15,5
N	6,3	14,5
O	7,9	12,5
O <sub>2</sub>	9,1	13,6
H <sub>2</sub> O	7,6	12,7

Одновременно с ионизацией атомов и молекул газа происходит процесс взаимной нейтрализации заряженных частиц — рекомбинация. Вследствие действия двух противоположных факторов — ионизация и рекомбинация — устанавливается равновесное состояние, при котором в единицу времени возникает и рекомбинирует определенное количество заряженных частиц. Это равновесное состояние характеризуется определенной степенью ионизации газа, т. е. отношением концентрации ионизованных частиц к общей концентрации частиц.

$$K_{\text{ион}} = \frac{n_{\text{ион}}}{N_{\Sigma}}, \quad (1.7)$$

где

$K_{\text{ион}}$  — коэффициент степени ионизации газа;

$n_{\text{ион}}$  — концентрация ионизованных частиц;

$N_{\Sigma}$  — общая концентрация частиц ( $N_{\Sigma} \approx 10^{22}$  атомов на см<sup>3</sup>).

Газ, в котором значительная часть атомов и молекул ионизирована, называется плазмой ( $n_{\text{ион}} \geq 10^{12} \div 10^{14}$  ионов на см<sup>3</sup>).

Концентрация положительных и отрицательных зарядов в плазме примерно одинакова. Плазма — форма существования вещества при температуре примерно 5000 К и выше.

При столкновении электронов с нейтральным атомом или молекулой возможен захват ими электрона и образование отрицательного иона. Газы, в которых возможно образование отрицательных ионов, называются электроотрицательными (кислород, хлор, пары воды и др.), а газы, в которых отрицательные ионы не образуются — электроположительными (азот, гелий).

### 1.3. Виды ионизации

Различают объемную и поверхностную ионизации. Объемная ионизация — образование заряженных частиц в объеме газа между электродами. Поверхностная ионизация — излучение (эмиссия) заряженных частиц с поверхности электродов.

Объемная ионизация подразделяется:

- 1) ударная ионизация;
- 2) ступенчатая ионизация;
- 3) фотоионизация;
- 4) термоионизация.

Ударная ионизация — соударение электрона с нейтральным атомом или молекулой. Если к промежутку между электродами в газе приложено напряжение, то заряженные частицы кроме тепловой скорости приобретают под действием электрического поля направленную скорость

$$V = kE, \quad (1.8)$$

где

$V$  — скорость, см / с;

$k$  — коэффициент пропорциональности, получивший название "подвижность" — скорость дрейфа заряженной частицы в электрическом поле с  $E = 1$  В / см, [ $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ ] — размерность подвижности  $k$ ]:

$$k_{\text{эл}} \approx 400 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \text{ — подвижность электронов;}$$

$$k_{\text{ион}} \approx 2 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \text{ — подвижность ионов;}$$

$E$  — напряженность внешнего электрического поля, В / см.

При этом кинетическая энергия частиц может быть существенно больше тепловой энергии и достаточной для осуществления ударной ионизации нейтральных частиц. Условие ионизации может быть записано в виде:

$$\frac{m \cdot V^2}{2} \geq W_{\text{и}} \quad (1.9)$$

где

$m$  — эффективная масса заряженной частицы, кг ( $m_{эл} = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг — эффективная масса электрона;  $m_{прот} = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг — эффективная масса протона);

$V$  — скорость движения заряженной частицы, м / с;

$W_{и}$  — энергия ионизации нейтрального атома или молекулы, эВ.

Так как скорость электронов значительно больше скорости ионов, то ударная ионизация ионами малоэффективна и определяющей является ударная ионизация электронами.

На рис. 1.3, а приведена схема ударной ионизации электроном. Условием ударной ионизации электроном является:

$$\frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} \geq W_{и},$$

где

$m_1$  — масса электрона;

$V_1$  — скорость электрона;

$W_{и}$  — энергия ионизации молекулы (атома).

Ступенчатая ионизация происходит тогда, когда энергия первого воздействующего на нейтральный атом или молекулу электрона приводит атом только в возбужденное состояние, т. е. энергия электрона недостаточна для ионизации. Воздействие второго электрона на возбужденный атом или молекулу приводит к ионизации. Время между воздействием первого и второго электронов должно быть не более времени нахождения нейтрального атома или молекулы в возбужденном состоянии. На рис. 1.3, б, приведена схема ступенчатой ионизации. Условием ступенчатой ионизации является:

$$\frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_1 \cdot V_3^2}{2} \geq W_{и},$$

где

$m_1$  — масса электрона;

$V_1, V_3$  — скорости электронов;

$W_{и}$  — энергия ионизации молекулы (атома).

Для осуществления фотоионизации в объеме газа энергия фотонов, излучаемая возбужденными атомами или молекулами, должна быть больше энергии ионизации при поглощении фотона нейтральным атомом или молекулой. Этот процесс успешно осуществляется в смеси газов (воздух). При фотоионизации возможна и ступенчатая ионизация. На рис. 1.3, в, показана схема фотоионизации.

Условием фотоионизации является

$$h\nu \geq W_{и},$$

где

$h$  — постоянная Планка,

$\nu$  — собственная частота фотона.

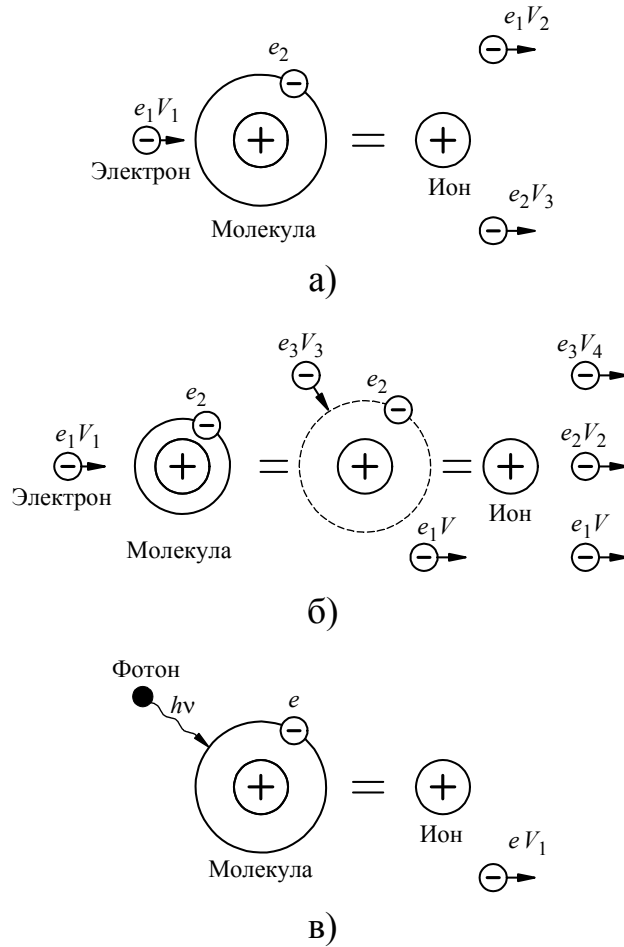


Рис. 1.3. Схемы объемной ионизации газа: а) ударная ионизация, б) ступенчатая ионизация, в) фотоионизация;  $e$  — элементарный заряд электрона ( $e=1,6 \times 10^{-19}$  Кл),  $m$  — масса заряженной частицы

Термоионизация обусловлена тепловым состоянием газа и может происходить в результате следующих актов:

- 1) освобождение электрона при соударениях между атомами и молекулами при высоких температурах;
- 2) фотоионизация нейтральных атомов и молекул, возбужденных в результате теплового взаимодействия при высоких температурах;
- 3) ионизация при столкновении электрона с нейтральным атомом или молекулой при высоких температурах.

В газе при тепловом движении происходит диссоциация молекул раньше, чем произойдет ионизация, т. к. энергия диссоциации меньше, чем энергия ионизации. В табл. 1.2 в качестве примера приведены энергия диссоциации и ионизации для некоторых газов.

## Энергии диссоциации и ионизации

Молекула	Энергия диссоциации, эВ	Атом	Энергия ионизации, эВ
O <sub>2</sub>	5,17	O	13,6
N <sub>2</sub>	9,77	N	14,5

Поверхностная ионизация (эмиссия электронов) осуществляется за счет:

1) бомбардировки поверхности катода положительными ионами — вторичная электронная эмиссия (схема приведена на рис. 1.4 а); условие для выхода электрона с поверхности:

$$\frac{m_{\text{ион}} \cdot V_{\text{ион}}^2}{2} \geq W_{\text{вых}},$$

где

$m_{\text{ион}}$  — масса иона;

$V_{\text{ион}}$  — скорость иона;

$W_{\text{вых}}$  — энергия выхода электрона.

2) лучистой энергии, облучающей катод, — ультрафиолетовый свет, рентген, излучения возбужденных атомов и молекул в объеме газа между электродами — фотоэмиссия (схема приведена на рис. 1.4, б); при этом, условие для выхода электрона с поверхности:

$$h\nu \geq W_{\text{вых}},$$

где

$h$  — постоянная Планка;

$\nu$  — частота излучения фотона;

$W_{\text{вых}}$  — энергия выхода электрона.

3) нагрева поверхности катода — термоэлектронная эмиссия (схема приведена на рис. 1.4, в);

4) энергии внешнего электрического поля — автоэлектронная или холодная эмиссия (схема приведена на рис. 1.4, г) возможна при напряженности электрического поля более  $3 \cdot 10^2$  кВ / см.

Для реализации поверхностной ионизации необходимо, чтобы энергия воздействия была больше энергии выхода электрона из катода  $W_{\text{вых}}$ . Энергия  $W_{\text{вых}}$  ниже энергии объемной ионизации газа примерно в 2 раза и более и зависит от материала электрода. Для медных и стальных электродов в воздухе работа выхода составляет  $W_{\text{вых}} = 4,5$  эВ (сравни с табл. 1.2).

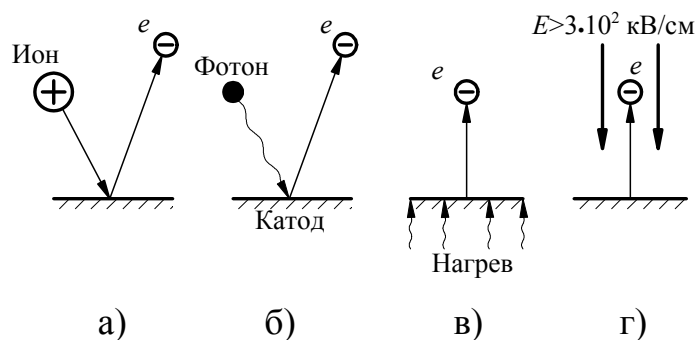


Рис. 1.4. Схемы поверхностной ионизации: а) ионизация ионом, б) ионизация квантом света, в) термоионизация, г) автоэлектронная ионизация

#### 1.4. Лавина электронов

Если в газе между двумя электродами, образующими однородное поле, появляется свободный электрон, то двигаясь к аноду при достаточной напряженности электрического поля он может ионизировать атом или молекулу газа при столкновении (рис. 1.3, а). В результате этого появляется новый (еще один) электрон и положительный ион. Этот электрон вместе с начальным ионизируют новые атомы и молекулы, и число свободных электронов непрерывно нарастает. Этот процесс получил название лавины электронов.

Интенсивность размножения электронов в лавине характеризуется коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$ , равным числу ионизаций производимых электроном на пути в 1 см по направлению действия электрического поля. Другое название коэффициента ударной ионизации — первый коэффициент Таунсенда.

В процессе развития лавины одновременно с электронами образуются положительные ионы. Подвижность ионов значительно меньше, чем электронов, и за время развития лавины они практически не успевают переместиться в промежутке к катоду. Таким образом, после прохождения лавины электронов в газе остаются положительные, а в электроотрицательных газах и отрицательные ионы, которые искажают (уменьшают или увеличивают) внешнее электрическое поле в промежутке. На рис. 1.5 приведено распределение напряженности электрического поля в промежутке при прохождении его лавиной электронов. Видно, что напряженность электрического поля на фронте лавины возрастает, в средней части, где находятся остающиеся положительные ионы, уменьшается, а вблизи катода вновь незначительно увеличивается.

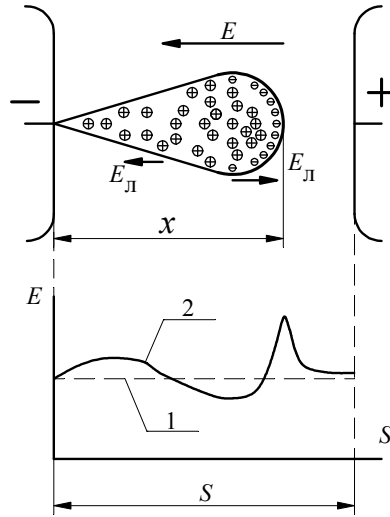


Рис. 1.5. Искажение электрического поля в промежутке, создаваемое лавиной: 1 — средняя напряженность без лавины; 2 — результирующая напряженность

Для описания лавинного процесса необходимо определить число электронов в лавине. Предположим, что из катода за счет внешнего ионизатора вырывается  $n_0$  электронов (например  $n_0 = 1$ ). На расстоянии  $x$  от катода число электронов возросло до  $n$  (рис. 1.6). Увеличение числа электронов  $dn$  на пути  $dx$  будет равно:

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx, \quad (1.11)$$

или

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx. \quad (1.12)$$

Интегрируя (1.12) по  $n$  от 1 до  $n$  и по  $x$  от 0 до  $x$ , получим:

$$\int_1^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx. \quad (1.13)$$

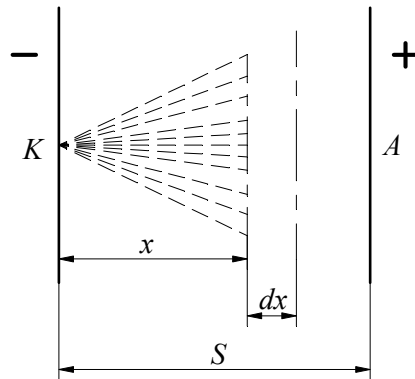


Рис. 1.6. Схема определения числа электронов в лавине

В однородном поле, где коэффициент ударной ионизации  $\alpha = \text{const}$ , т. к. напряженность в любой точке промежутка одинакова, будем иметь:

$$\ln n = \alpha \cdot x, \quad (1.14)$$

или

$$n = e^{\alpha \cdot x}. \quad (1.14a)$$

Выражение (1.14) дает значение электронов в лавине без учета их прилипания к нейтральным атомам и молекулам. Это явление характеризуется коэффициентом прилипания  $\eta$ . Коэффициент прилипания зависит от рода газа (электроотрицательный или электроположительный). Тогда число электронов в лавине с учетом прилипания будет равно:

$$n = e^{(\alpha - \eta) \cdot x}. \quad (1.15)$$

Если  $n_0$  больше 1, тогда (1.15) будет иметь вид:

$$n = n_0 \cdot e^{(\alpha - \eta) \cdot x}. \quad (1.16)$$

Число электронов в лавине  $n > 10^7$ .

### 1.5. Условие самостоятельности разряда

После прохождения первой лавины в промежутке лавинный процесс может возобновляться, а может и затухнуть. Для возобновления лавинного процесса нужен хотя бы один вторичный эффективный электрон. Если этот электрон получается в результате внешнего ионизатора — разряд называется несамостоятельным. То есть, если убрать внешний ионизатор, то лавинный процесс не возобновится и разряд затухнет. Если же вторичный эффективный электрон возникает в результате прохождения первичной лавины — разряд называется самостоятельным. Разряд из несамостоятельного может перейти в самостоятельный, если увеличить приложенное к электродам напряжение.

При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку сама первичная лавина (и последующие вторичные тоже) создает условие для возобновления процесса. Условия возобновления:

1) оставшееся после прохождения лавины положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и вызывают эмиссию электронов из катода;

2) возбужденные атомы и молекулы, образующиеся наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к фотоэмиссии электронов из ка-



тогда. Образующиеся таким образом вторичные электроны приводят снова к образованию лавин в разрядном промежутке.

Количество положительных ионов, оставшихся в промежутке после прохождения лавины, равно количеству электронов в лавине (1.15), исключая начальный электрон, т. е.:

$$n_{\text{И}}^+ = e^{(\alpha-\eta) \cdot S} - 1. \quad (1.17)$$

Электроны, выбитые из катода, не все участвуют в образовании вторичных лавин. Часть электронов рекомбинирует с положительными ионами. Суммарный процесс образования вторичных электронов из катода характеризуется коэффициентом вторичной ионизации  $\gamma$  — второй коэффициент Таунсенда. Коэффициент  $\gamma$  зависит от материала катода, состава и давления газа и всегда  $\gamma \ll 1$ . Количество вторичных электронов, образованных после прохождения первичной лавины при самостоятельной форме разряда, должно быть не менее:

$$\gamma \cdot (e^{(\alpha-\eta) \cdot S} - 1) \geq 1. \quad (1.18)$$

Уравнение (1.18) есть условие самостоятельности развития разряда в газовом промежутке. Оно показывает, что в результате прохождения первичной лавины необходимо образование, как минимум, одного **эффektivного** электрона, способного зажечь вторичную лавину.

## 1.6. Образование стримера

В процессе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов. С увеличением числа электронов в головке лавины возрастает напряженность на фронте лавины (рис. 1.5). На хвосте лавины напряженность понижена. Электроны в головке лавины останавливаются и могут рекомбинировать с ионами. При рекомбинации излучаются фотоны, которые способны вблизи хвоста первичной лавины ионизовать нейтральные молекулы, образуя вторичные лавины.

Вторичные лавины, следуя по силовым линиям и имея на головке избыточный отрицательный заряд (электроны), втягиваются в область положительного объемного заряда, оставленного первичной лавиной. Электроны вторичных лавин смешиваются с положительными ионами первичной лавины и образуют стример — область с наибольшей плотностью тока, которая, разогреваясь начинает светиться, а наибольшая концентрация частиц (плотность тока) образуется вблизи катода. Для фотоионизации в объеме газа энергия фотонов должна быть больше энергии ионизации. Этот процесс успешно осуществляется в смесях газов содержащих компоненты с относительно низкой энергией ионизации.

ции (в том числе и в воздухе). Бомбардировка катода положительными ионами эффективна при низких давлениях газа.

Критерием перехода лавинного разряда в стримерный является критическое число электронов в лавине. Расчеты показывают, что при числе электронов  $n_{кр} \geq 10^7 - 10^9$  лавина переходит в стример. Для накопления такого количества электронов лавина должна пройти определенное критическое расстояние  $x_{кр}$ . Следовательно, с увеличением расстояния между электродами свыше  $x_{кр}$  лавина неизбежно перейдет в стримерную форму развития разряда. Необходимо отметить, что  $x_{кр}$  зависит от давления газа и его состава. Картина образования стримера приведена на рис. 1.7.

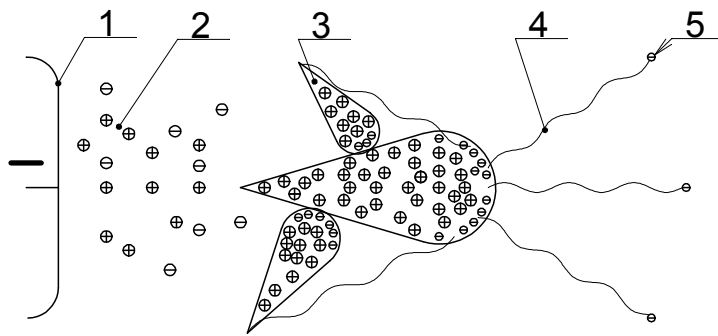


Рис. 1.7. Механизм развития катодного стримера: 1 — электрод-катод, 2 — канал стримера, 3 — лавины, 4 — движение фотонов, 5 — электрон за счет фотоионизации

### 1.7. Закон Пашена

Выполнение условия самостоятельности разряда (1.18) в однородном поле означает пробой всего промежутка, приняв  $\eta = 0$  и приравняв (1.18) единице, получим:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot S} - 1) = 1 \quad (1.19)$$

или

$$e^{\alpha \cdot S} = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad (1.20)$$

Прологарифмируем (1.20) и преобразуем относительно  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{S} \quad (1.21)$$

Экспериментально установлено:

$$\alpha = A_0 P e^{-\frac{B_0 P}{E}}, \quad (1.22)$$

где

$P$  — давление газа;

$E$  — напряженность электрического поля;

$A_0$  — коэффициент, зависящий от состава газа.

$$A_0 = \frac{\pi \cdot r^2}{kT},$$

где

$r$  — радиус молекул;

$k$  — постоянная Больцмана;

$T$  — температура в градусах Кельвина.

$B_0$  — коэффициент, зависящий от энергии ионизации газа,

$$B_0 = A_0 U_{\text{и}},$$

где

$U_{\text{и}}$  — потенциал ионизации газа.

Приравняв выражения для  $\alpha$  (1.21) и (1.22), получим:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 \cdot P \cdot S \cdot e^{-\frac{B_0 P}{E}}. \quad (1.23)$$

Подставив в (1.23)  $E = \frac{U}{S}$ , имеем

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 \cdot P \cdot S \cdot e^{-\frac{B_0 P \cdot S}{U}}$$

или

$$e^{\frac{B_0 P \cdot S}{U}} = \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (1.24)$$

Прологарифмируем (1.24), тогда:

$$\frac{B_0 \cdot P \cdot S}{U} = \ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (1.25)$$

Поскольку нас интересует напряжение, при котором произойдет пробой, приравняем  $U = U_{\text{ПР}}$ . Тогда из (1.25):

$$U_{\text{ПР}} = \frac{B_0 \cdot P \cdot S}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (1.26)$$

Из (1.26) видно, что при неизменной температуре разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления  $P$  на расстояние между электродами  $S$ , т. е.

$$U_{\text{ПР}} = f(P \cdot S).$$

Эту закономерность впервые экспериментально обнаружил Пашен. И выражение (1.26) называется законом Пашена. Графически эта закономерность представлена на рис. 1.8.

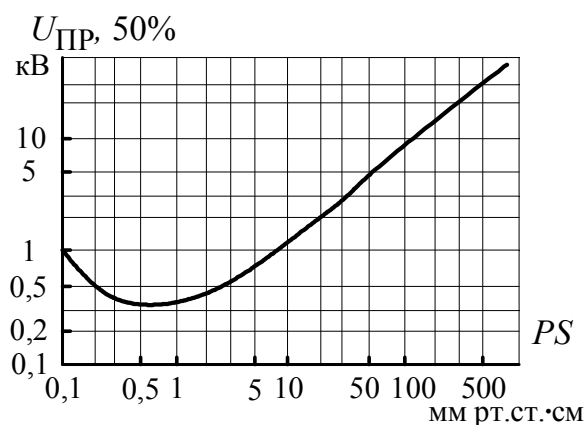


Рис. 1.8. Графическое отображение закона Пашена для воздуха

Вид этой зависимости можно объяснить, исходя из физических представлений. При  $S = \text{const}$  увеличение давления больше значения, соответствующего минимуму, приводит к увеличению числа столкновений электронов с нейтральными атомами и молекулами и, как следствие, к уменьшению его энергии накапливаемой на длине свободного пробега. Следовательно, для возникновения ударной ионизации необходимо увеличение напряжения  $U_{\text{ПР}}$ . С другой стороны, при давлениях меньших, чем соответствующее минимуму значения, увеличивается длина свободного пробега и накапливаемая электроном энергия, но уменьшается количество столкновений, что уменьшает вероятность ударной ионизации. Для ее увеличения необходимо, чтобы как можно большее число столкновений заканчивалось ионизацией. Для этого необходимо увеличивать энергию электрона на длине свободного пробега, т. е. увеличивать  $U_{\text{ПР}}$ .

Закон Пашена в виде формулы (1.26) справедлив при нормальной температуре. Изменение температуры действует обратно изменению давления и должно учитываться при расчетах. В общем виде с учетом изменения температуры закон Пашена запишется:

$$U_{\text{ПР}} = f\left(\frac{P \cdot S}{T}\right)$$

или

$$U_{\text{ПР}} = f(\delta \cdot S),$$

где

$$\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,386 \frac{P}{T},$$

$T$  — температура в градусах Кельвина.

$$\text{Тогда } U_{\text{ПР Д}} = U_{\text{ПР Р}} \cdot \delta,$$

где

$U_{\text{ПР Д}}$  — пробивное напряжение, приведенное к действительным условиям измерения;

$U_{\text{ПР Р}}$  — пробивное напряжение, полученное при расчете по формуле Пашена.

Экспериментальная кривая Пашена отличается от расчетной как в области очень малых значений  $PS$ , так и в области очень больших. В области очень малых значений  $PS$  отличие объясняется приближением к вакуумному пробую, при котором основную роль играют процессы на поверхности электродов, а не в объеме газа. При больших значениях  $PS$  отличие объясняется увеличением напряженности электрического поля на микровыступах электродов и увеличением вероятности возникновения лавин, что снижает  $U_{\text{ПР}}$ .

На основании закона Пашена могут быть предложены способы повышения пробивного напряжения газов:

- 1) увеличение давления больше атмосферного;
- 2) уменьшение давления до значений меньших, чем давление соответствующее минимуму, вплоть до вакуума.

### 1.8. Разряд в неоднородных полях

В неоднородном поле в отличие от однородного напряженность поля в различных точках промежутка разная по величине или по направлению. К типичным промежуткам с неоднородным полем относятся стержень - стержень, стержень - плоскость, провод - земля и многие другие реальные изоляционные промежутки.

На рис. 1.9 приведены зависимости напряженностей от расстояния между электродами типа стержень - плоскость.

Основные закономерности развития разряда в любых резконеоднородных полях ( $K_H > 4$ ) практически одинаковы. При некотором начальном напряжении  $U_H$  в промежутке возникает самостоятельный разряд в лавинной форме, т.к. вблизи стержня имеется область с напряженностью, превышающей значение  $E_H^*$ , соответствующее возникновению самостоятельной формы разряда (рис. 1.9). Разряд локализуется в этой области, а вторичные лавины поддерживаются либо за счет фотоионизации из объема газа (при положительной полярности стержня), либо за счет фотоэмиссии или автоэлектронной (холодной) эмиссии с катода (при отрицательной полярности стержня). Такой разряд называется коронным разрядом в лавинной форме. Значение напряжения и напряженности поля на электроде при возникновении коронного разряда зависит от степени неоднородности поля. С увеличением степени неоднородности напряженность на электроде-стержне увеличивается, а напряжение возникновения короны уменьшается.

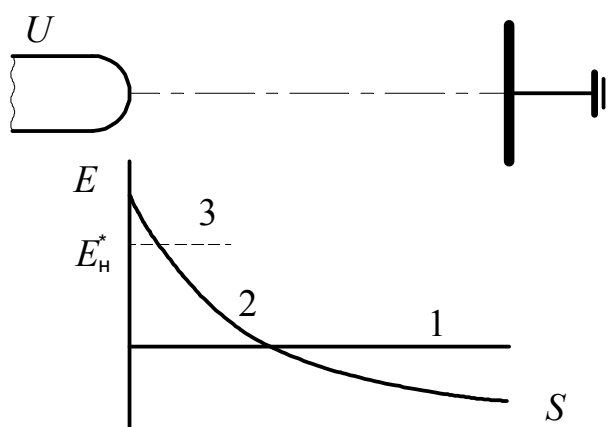


Рис. 1.9. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами типа стержень-плоскость: 1 —  $E_{CP} = f(S)$ ; 2 —  $E_{МАКС} = f(S)$ ; 3 —  $E_H^*$  — напряженность возникновения самостоятельной формы разряда

При увеличении напряжения свыше  $U_H$ , когда количество электронов в лавине возрастает до  $10^7$  —  $10^9$ , она переходит в плазменное состояние и в промежутке возникает стример у электрода с повышенной напряженностью поля. Если в однородном поле возникший стример пересекает весь межэлектродный промежуток, то в резконеоднородном поле в зависимости от величины напряжения стример, пройдя некоторое расстояние, может остановиться. При этом плазма его распадается-

ся, но вблизи острия возникают новые стримеры, которые также останавливаются и их плазма распадается.

Такое состояние разряда устойчивое, т.к. при этом выполняется условие самостоятельности разряда. Этот случай, когда стримеры не достигают противоположного электрода, получил название коронного разряда в стримерной форме.

Для пробоя всего межэлектродного промежутка необходимо еще увеличить напряжение. Тогда образуется канал, который продвигается от электрода с повышенной напряженностью (острие) к противоположному электроду. При пересечении искровым каналом всего промежутка он преобразуется в электрическую дугу, что означает завершение пробоя. В резконеоднородных полях напряжение пробоя всегда больше напряжения возникновения коронного разряда в любой форме.

### 1.9. Эффект полярности

В слабонервномерных полях, где минимальный и средний градиенты напряжения мало отличаются друг от друга, коронное и разрядное напряжения практически совпадают друг с другом, влияние полярности невелико. В сильнонервномерном поле коронное напряжение намного ниже разрядного, полярность при несимметричных электродах существенно влияет на величину разрядного напряжения. В промежутке острие-плоскость формирование разряда зависит от полярности острия.

При положительной полярности острия, имеющиеся в промежутке электроны, двигаясь к острию в область сильного поля, совершают ударную ионизацию и образуют лавину электронов. Когда лавина доходит до острия, электроны лавины нейтрализуются на аноде, а положительные ионы вследствие малой скорости движения остаются у острия и создают положительный объемный заряд, который обладает собственным электрическим полем. Взаимодействуя с внешним полем в промежутке, положительный объемный заряд ослабляет поле вблизи острия и усиливает его в остальной части промежутка (рис. 1.10, а). Если напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина электронов справа от объемного заряда, электроны которой, смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают зародыш канала анодного стримера, заполненный плазмой. Зажигается стримерный коронный разряд. Положительные заряды этой лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве. Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера постепенно удлиняя его. Стример прорастает к катоду, вызывая пробой промежутка при сравнительно малой величине разрядного напряжения.

При отрицательной полярности острия электрическое поле непосредственно у острия приводит к эмиссии электронов с катода, которые сразу попадают в сильное поле и производят ударную ионизацию, образуя большое число лавин. Электроны лавин, перемещаясь в слабое поле у анода, теряют скорость, захватываются нейтральными молекулами, становятся отрицательными ионами, рассеянными в пространстве. Положительные ионы лавин образуют объемный заряд у острия, который, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать в остальной части промежутка (рис. 1.10, б). Увеличение поля у острия приводит к усилению эмиссии электронов с поверхности катода, которые, смешиваясь с положительным объемным зарядом, образуют у катода зародыш катодного стримера.

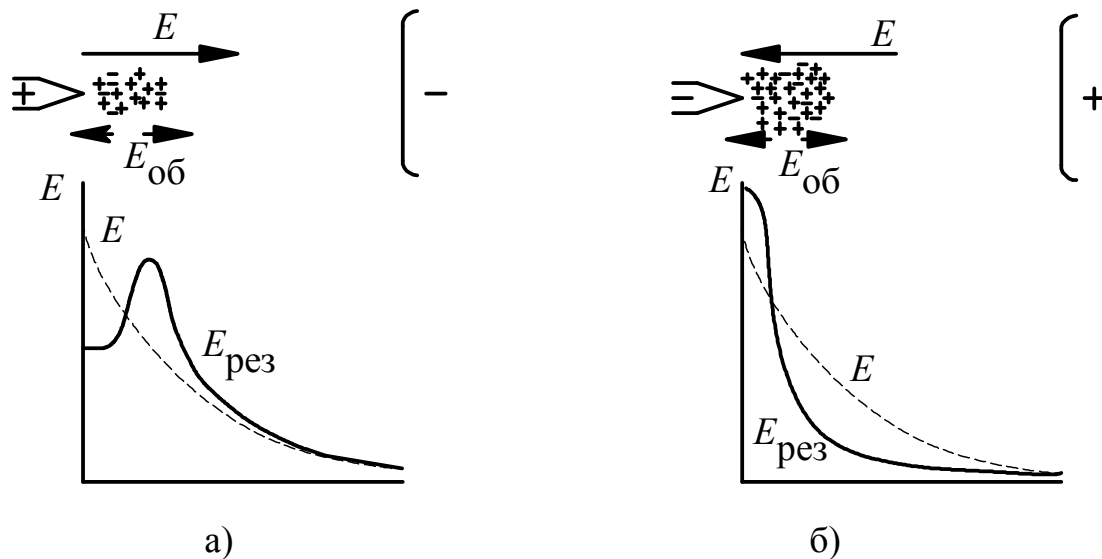


Рис. 1.10. Образование анодного а) и катодного б) стримера:  $E$  — напряженность внешнего поля;  $E_{об}$  — напряженность поля объемного положительного заряда;  $E_{рез}$  — результирующая напряженность в промежутке после ионизации

Вследствие большого числа начальных лавин у катода плазменный канал здесь представляет собой более или менее однородный слой с радиусом кривизны большим, чем у острия. Поэтому электрическое поле несколько выравнивается и напряженность во внешней области уменьшается.

Уменьшение напряженности электрического поля во внешнем пространстве приводит к тому, что для дальнейшей ионизации в этой части промежутка необходимо значительно увеличить разность потенциалов между электродами.

При дальнейшем увеличении напряжения происходит ионизация справа от плазменного слоя, большое число образующихся лавин приводит к удлинению стримера. Однако, так же, как и в начале, благо-



даря большому числу лавин головка стримера размыта, и возрастание напряженности на головке стримера оказывается гораздо меньшим, чем при положительном острие.

В силу рассмотренных выше особенностей развитие стримера при отрицательном острие происходит с большими трудностями, поэтому разрядное напряжение при отрицательной полярности острия больше, чем при положительной полярности (в 2–2,5 раза).

На переменном напряжении пробой происходит всегда на положительной полярности.

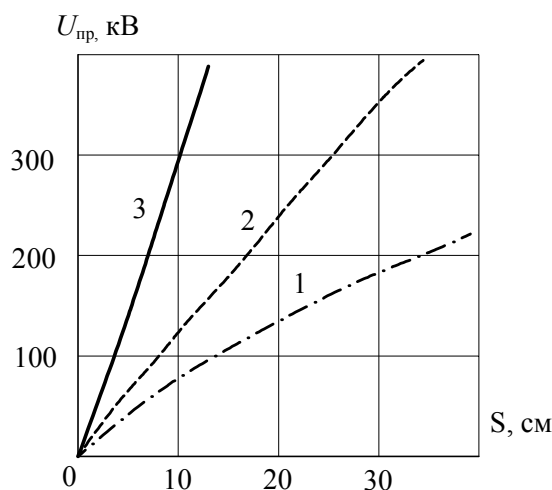


Рис. 1.11. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами стержень-плоскость на импульсном напряжении: 1 — положительная полярность острия; 2 — отрицательная полярность острия; 3 — однородное поле

### 1.10. Барьерный эффект

Существенное влияние объемного заряда на развитие разряда в промежутке с резконеровным полем используется на практике для увеличения разрядных напряжений изоляционных промежутков. Это увеличение достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика (электрокартон, гетинакс и др.). При положительном острие положительные ионы оседают на барьер и растекаются по его поверхности тем равномернее, чем дальше от острия расположен барьер. Это приводит к более равномерному распределению напряженности в промежутке между барьером и плоскостью (рис. 1.12, а) и, следовательно, к значительному увеличению разрядного напряжения.

При отрицательной полярности стержня электроны, двигаясь от острия, попадают на барьер, теряют скорость и большинство из них вместе с атомами кислорода становятся отрицательными ионами. На барьере в этом случае появляется концентрированный отрицательный заряд, увеличивающий напряженность поля не только между положи-

тельным объемным зарядом у острия и барьером, но и во внешнем пространстве (рис. 1.12, б). Поэтому при отрицательной полярности острия увеличение разрядного напряжения в промежутке при наличии барьера будет незначительным. При расположении барьера в средней части промежутка, разрядные напряжения при отрицательной и положительной полярностях близки. При расположении барьера в непосредственной близости от положительного острия роль его уменьшается вследствие резкой неравномерности распределения зарядов на барьере. Напряженность поля оказывается достаточной для того, чтобы ионизационные процессы проходили по другую сторону барьера. Барьер, расположенный в непосредственной близости от отрицательного острия, не способен задерживать быстрые электроны с острия, которые проходят сквозь барьер к плоскости.

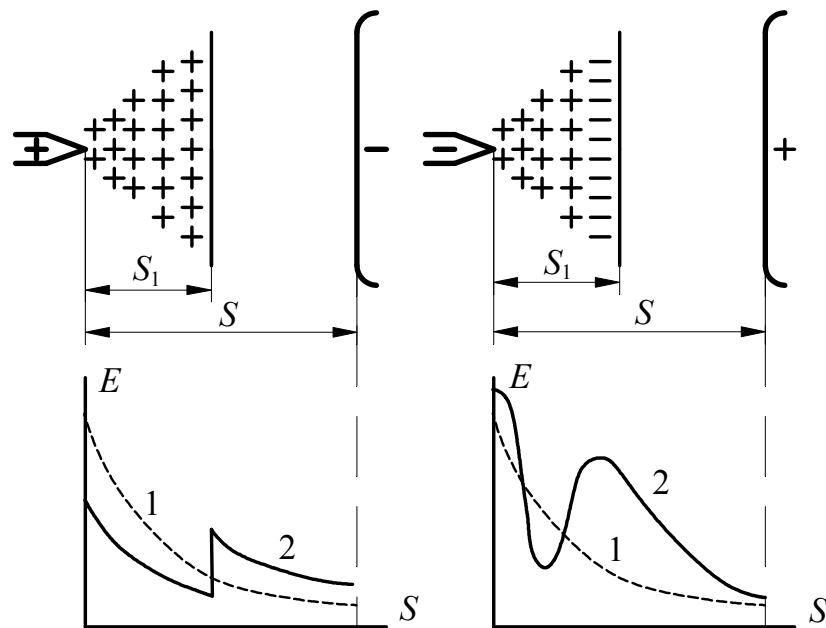


Рис. 1.12. Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера: а) — положительная полярность стержня; б) — отрицательная полярность стержня; 1 — распределение напряженности поля без барьера; 2 — распределение напряженности поля с барьером

Таким образом, барьеры в промежутке устанавливаются на таком оптимальном расстоянии от острия, при котором разрядные напряжения максимальны (25-30 % от длины промежутка между электродами), причем при положительной полярности острия разрядное напряжение может увеличиться в 2 раза по сравнению с промежутком без барьера (рис. 1.13).

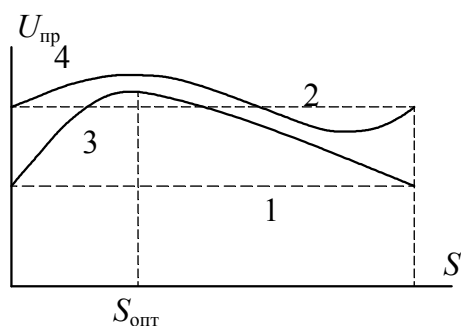


Рис. 1.13. Влияние барьера на пробивное напряжение газового промежутка при положительной (1, 3) и отрицательной (2, 4) полярностях напряжения: 1, 2 — пробивное напряжение промежутка без барьера; 3, 4 — пробивное напряжение промежутка с барьером

Барьеры широко используются в высоковольтных конструкциях, работающих как в воздухе, так и в масле (высоковольтные вводы, трансформаторы и др.). На переменном напряжении электрическая прочность на положительной полярности увеличивается и приближается к электрической прочности на отрицательной полярности.

### 1.11. Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции (вольт-секундная характеристика — ВСХ)

При кратковременных импульсах значение разрядного напряжения воздушных промежутков зависит от продолжительности воздействия. Если к промежутку приложено напряжение достаточное для пробоя, то для развития и завершения разряда в промежутке необходимо определенное время  $t_p$  называемое временем разряда (см. рис. 1.14).

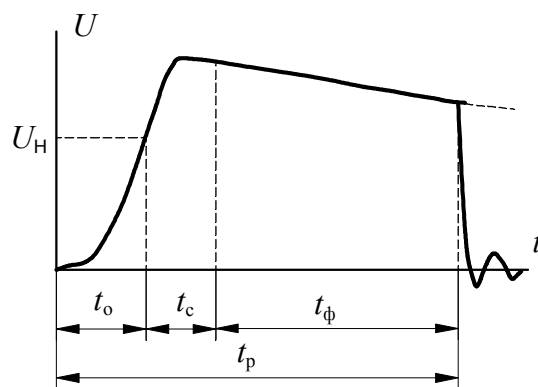


Рис. 1.14. Временная структура развития разряда на импульсном напряжении

Развитие самостоятельного разряда начинается с появления в промежутке эффективного начального электрона, что является случайным событием. Время ожидания эффективного электрона  $t_c$  подверже-

но разбросу и называется поэтому статистическим временем запаздывания разряда. Это первая составляющая времени разряда. Другой составляющей, имеющей также статистический характер является время формирования разряда  $t_{\phi}$ , т.е. время от момента появления начального электрона до завершения пробоя промежутка. Время  $t_c + t_{\phi} = t_z$  называют временем запаздывания развития разряда. При достаточно большой длительности фронта импульса имеет значение также время  $t_0$ , представляющее собой время подъема напряжения до значения  $U_H$ . Таким образом, в общем случае время разряда определяется как:

$$t_p = t_0 + t_c + t_{\phi}. \quad (1.27)$$

Составляющие времени разряда  $t_c$  и  $t_{\phi}$  зависят от значения напряжения на промежутке. При увеличении напряжения повышается вероятность того, что появляющиеся в промежутке электроны станут эффективными, и  $t_c$  уменьшается. Сокращается также и  $t_{\phi}$ , поскольку при большем напряжении возрастает интенсивность разрядных процессов и скорость продвижения канала разряда в промежутке. Поэтому чем выше разрядное напряжение, тем меньше время разряда.

Зависимость максимального напряжения разряда от времени действия импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляции. Поскольку начало и скорость развития ионизационных процессов зависят от значения напряжения, вольт-секундные характеристики зависят от формы импульса. С целью унификации испытаний и возможности сопоставления изоляционных конструкций установлен стандартный грозовой импульс с длительностью фронта (возрастания напряжения)  $\tau_{\phi} = 1,2 \pm 0,4$  мкс и длительностью импульса  $\tau_u = 50 \pm 10$  мкс и обозначается 1,2/50 мкс (рис. 1.15).

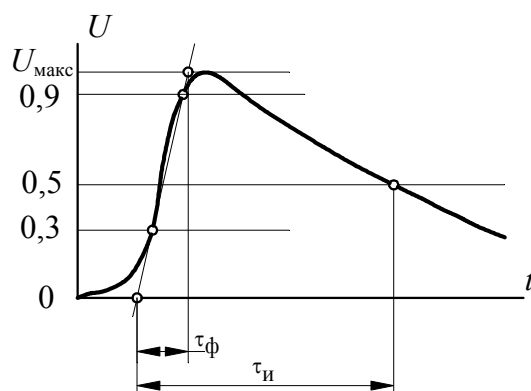


Рис. 1.15. Определение параметров импульса напряжения

Для экспериментального определения вольт-секундной характеристики к исследуемому промежутку прикладываются импульсы

стандартной формы. При каждом значении максимального напряжения импульса производится серия опытов. В силу статистического разброса времени разряда вольт-секундная характеристика получается в виде области точек (рис. 1.16), для которой указываются средняя кривая и границы разброса времени разряда.

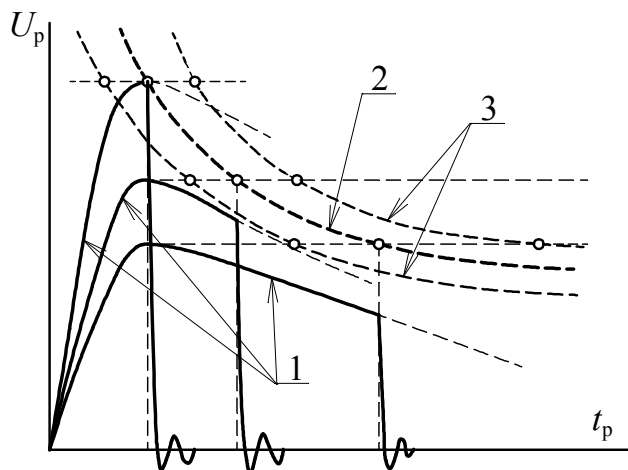


Рис. 1.16. Построение вольт-секундной характеристики изоляции по опытным данным (грозовые импульсы): 1 — импульс напряжения; 2 — кривая средних значений пробивного напряжения; 3 — границы разброса пробивных напряжений

Вид вольт-секундной характеристики зависит от степени неоднородности электрического поля в промежутке. Для промежутков с однородным или слабонеоднородным полем, вольт-секундная характеристика слабо зависит от  $t_p$  (рис. 1.17, кривая 1), и только при временах разряда порядка 1 мкс и меньше разрядное напряжение увеличивается. Связано это с тем, что разряд в таких промежутках формируется за весьма малое время при напряжении равном начальному значению и отсутствует корона. Отмеченные свойства вольт-секундной характеристики позволяют использовать промежуток между шаровыми электродами, создающими практически однородное поле, если расстояние между электродами меньше их радиуса, в качестве универсального прибора для измерения максимальных значений напряжения.

Вольт-секундные характеристики промежутков с резконеоднородным полем (рис. 1.17, кривая 2) имеют достаточно большую крутизну, поскольку в таких промежутках время формирования разряда сильно зависит от значения приложенного напряжения. Для таких промежутков при грозовых импульсах характерны большие разрядные напряжения  $U_p$ , чем при переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц. Отношение

$$K_{ИМП} = \frac{U_P}{U_{\sim}} \quad (1.28)$$

называется коэффициентом импульса.

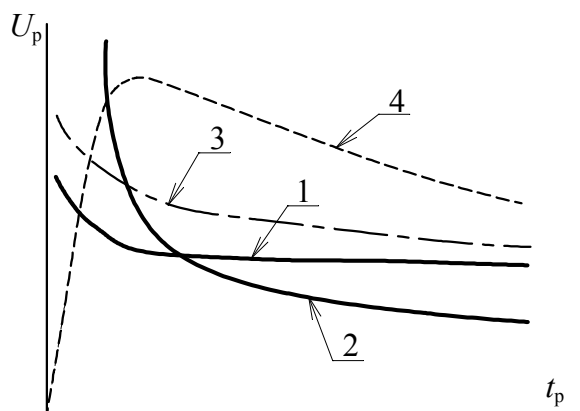


Рис. 1.17. ВСХ защитных разрядников и изоляции: 1 — ВСХ вентильного разрядника (однородное поле); 2 — ВСХ трубчатого разрядника (резконеоднородное поле); 3 — ВСХ защищаемого объекта; 4 — импульс напряжения

Промежутки с однородным и слабонеоднородным полями имеют коэффициент импульса  $K_{ИМП} = 1$  практически во всем диапазоне времен разряда.

Вольт-секундные характеристики широко используются для координации изоляции высоковольтного оборудования, т. е. для защиты от воздействия грозových и коммутационных перенапряжений. С этой целью параллельно защищаемому объекту включается воздушный разрядник (например, вентильный разрядник) с пологой ВСХ. Надежная защита будет обеспечиваться, если ВСХ разрядника (рис. 1.17, кривая 1) лежит ниже ВСХ защищаемого оборудования (кривая 3) во всем диапазоне времен воздействующего напряжения.

## 1.12. Коронный разряд

Коронный разряд это самостоятельный разряд, при котором ударная ионизация электронами имеет место не на всей длине промежутка, а лишь в его части у электродов. Коронный разряд может иметь лавинную и стримерную форму. Пробой коронирующего промежутка происходит при напряжении большем начального.

Корона представляет интерес в связи с потерями энергии при коронировании ЛЭП. Например, на линиях сверхвысокого напряжения потери энергии при коронировании проводов ЛЭП в плохую погоду составляют 100–200 кВт на километр линии и более. Кроме этого, продукты ионизации воздуха разрушительно действуют на изоляцию и металлическую арматуру. Коронный разряд также является источником аку-

стического шума и высокочастотного электромагнитного излучения (спектр частот 0,154–100 МГц), которое создает помехи радио- и телеприему.

При коронном разряде происходит ионизация воздуха и у поверхности провода образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе. Под действием сил электрического поля ионы, составляющие объемный заряд, движутся от провода. Для их передвижения необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону, поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха значительно меньше.

На постоянном напряжении различают униполярную и биполярную корону. Если коронирует один провод — униполярная корона. При униполярной короне генерируемые короной заряды, имеющие тот же знак, что и коронирующий провод, под действием электрического поля устремляются к земле, где происходит их нейтрализация. При биполярной короне объемные заряды проводов различной полярности движутся навстречу друг другу. При встрече происходит рекомбинация ионов разных знаков. Часть ионов проникает в пространство вблизи противоположного провода, что приводит к усилению интенсивности коронирования. Это увеличивает потери на корону.

На переменном напряжении коронный разряд зажигается при достижении начального напряжения, равного напряжению зажигания короны  $U_H$  при времени  $t_1$  (рис. 1.18, а). Вокруг провода образуется зона ионизации, называемая чехлом короны (рис. 1.18, в). Из чехла короны положительные заряды (как на рис. 1.18, в) выносятся в окружающее пространство и образуют внешний объемный заряд (ОЗ). Процесс коронирования продолжается до тех пор, пока напряжение не достигнет  $U_{\max}$  при  $t_2$ .

Несмотря на повышение напряжения до  $U_{\max}$ , напряженность на проводе остается постоянной и равной  $E_H$  из-за влияния объемного заряда. Затем напряжение начинает снижаться. Синхронно снижается и напряженность на проводе, что приводит к погасанию короны. Но после погасания короны (после  $t_2$ ) в пространстве вокруг провода остается положительный внешний объемный заряд, который еще удаляется от провода (рис. 1.18, в). Расстояние, на которое удаляется объемный заряд, зависит от напряжения на проводе и составляет  $\sim 40$ – $100$  см. Разность потенциалов между проводом и ОЗ увеличивается по мере уменьшения напряженности на проводе до времени  $t_3$ . При  $t_4$  (рис. 1.18, а, в), когда напряжение достигает  $U_0$ , которое значительно меньше  $U_H$ , зажигается отрицательная корона. При этом отрицательно заряженные частицы начинают двигаться от провода во внешнюю об-

ласть, а навстречу (к проводу) движутся положительно заряженные частицы из внешнего объемного заряда. Происходит рекомбинация заряженных частиц до полной компенсации положительного внешнего ОЗ. Затем накапливается отрицательный ОЗ во внешней области. Все это происходит за время от  $t_4$  до  $t_5$  (рис. 1.18, а, в). В момент времени  $t_5$  (начало уменьшения напряжения) отрицательная корона гаснет. В дальнейшем все эти циклы повторяются и зажигание короны на обеих полярностях происходит при  $U_0$ .

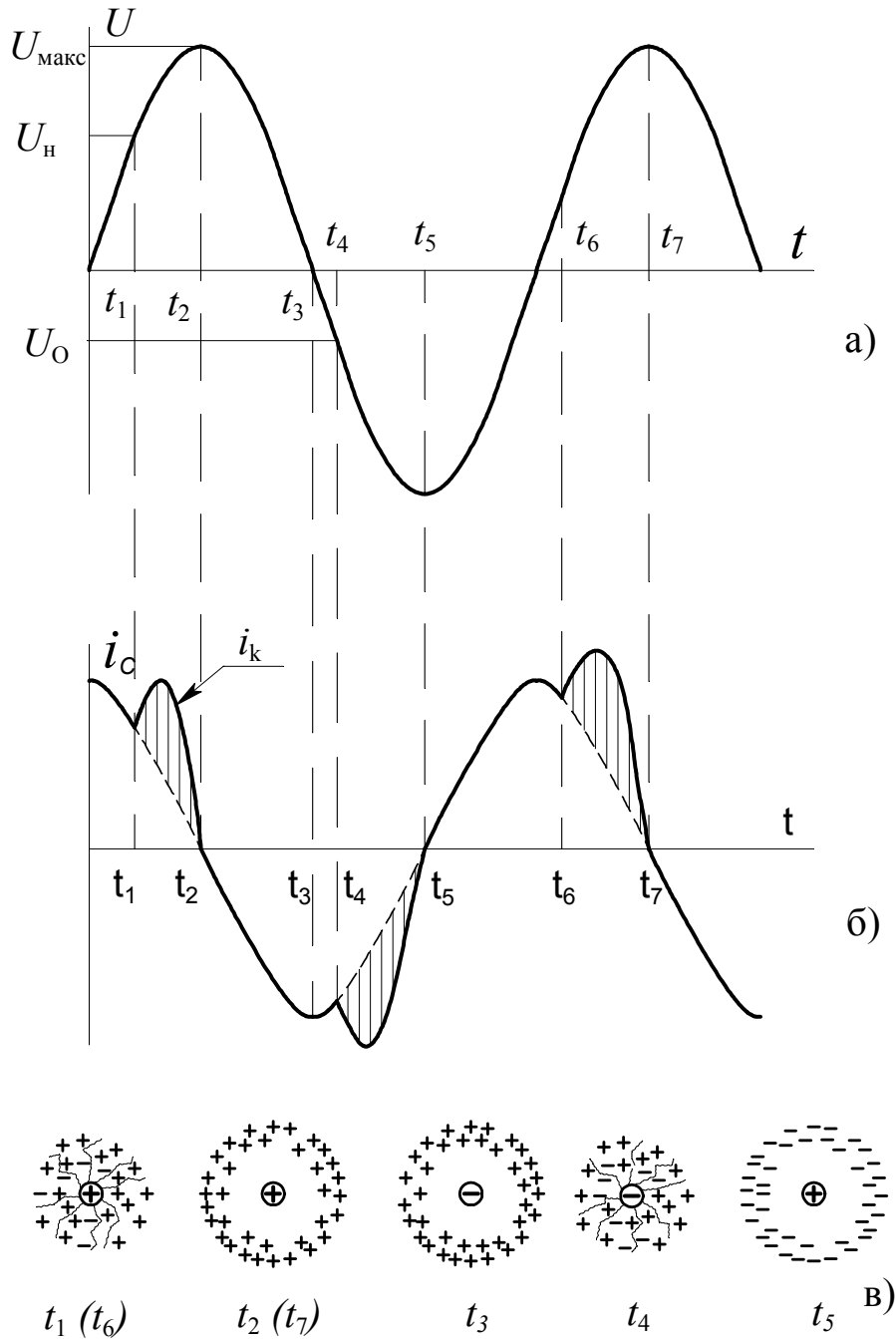


Рис. 1.18. Развитие короны при переменном напряжении



Между проводом и землей имеет место емкость  $C$ , которая заряжается и разряжается с частотой переменного тока. При этом между проводом и землей протекает емкостной ток  $i_C$  (рис. 1.18, б):

$$i_C = C \frac{du}{dt}. \quad (1.29)$$

Возникновение коронного разряда в момент  $t_1$  приводит к появлению тока короны  $i_K$ , который накладывается на емкостный ток линии и искажает синусоиду тока (рис. 1.18, б). Длительность пиков тока короны равна длительности ее горения, т.е. от  $t_1$  до  $t_2$  (или  $t_4 - t_5$ ,  $t_6 - t_7$ ).

При переменном напряжении коронирование проводов более интенсивное, чем при постоянном напряжении, и при прочих равных условиях потери энергии на корону существенно больше.

На характеристики коронного разряда — начальное напряжение, потери энергии, радиопомехи, шум — значительное влияние оказывают погодные условия. Атмосферные осадки резко снижают начальное напряжение возникновения короны.

### 1.13. Потери энергии при коронировании

При проектировании ЛЭП пользуются расчетными зависимостями потерь энергии при коронировании.

Распространенной формулой для расчета потерь на корону на переменном напряжении является эмпирическая формула Пика для одиночного провода

$$P = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_\phi - U_K)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км}\cdot\text{фаза} \quad (1.30)$$

где

$\delta$  — относительная плотность воздуха;

$f$  — частота, Гц;

$r_0$  — радиус одиночного провода, см;

$S$  — расстояние между проводами, см;

$U_\phi$  — действующее значение фазного напряжения, кВ;

$U_K$  — напряжение возникновения короны, кВ.

$$U_K = 21,2 \cdot \delta \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \text{ кВ}, \quad (1.31)$$

где

$m_1$  — коэффициент гладкости провода;

$m_2$  — коэффициент погоды.

Для идеально гладкого провода  $m_1 = 1$ , для реального витого провода  $m_1 = 0,85 \div 0,92$  (зависит от конфигурации провода). Обычно принимают  $m_1 \times m_2 = 0,8$  — при плохой погоде.

На линиях электропередачи сверхвысокого напряжения используют расщепленные провода в фазах. Для определения потерь при коронировании для расщепленных проводов используют формулу Майра:

$$P_k = \kappa \cdot n \cdot f \cdot r_0^2 \cdot E_3 (E_3 - E_k) \cdot \left( 2,31 \lg \frac{1350 E_3}{f \cdot r_0} - 1 \right) \cdot 10^{-5}, \quad (1.32)$$

где

$n$  — число проводов в фазе;

$f$  — частота, Гц;

$r_0$  — радиус одиночного провода, см;

$E_k$  — напряженность возникновения короны, кВ/см

$E_3$  — эквивалентная напряженность, кВ/см;

$\kappa$  — коэффициент погоды.

$$E_3 = \frac{E_{\text{макс}} + E_{\text{ср}}}{2}. \quad (1.33)$$

Средняя напряженность для расщепленного провода:

$$E_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{n \cdot r_0 \cdot \ln \frac{S}{r_{\text{ЭКВ}}}}.$$

Максимальная напряженность:

$$E_{\text{макс}} = k_y \cdot E_{\text{ср}},$$

где

$$k_y = 1 + (n - 1) \cdot \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{r_p};$$

$r_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_p^{n-1}}$  — эквивалентный радиус одиночного провода, имеющего ту же емкость, что и расщепленная фаза;

$r_p$  — радиус расщепления фазы.

Недостатком формулы Майра является то, что все многообразие погодных условий сводится к двум группам погоды: «хорошая» погода ( $\kappa = 44$ ;  $E_k = 17$  кВ/см) и «плохая» погода ( $\kappa = 31,5$ ;  $E_k = 11$  кВ/см). Для средней полосы Европейской части России и Западной Сибири потери на корону для 3-х фазных ЛЭП сверхвысокого напряжения могут рассчитываться по формуле Л. Егоровой и Н. Тиходеева

$$P = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot U_K^2 \cdot \exp \left[ 8,7 \cdot \left( \frac{U_M}{U_K} - 0,53 \right) \right] 10^{-5}, \text{ кВт/км}, \quad (1.34)$$

где

$U_M$  – амплитудное значение фазового напряжения, кВ.

Для определения потерь на корону в течение года рассчитывают потери энергии для каждой группы погоды, а затем суммируют их с учетом продолжительности группы в течение года

$$\sum P_K = \sum_{i=1}^4 P_{ki} \cdot \psi_i, \quad (1.35)$$

где

$\psi_i$  – относительная продолжительность группы погоды,  $P_{ki}$  – среднегодовая мощность потерь при  $i$ -ой группе погоды.

Для оценочного подсчета среднегодовых потерь все погодные условия разбивают на 4 группы: 1) хорошая погода; 2) дождь (включая мокрый снег и морось); 3) сухой снег; 4) изморозь (включая гололед и иней). Наибольшие потери в единицу времени возникают при изморози. Усредненная продолжительность различных групп погоды для средней полосы европейской части России и Западной Сибири приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Продолжительность групп погоды за год

Группа погоды	Продолжительность групп погоды за год (час)	Продолжительность групп погоды за год (%)
Хорошая погода	7120	81,3
Сухой снег	800	9,1
Дождь	500	5,7
Изморозь	340	3,9
Сумма	8760	100

#### 1.14. Разряд в воздухе по поверхности изоляторов

Рассмотрим влияние твердого диэлектрика на возникновение и развитие разряда в воздухе вдоль поверхности изолятора. В конструкции рис. 1.19, а силовые линии электрического поля параллельны поверхности диэлектрика и поле однородно. В конструкции рис. 1.19, б поле неоднородно и тангенциальная составляющая напряженности поля на поверхности диэлектрика  $E_\tau$  преобладает над нормальной составляющей  $E_n$ . В конструкции рис. 1.19, в поле также неоднородно, но преобладает нормальная составляющая. Первая конструкция сравнительно

редко встречается в реальных условиях, но удобна при выявлении влияния характеристик диэлектрика на возникновение разряда, вторая и третья конструкции встречаются часто (опорные и проходные изоляторы).

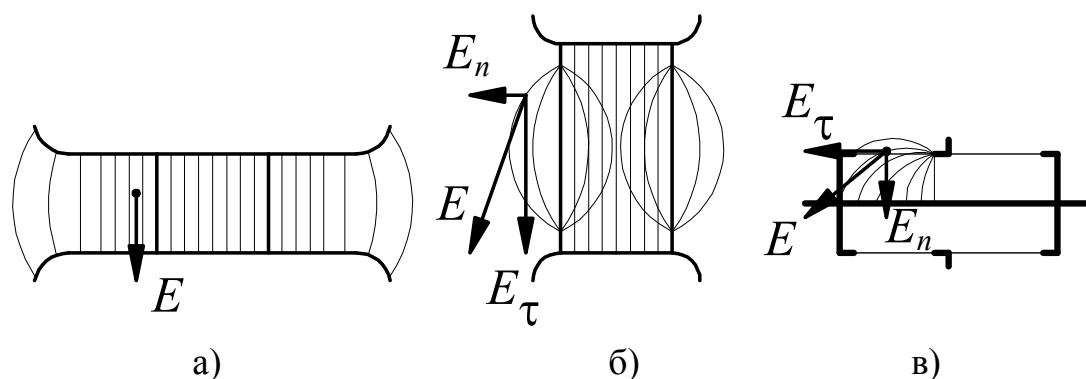


Рис. 1.19. Характерные конструкции воздушных промежутков с твердым диэлектриком

В изоляционной конструкции рис. 17, а электрическая прочность промежутка с диэлектриком меньше, чем чисто воздушного промежутка. Это связано с адсорбцией влаги из окружающего воздуха на поверхности диэлектрика, а также с микроразорами между твердым диэлектриком и электродом. Поверхность всех тел во влажном воздухе покрыта тончайшей пленкой воды. Ионы, образующиеся в этой пленке под действием электрического поля, перемещаются к электродам. В результате этого поле вблизи электродов усиливается, а в середине промежутка ослабляется. Усиление поля у электродов приводит к снижению электрической прочности промежутка. Это снижение тем больше, чем гигроскопичнее диэлектрик.

Например, стекло является более гигроскопичным материалом, чем глазурированный фарфор, поэтому напряжение перекрытия вдоль поверхности стекла ниже, чем вдоль фарфора.

Уменьшение напряжения перекрытия изолятора при наличии микроразора между диэлектриком и электродом или микротрещины на поверхности диэлектрика связано с увеличением в них напряженности поля вследствие различия диэлектрических проницаемостей воздуха и твердого диэлектрика (диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика в 3-4 раза больше, чем воздуха), увеличение напряженности поля к микроразорам приводит к возникновению там ионизационных процессов, продукты которых (ионы и электроны), попадая в основной промежуток, создают местное усиление поля, приводящее к уменьшению напряжения перекрытия.

Для увеличения разрядного напряжения промежутка с твердым диэлектриком стремятся использовать малогигроскопичные диэлектрики или создать покрытия из малогигроскопичных материалов,

защищающие диэлектрик от контакта с парами воды (например, глазуровка поверхности фарфора), а также обеспечить надежное, без микрозазоров, сопряжение тела изолятора с металлической арматурой, используя цементные заделки и эластичные проводящие прокладки.

В изоляционной конструкции на рис. 1.19, б поле неоднородное, следовательно, как и в случае чисто воздушного промежутка, разрядное напряжение меньше, чем в однородном поле. Влияние гигроскопичности диэлектрика и микрозазоров здесь качественно такое же, как и в конструкции на рис. 1.19, а, но оно слабее выражено, так как электрическое поле и без того существенно неоднородно. При достаточно большой неоднородности поля в этой изоляционной конструкции, как и в чисто воздушном промежутке, возникает коронный разряд. Образующиеся при этом озон и окислы азота воздействуют на твердый диэлектрик. Наибольшую опасность коронный разряд представляет для полимерной изоляции, особенно если он имеет стримерную форму. Температура в канале стримера достаточно высока, и соприкосновение его с поверхностью диэлектрика может приводить к термическому разложению диэлектрика и образованию обугленного следа с повышенной проводимостью. Длина этого следа (трека) со временем возрастает, что приводит к перекрытию изолятора с необратимой потерей им электрической прочности.

Все сказанное справедливо и для конструкции на рис. 1.19, в. Большая нормальная составляющая электрического поля способствует сближению канала стримера с поверхностью диэлектрика, что повышает вероятность повреждения диэлектрика. Электрическая прочность этой конструкции еще меньше, чем конструкции на рис. 1.19, б. Каналы стримеров, развивающихся вдоль поверхности диэлектрика, имеют значительно большую емкость по отношению к внутреннему (противоположному) электроду, чем в конструкции с преобладанием тангенциальной составляющей поля. Поэтому через стримерные каналы проходит сравнительно большой ток. При определенном значении напряжения ток возрастает настолько, что температура стримерных каналов становится достаточной для термической ионизации. Термически ионизированный канал разряда, развивающегося вдоль диэлектрика, на поверхности которого нормальная составляющая напряженности поля превышает тангенциальную составляющую, называют каналом скользящего разряда.

Проводимость канала скользящего разряда значительно больше проводимости канала стримера. Поэтому падение напряжения в канале скользящего разряда меньше, а на непокрытой части промежутка больше, чем в каналах стримера. Увеличение напряжения на непокрытой части промежутка приводит к удлинению канала скользящего

разряда и полному перекрытию промежутка при меньшем значении напряжения между электродами.

Длина канала скользящего разряда зависит от его проводимости, а следовательно, от значения тока в нем. В свою очередь ток зависит от напряжения между электродами, изменения напряжения и емкости канала стримера относительно противоположного электрода. Влияние этих параметров отражено в эмпирической формуле Теплера, согласно которой длина канала скользящего разряда

$$l_{\text{ск}} = \chi_1 \cdot C^2 \cdot U^5 \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}}, \quad (1.36)$$

где

$\chi_1$  — коэффициент, определяемый опытным путем;

$C$  — удельная поверхностная емкость (емкость поверхности диэлектрика, по которой развивается разряд, относительно противоположного электрода);

$U$  — приложенное напряжение.

Из (1.36) при подстановке вместо  $l_{\text{ск}}$  расстояния между электродами по поверхности диэлектрика  $L$ , можно определить значение напряжения  $U_p$ , необходимого для перекрытия изолятора. Если же принять

$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$ , где  $d$  — толщина диэлектрика, а площадь  $S$  принята

равной  $1 \text{ см}^2$  и считать значение  $\frac{dU}{dt}$  постоянным, что в первом при-

ближении соответствует постоянству частоты приложенного напряжения, из (1.36) получим выражение для нахождения разрядного напряжения:

$$U_p = \chi \cdot L^{0,2} \left( \frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4}, \quad (1.37)$$

которое называется формула Теплера.

Из (1.37) следует, что рост длины изолятора дает относительно малое повышение разрядного напряжения. Поэтому для увеличения разрядных напряжений проходных изоляторов уменьшают удельную поверхностную емкость путем увеличения диаметра изолятора у фланца, с которого можно ожидать развития разряда. Используется также нанесение у фланца полупроводящего покрытия, что способствует выравниванию распределения напряжения по поверхности изолятора и, следовательно, приводит к увеличению разрядных напряжений.

При постоянном напряжении удельная поверхностная емкость практически не влияет на развитие разряда и значение разрядного на-

пряжения оказывается близким к разрядному напряжению чисто воздушного промежутка.

### **1.14.1. Разряд вдоль проводящей и загрязненной поверхности изолятора**

В условиях эксплуатации поверхности изоляторов всегда загрязняются. Как правило, сухие загрязнения, имеющие высокое сопротивление и не влияющие на распределение напряжения по поверхности изолятора, не снижают заметно его разрядного напряжения. Увлажнение слоя загрязнения морозящим дождем или росой приводит к уменьшению сопротивления слоя загрязнения, изменению распределения напряжения по поверхности изолятора и в результате — к снижению его разрядного напряжения.

Механизмы перекрытия изолятора под дождем и при загрязненной и увлажненной поверхности сходны. Рассмотрим развитие разряда в случае, когда поверхность изолятора загрязнена и увлажнена.

Под действием приложенного к изолятору напряжения по увлажненному слою загрязнения проходит ток утечки, нагревающий его. Так как загрязнение распределено по поверхности изолятора неравномерно и плотность тока утечки неодинакова на отдельных участках изолятора из-за сложной конфигурации его поверхности, то нагревание слоя загрязнения происходит также неравномерно. На тех участках изолятора, где плотность тока наибольшая, происходит интенсивное испарение воды и образуются подсушенные участки с повышенным сопротивлением. Распределение напряжения по поверхности изолятора меняется. Почти все напряжение, воздействующее на изоляцию, оказывается приложенным к подсушенным участкам. В результате эту подсушенные участки перекрываются искровыми каналами, называемыми частичными перемежающимися дугами. Сопротивление искрового канала меньше сопротивления подсушенного участка поверхности изолятора, поэтому ток утечки возрастает. Возрастание тока утечки приводит к дальнейшему подсушиванию слоя загрязнения, а следовательно, и к увеличению его сопротивления.

Интенсивное подсушивание поверхности изолятора у концов дуг приводит к их удлинению. Подсушивание всей поверхности ведет к снижению тока утечки, а увеличение длины частичных дуг к его росту. Если результатом этого будет уменьшение тока утечки, то дуги погаснут, если же ток утечки будет расти, то частичные дуги будут удлиняться и перекроют весь изолятор. Так как параметры частичной дуги и количество дуг, одновременно существующих на поверхности изолятора, случайны, то и перекрытие также является случайным событием, характеризуемым определенной вероятностью. Вероятность перекрытия изолятора повышается с увеличением воздействующего напряжения, так

как при этом возрастает ток утечки, что благоприятствует удлинению частичных дуг до полного перекрытия изолятора.

Из приведенной картины развития разряда следует, что разрядные напряжения изоляторов будут тем выше, чем меньше ток утечки:

$$I_Y = \frac{U}{R_Y}, \quad (1.38)$$

где

$I_Y$  — ток утечки по изолятору;

$R_Y$  — сопротивление утечки по поверхности изолятора.

Если слой загрязнения имеет толщину  $\Delta$  с удельным объемным сопротивлением  $\rho$ , то для цилиндрического гладкого изолятора диаметром  $D$ :

$$R_Y = \frac{\rho \cdot L_Y}{\pi \cdot \Delta \cdot D}, \quad (1.39)$$

где

$L_Y$  — длина пути утечки.

Из (1.38) и (1.39) следует, что

$$I_Y = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_Y}.$$

Следовательно, разрядное напряжение изолятора будет возрастать с увеличением длины пути утечки и уменьшением диаметра изолятора:

$$U_{вл.р} = \frac{I_Y \cdot \rho \cdot L_Y}{\pi \cdot \Delta \cdot D}.$$

Так как процессы подсушки поверхности изолятора происходят относительно медленно, то при кратковременных перенапряжениях они не успевают развиться и напряжение перекрытия бывает выше, чем при длительном воздействии напряжения.

Влагоразрядное напряжение изолятора зависит от характеристик слоя загрязнения, его количества и состава, а также от интенсивности и вида увлажнения. Большое разнообразие видов загрязнения, встречающихся в условиях эксплуатации, не позволяет выбрать единственное, "стандартное" загрязнение, которое можно было бы наносить на поверхность изоляторов при определении влагоразрядных напряжений. Наиболее правильно разрядные напряжения в реальных условиях загрязнения и увлажнения могут быть определены из опыта эксплуатации.



### 1.15. Пробой жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики, обладая значительно более высокой электрической прочностью по сравнению с газами, нашли очень широкое применение в качестве высоковольтной изоляции в разнообразных устройствах: трансформаторах, кабелях, передающих линиях, конденсаторах, выключателях, разрядниках и т. д.

Жидкие диэлектрики можно классифицировать по их природе на следующие группы:

- 1) углеводороды минеральные — продукты перегона нефти и каменного угля (трансформаторное, конденсаторное и др. масла);
- 2) углеводороды растительные (касторовое, льняное и другие масла);
- 3) хлорированные углеводороды ароматического ряда (хлордифенил, совтол);
- 4) кремнийорганические соединения.

Кроме этого, жидкие диэлектрики могут быть полярными и неполярными, в связи с этим у них существенно изменяются свойства, которые приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Свойства диэлектриков

Вид диэлектрика	$\rho$ , Ом·см	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
Неполярные	$\geq 10^{18}$	1,8...2,5	$\approx 0,001$
Слабополярные	$\approx 10^{11} \dots 10^{12}$	$> 2,5$	$\approx 0,01$
Сильнополярные	$\approx 10^7 \dots 10^8$	$> 5$	$\approx 0,1$

В промышленности имеют дело с технически чистыми жидкими диэлектриками, у которых влияние посторонних примесей ограничено некоторой минимальной концентрацией. В этой связи в теориях пробоя технически чистых жидкостей рассматривают влияние посторонних примесей, неизбежно появляющихся при эксплуатации. Важнейшие посторонние примеси в жидких диэлектриках:

- а) вода;
- б) газы;
- в) волокна целлюлозы;
- г) углерод;
- д) продукты разложения используемого жидкого диэлектрика.

По сравнению с воздухом (газом) пробивные напряжения масла имеют очень большой разброс. Отклонение от среднего составляет 50% и более, а среднеквадратичное отклонение 10...15%.

Определение электрической прочности масла  $U_{\text{ПР}}$  по ГОСТ 6581-75 осуществляется в стандартном пробойнике на переменном напряжении.

На пробой жидких диэлектриков существенное влияние оказывает множество факторов, которые могут, как понижать пробивное напряжение (загрязнения, увлажнение и др.), так и увеличивать его (очистка, давление, барьеры и т.д.). Основные факторы, изменяющие  $U_{\text{ПР}}$ :

1) загрязнение и увлажнение (увеличение загрязненности масла снижает  $U_{\text{ПР}}$ , ничтожное количество влаги ( $< 0,03\%$ ) резко снижает  $U_{\text{ПР}}$ );

2) вязкость (уменьшение вязкости уменьшает  $U_{\text{ПР}}$ );

3) температура (с увеличением температуры  $U_{\text{ПР}}$  уменьшается; на импульсном напряжении это влияние незначительное; для технически чистого масла зависимость  $U_{\text{ПР}} = f(T^\circ \text{C})$  носит сложный характер);

4) давление (для технически чистого масла увеличение давления приводит к увеличению  $U_{\text{ПР}}$ , т.к. увеличивается давление в газовых пузырьках);

5) наличие барьеров (барьеры могут существенно повысить  $U_{\text{ПР}}$ , особенно в резконеоднородном поле;

6) время действия напряжения (с увеличением времени воздействия напряжения  $U_{\text{ПР}}$  уменьшается; чем чище диэлектрик, тем меньше это влияние; на импульсном напряжении коэффициент импульса в несколько раз больше, чем для газовых диэлектриков);

7) форма, площадь электродов и расстояние между ними (форма электродов создает поля разной степени неоднородности при  $S = const$ , чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже  $U_{\text{ПР}}$ ; с увеличением площади электродов  $U_{\text{ПР}}$  уменьшается; увеличение расстояния увеличивает  $U_{\text{ПР}}$ );

8) полярность электродов при несимметричной их форме (при отрицательной полярности пробивные напряжения больше, чем при положительной; этот эффект тем больше, чем более полярен диэлектрик).

Пробой жидких диэлектриков — явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и многими факторами, влияющими на развитие пробоя (загрязнение, форма, размеры и материал электродов, температура, давление и др.) Для хорошо очищенных жидкостей величина электрической прочности достигает 1000 кВ/см.

### 1.15.1. Влияние влаги и микропримесей

Влага в масле может находиться в трех состояниях: в молекулярно-растворенном виде, в виде эмульсии (мелкие шарики воды размером 2...10 мкм) и в виде водяного отстоя на дне бака. Растворимость

воды в жидких диэлектриках зависит от температуры. Например, в минеральном масле при  $20^{\circ}\text{C}$  может растворяться  $\sim 40 \cdot 10^{-6}$  воды по объему, а при  $80^{\circ}\text{C}$   $\sim 400 \cdot 10^{-6}$ .

Наличие влаги в обоих состояниях сказывается на электрической прочности масла, особенно в присутствии волокон. Причем наиболее сильно влияет эмульгированная влага. Вследствие большой диэлектрической проницаемости (для воды  $\varepsilon = 80$ , для волокон целлюлозы  $\varepsilon = 6,4$ ) частички влаги и волокна втягиваются в область наибольшей напряженности электрического поля, поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий поля. Это приводит к образованию «мостиков», которые увеличивают локальную плотность тока, нагреву, сильному увеличению местной напряженности поля в местах разрыва мостиков, вследствие чего начинаются местные ионизационные процессы и может произойти пробой всего межэлектродного промежутка.

Зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от содержания влаги  $C_{\text{H}_2\text{O}}$  (рис. 1.20) (миллионные доли влаги в единице объема масла) показывают, что наличие 40–50 млн. долей влаги уменьшает электрическую прочность масла примерно в 10 раз.

Снижение электрической прочности в области малых концентраций вызвано влиянием растворенной влаги, а в области больших концентраций — эмульгированной влаги.

Наличие влаги и волокон слабо сказывается на прочности жидких диэлектриков при коротких импульсах напряжения (единицы-десятки микросекунд), поскольку частицы примесей не успевают переместиться на значительное расстояние и повлиять на развитие разряда в жидкости.

Общее количество воды, которое может находиться в масле в молекулярно-растворенном и эмульсионном виде, ограничено. При содержании воды более 0,02% влага выпадает в виде отстоя на дно. Хотя сам отстой и не влияет на электрическую прочность, его появление свидетельствует о существенном ухудшении изоляционных свойств масел.

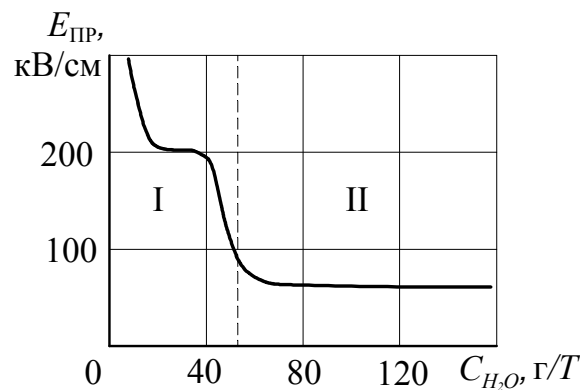


Рис. 1.20. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от содержания влаги,  $C_{H_2O}$  (грамм тонна): I — зона растворимости влаги, II — эмульгированная влага

Особенно резкое уменьшение разрядных напряжений происходит при наличии в масле гигроскопических загрязнений в виде волокон бумаги, картона, пряжи, значительно облегчающих образование проводящих мостиков. Эти загрязнения проникают в масло в процессе эксплуатации из элементов твердой изоляции, находящихся в масле.

### 1.15.2. Влияние давления

Пробивное напряжение как технических, так и очищенных жидких диэлектриков при промышленной частоте 50 Гц сильно зависит от давления. Это связано с наличием и образованием в жидкости при высоком напряжении пузырьков газа, являющихся очагами развития пробоя. А электрическая прочность газа сильно зависит от давления (закон Пашена).

На рис. 1.21 представлены зависимости пробивного напряжения трансформаторного масла от давления ниже атмосферного. При пониженных давлениях из масла начинают выделяться растворенные в нем газы, и его прочность резко падает (рис. 1.21, кривая 1).

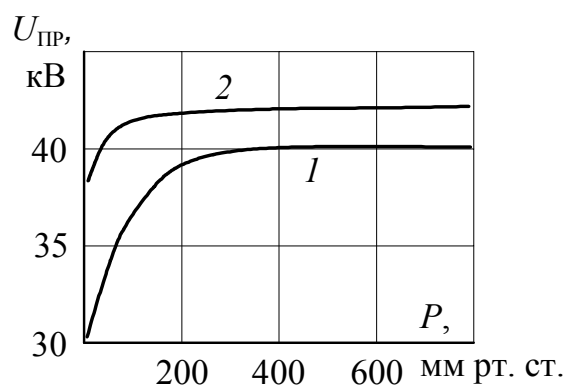


Рис. 1.21. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления: 1 — недегазированное масло; 2 — дегазированное масло

Видно, что зависимость пробивного напряжения от давления заметно увеличивается с повышением степени очистки масла (рис. 1.21, кривая 2), что указывает на большое влияние газообразных примесей.

При давлениях выше атмосферного (рис. 1.22) электрическая прочность масла увеличивается, что также свидетельствует о наличии газа в масле и его влиянии на электрическую прочность масла.

При импульсных воздействиях давление меньше сказывается на электрической прочности жидких диэлектриков.

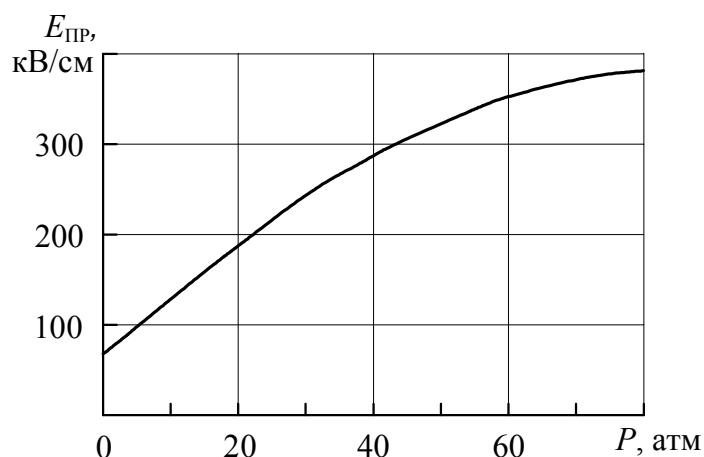


Рис. 1.22. Зависимость пробивного напряжения парафинового масла от давления (50 Гц)

### 1.15. 3. Влияние температуры

Электрическая прочность жидких диэлектриков в сильной степени зависит от их чистоты. Для чистых сухих жидкостей значительное влияние температуры наблюдается в области интенсивного испарения и кипения. (рис. 1.23, кривая 1).

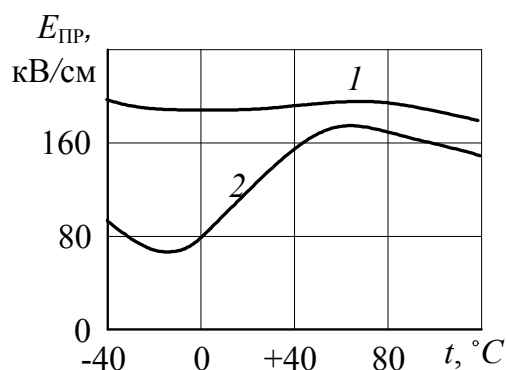


Рис. 1.23. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от температуры: 1 – сухое масло; 2 — техническое масло с примесью влаги

Для технически чистых жидкостей с примесью влаги зависимость электрической прочности от температуры достаточно сложная. Из рис. 1.23, кривая 2 видно, что имеет место минимум и максимум электрической прочности. Снижение температуры от точки максимума приводит к уменьшению  $E_{пр}$  до минимума, что связано с переходом растворенной влаги в эмульгированное состояние. Дальнейшее понижение температуры (меньше  $0^{\circ}C$ ) вызывает замерзание капелек воды и, как следствие, повышение  $E_{пр}$ . У льда диэлектрическая постоянная  $\epsilon_L$  примерно равна диэлектрической постоянной масла  $\epsilon_M$  ( $\epsilon_L \approx \epsilon_M$ ), что уменьшает влияние влаги на электрическую прочность масла.

Уменьшение электрической прочности для сухого и технического масел при температуре выше  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1.23) обусловлено интенсивным испарением и кипением жидкости.

#### 1.15.4. Влияние времени воздействия напряжения

Электрическая прочность жидких диэлектриков существенно зависит от длительности приложения напряжения  $\tau$  и чем больше примесей в жидкости (особенно влаги и волокон), тем сильнее эта зависимость (рис. 1.24).

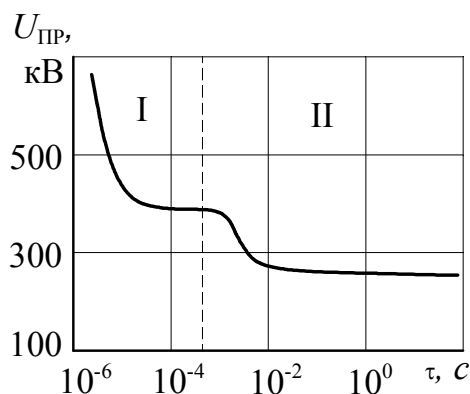


Рис. 1.24. Зависимость пробивного напряжения от времени воздействия для трансформаторного масла. Электроды: острие–плоскость; расстояние между электродами 20 см; положительная полярность напряжения

Экспериментальные результаты по пробоем жидких диэлектриков показывают наличие, как минимум, двух областей, связанных с временем воздействия напряжения (рис. 1.24), появление которых объясняется различными механизмами пробоя. При воздействии импульсов напряжения с длительностью  $\tau < 10^{-4}$  с (область I) влияние примесей значительно ослаблено, т.е. они не успевают переместиться на заметные расстояния. Начальная стадия разряда в жидкости возникает при напряженностях 100 кВ/см. В этом случае начинают проявляться процессы электронной эмиссии. Возможны процессы авто- и термоэлектронной эмиссии с катода, а также процессы автоионизации жидкости у анода. Все перечисленные явления могут участвовать в инициировании разряда.

Образование газовых пузырьков у электрода может иметь место как за счет разложения углеводородов жидкого диэлектрика, так и за счет вскипания жидкости под воздействием выделенной энергии в локальных зонах электрода ("тепловая" теория пробоя). В газовых пузырьках развивается ударная ионизация, образуется кистевой стримерный канал, который развивается к противоположному электроду.

Резкое увеличение электрической прочности при  $\tau < 10^{-5}$  с связано с запаздыванием развития разряда, когда время воздействия напряжения становится соизмеримо с временем формирования разряда. Увеличение времени воздействия напряжения  $\tau > 10^{-3}$  с приводит к быстрому снижению  $U_{\text{ПР}}$  вследствие влияния влаги и волокон, а также образования газовых пузырьков. При дальнейшем увеличении времени воздействия напряжения решающее влияние на снижение  $U_{\text{ПР}}$  начинают оказывать тепловые процессы.

При длительном воздействии напряжения (область II) присутствие влаги, газа, загрязнений в жидком диэлектрике сильно снижает его электрическую прочность, причем наиболее опасным является эмульгированное стояние влаги. Пробой наступает вследствие образования цепочек из мелких поляризованных частиц включений, которые вытягиваются вдоль силовых линий. Эти цепочки образуют проводящий канал, по которым протекает ток, разогревающий воду и прилегающую к каналу жидкость до кипения. Пробой жидкости происходит по образовавшемуся газовому каналу.

#### **1.15.5. Влияние материала, геометрии электродов, расстояния между ними и полярности**

Геометрическая форма электродов создает поля разной степени неоднородности, и чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже пробивное напряжение. Даже незначительное увеличение радиуса кривизны электродов в резконеоднородных полях дает более существенное увеличение  $U_{\text{ПР}}$  по сравнению с воздухом. Увеличение расстояния между электродами  $S$  приводит к увеличению пробивного напряжения (рис. 1.25).

На величину пробивного напряжения при неизменном  $S$  оказывает влияние площадь электродов и объем жидкости между электродами: увеличение площади электродов и объема жидкости вызывает снижение  $U_{\text{ПР}}$ . Состояние поверхности электродов также оказывает влияние на электрическую прочность  $E_{\text{ПР}}$  жидких диэлектриков. Загрязнение, окисление и плохая полировка поверхности электродов снижают  $E_{\text{ПР}}$ . По мере увеличения расстояния между электродами влияние материала электродов уменьшается и при расстоянии несколько миллиметров практически прекращается. Влияние материала электродов на  $E_{\text{ПР}}$  жидких диэлектриков осуществляется через эмиссию электронов с катода.

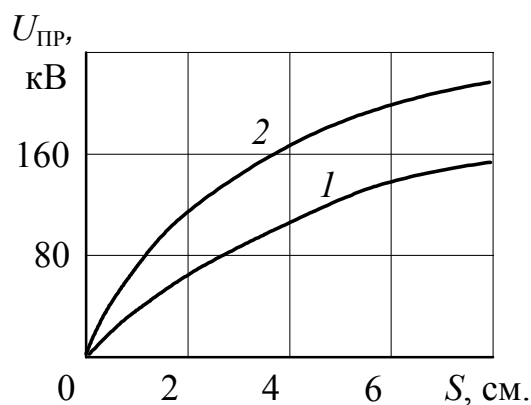


Рис. 1.25. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и полярности для трансформаторного масла, электроды острие-плоскость: 1 – положительная полярность острия; 2 – отрицательная полярность острия; напряжение постоянное

Как следует из рис. 1.25, пробивное напряжение зависит от полярности электрода-острия при несимметричной системе электродов. Наиболее ярко эта зависимость проявляется для полярных жидкостей. Например, для воды увеличение  $U_{\text{ПР}}$  при отрицательной полярности острия достигает 2,0-2,5 раз по сравнению с положительной полярностью.

#### 1.15.6. Барьерный эффект

Барьеры из твердого изоляционного материала, устанавливаемые в масле между электродами, весьма широко применяются для повышения электрической прочности масляной изоляции.

При наличии барьеров электрическая прочность разрядного промежутка значительно возрастает. Это обусловливается двумя факторами. Барьер непроницаем для ионов жидкости. Поэтому ионы, двигаясь от одного электрода к другому, оседают на барьере, «растекаются» по его поверхности и заряжают ее. Благодаря этому, электрическое поле в промежутке становится более равномерным, что приводит к увеличению разрядного напряжения. Кроме этого, барьер затрудняет образование сплошных проводящих мостиков из волокнистых веществ, находящихся в масле. Действие барьеров более эффективно в неравномерных полях. При кратковременных импульсных воздействиях напряжения барьеры менее эффективны, чем на постоянном и переменном напряжениях.

На рис. 1.26 представлено относительное изменение пробивного напряжения  $U_6/U_{\text{ПР}}$  ( $U_{\text{ПР}}$  – пробивное напряжение чисто масляного промежутка, а  $U_6$  – пробивное напряжение того же промежутка с барьером) в зависимости от положения барьера  $S_6/S$  ( $S$  — расстояние между электродами, постоянно, а  $S_6$  – расстояние от острия до барьера) в мас-



ляном промежутке, образованном электродами острие–плоскость при воздействии переменного напряжения с частотой 50 Гц.

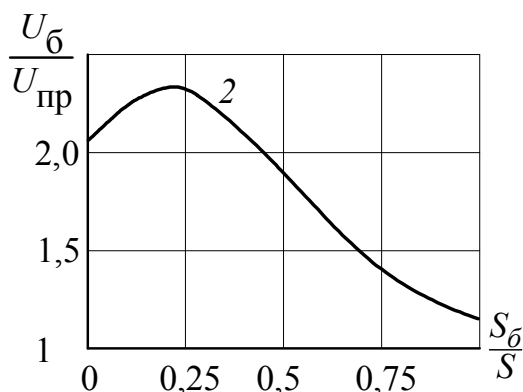


Рис. 1.26. Влияние барьера на пробивное напряжение масляного промежутка: электроды острие-плоскость; напряжение 50 Гц,  $S$  – 75 мм

Барьер – плоский электрокартон толщиной 5 мм. Расстояние до барьера измеряется от острия. В данной системе координат пробивное напряжение масляного промежутка без барьера равно 1. Наличие барьера приводит к увеличению пробивного напряжения. Максимальный эффект соответствует расстоянию до барьера  $S_б \approx 0,25 S$ , что хорошо коррелирует с аналогичным эффектом для газа.

Маслобарьерная изоляция широко применяется в высоковольтной технике при изготовлении трансформаторов, вводов, реакторов и т.п.

### 1.16. Пробой твердой изоляции

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой  $U_{пр\ тв} > U_{пр\ ж} > U_{пр\ г}$ .

Электрическая прочность твердой изоляции зависит от:

- 1) формы электрического поля;
- 2) вида напряжения и полярности;
- 3) времени воздействия напряжения;
- 4) однородности диэлектрика;
- 5) электрофизических характеристик (полярный-неполярный,  $\text{tg } \delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\gamma$  и др.);
- 6) температуры.

Различают три вида пробоя твердого диэлектрика:

- 1) электрический —  $E \sim 10^2 - 10^3$  кВ/мм;
- 2) тепловой —  $E \sim 10 - 10^2$  кВ/мм;
- 3) старение —  $E \sim 10$  кВ/мм и менее.

Твердая изоляция включает в себя все виды твердых диэлектриков от пленок до толстой монолитной.

В табл. 1.5 приведены некоторые электрические характеристики твердой изоляции, которые могут быть востребованы в процессе ее эксплуатации.

Таблица 1.5

Характеристики изоляции

Эл. характеристики	Мех. характеристики	Тепловые характеристики	Хим. характеристики	Прочие
$U_{пр}$ $U_{пер}$ $U_{раб}$ $U_{сухо\ разр}$ $\rho_V, \rho_S$ $tg \delta$ $t = f(E, f)$	$\sigma_{раст}$ $\sigma_{сж}$ $\sigma_{изг}$ Твердость Гибкость Эластичность	$T_{кип}$ $T_{плавл}$ $T_{заст}$ Теплопроводность Теплоемкость Тепловое расш.	Стабильность Растворимость Действие на др. диэлектр.	Удельный вес Абсорбция влаги Действие обл. луч. Микроорганизмы и др.

Наиболее сильное влияние на электрическую прочность твердой изоляции оказывают время приложения напряжения, температура, толщина. Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения называется вольт-временной характеристикой. Она приведена на рис. 1.27.

На кривой выделяют 4 области. Области I и II соответствуют электрическому пробую. Время приложения напряжения  $t < 0,1$  с. Резкое возрастание пробивного напряжения в I области обусловлено запаздыванием развития разряда относительно времени приложения напряжения. Область III характеризуется резким спадом пробивного напряжения, что говорит о преобладающей роли тепловых процессов. Область IV — медленное снижение пробивного напряжения с увеличением времени воздействия связано с медленными процессами старения, деградации твердой изоляции.

Электрическая прочность  $E_{пр}$  твердой изоляции возрастает с уменьшением ее толщины и особенно быстро в области микронных толщин. Этот эффект используют в изоляции конденсаторов, кабелей, вводов и др. Влияние температуры наглядно иллюстрируется рис. 1.28, где приведена зависимость электрической прочности фарфора от температуры. Видно, что до температуры  $\sim +75^\circ\text{C}$  пробивная напряженность фарфора  $E_{пр}$  практически не изменяется (область А). Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому уменьшению  $E_{пр}$  (область Б).

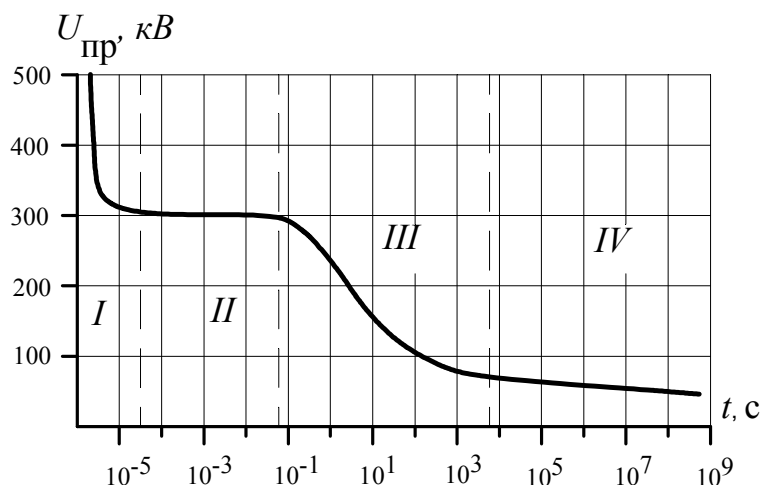


Рис. 1.27. Вольт-временная характеристика твердой изоляции: I — электрический пробой, запаздывание развития канала разряда; II — электрический пробой,  $t < 0,1$  с, не зависит от температуры; III — тепловой пробой,  $t > 0,1$  с, резкое снижение  $U_{пр}$  во времени; IV — старение,  $U_{пр}$  мало изменяется, а время до пробоя возрастает значительно

Развитие теплового пробоя в твердом диэлектрике в общих чертах может быть представлено в виде следующей последовательности:

$$U_{д} \rightarrow I_{д} \rightarrow T_{д} \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow \text{ и } \text{tg } \delta \uparrow \rightarrow I_{д} \uparrow \rightarrow T_{д} \uparrow \text{ и т. д.}$$

где

$U_{д}$  — напряжение, приложенное к изоляции;

$I_{д}$  — ток, текущий через изоляцию;

$T_{д}$  — температура изоляции;

$\gamma$  — проводимость изоляции;

$\text{tg } \delta$  — диэлектрические потери в изоляции.

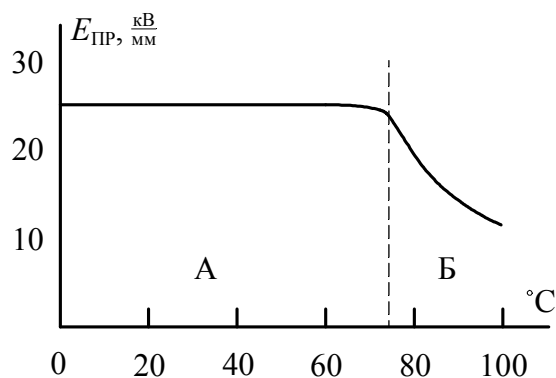


Рис. 1.28. Зависимость пробивного напряжения от температуры для фарфора (напряжение 50 Гц)

Суть теплового пробоя изоляции можно представить в виде рис. 1.29, где  $Q_1$  — тепло, выделенное в изоляции за счет джоулевых и

диэлектрических потерь,  $Q_2$  — отводимое от изоляции тепло в окружающую среду.

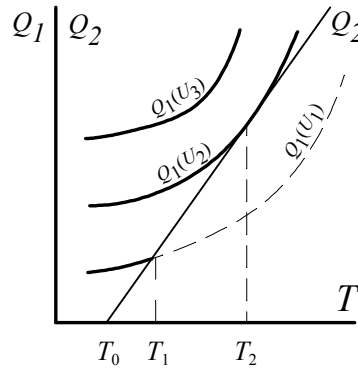


Рис. 1.29. Изменение выделенного  $Q_1$  и отводимого  $Q_2$  тепла в изоляции при разных  $U$

Выделенное тепло определяется, как

$$Q_1 = \omega C \operatorname{tg} \delta U^2, \quad (1.40)$$

а отводимое тепло, как

$$Q_2 = k S (T - T_0), \quad (1.41)$$

где

$\omega$  — угловая частота;

$C$  — емкость изделия;

$\operatorname{tg} \delta$  — диэлектрические потери в изоляции;

$k$  — коэффициент теплопередачи;

$S$  — площадь поверхности изоляции;

$T_0$  — температура окружающей среды;

$T$  — температура внутри диэлектрика.

Изменение приложенного напряжения к изоляции приводит к изменению потерь в ней. На рис. 1.29  $Q_1(U_1)$ ,  $Q_1(U_2)$ ,  $Q_1(U_3)$  — тепло, выделенное при  $U_1 < U_2 < U_3$ , а  $Q_2$  — тепло, отведенное от изоляции.

Для  $U_1$  при  $T_1 + \Delta T - Q_2 > Q_1$  — нет нагрева.

Для  $U_2$  при  $T_2 + \Delta T - Q_2 < Q_1$  — тепловой пробой.

Для  $U_3$  — всегда тепловой пробой.

$T_2$  — точка теплового равновесия. Рабочая температура  $T_{\text{раб}} <$

$T_2$ .

### 1.16.1. Частичные разряды

Под действием высокой напряженности электрического поля в изоляции в местах с пониженной электрической прочностью возникают частичные разряды (ЧР), которые представляют собой пробой газовых включений, локальные пробои малых объемов твердого диэлектрика.

Условия возникновения ЧР определяются конфигурацией электрического поля изоляционной конструкции и электрическими характеристиками рассматриваемой области изоляции.

ЧР обычно не приводят к сквозному пробое диэлектрика, однако приводят к местному разрушению изоляции, а при длительном существовании могут привести и к сквозному пробое.

Возникновение ЧР всегда свидетельствует о местной неоднородности диэлектрика. В связи с этим регистрация характеристик ЧР позволяет оценивать качество изготовления изоляции и выявлять местные дефекты.

Характеристики ЧР достаточно хорошо коррелируют с размерами и количеством дефектов, т. е. позволяют судить о степени дефектности изоляционной конструкции.

Изучение характеристик ЧР в зависимости от различных условий работы стало вопросом первостепенной важности для кабелей, конденсаторов, трансформаторов и других устройств — там, где применяется слоистая изоляция при переменном, постоянном, пульсирующем и импульсном напряжениях.

При рассмотрении механизма возникновения ЧР воспользуемся эквивалентной схемой замещения диэлектрика с общей емкостью  $C_{\Sigma}$  (рис. 1.30).

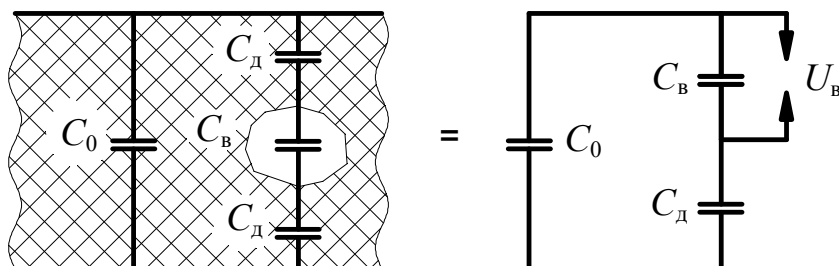


Рис 1.30. Схема замещения твердого диэлектрика:  $C_0$  — емкость бездефектной изоляции;  $C_{\text{в}}$  — емкость воздушного включения;  $C_{\text{д}}$  — емкость диэлектрика последовательно с включением;  $U_{\text{в}}$  — напряжение пробоя воздушного включения

$$C_{\Sigma} = C_0 + \frac{C_{\text{в}} \cdot C_{\text{д}}}{C_{\text{в}} + C_{\text{д}}} \quad (1.42)$$

ЧР возникают тогда, когда напряжение на включении достигает пробивного значения  $U_{\text{пр}}$  — напряжения зажигания разряда во включении. Напряженность электрического поля во включении  $E_{\text{в}}$  связана с напряженностью в остальной части диэлектрика, как

$$E_B = E_D \cdot \frac{\epsilon_D}{\epsilon_B}, \quad (1.43)$$

где

$E_D$  — напряженность электрического поля в диэлектрике;

$\epsilon_D$  — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$\epsilon_B$  — относительная диэлектрическая проницаемость включения.

Исходя из (1.49), напряженность электрического поля в газовом включении (и в любом другом, где  $\epsilon_B < \epsilon_D$ ) всегда выше, чем в остальном диэлектрике.

Эпюры напряжения на включении в процессе приложения переменного напряжения приведены на рис. 1.31.

При размерах включения десятки микрометров и давлении близком к атмосферному, пробивное напряжение лежит вблизи минимума кривой Пашена, слабо изменяется с изменением размеров включения и составляет 250...300 В.

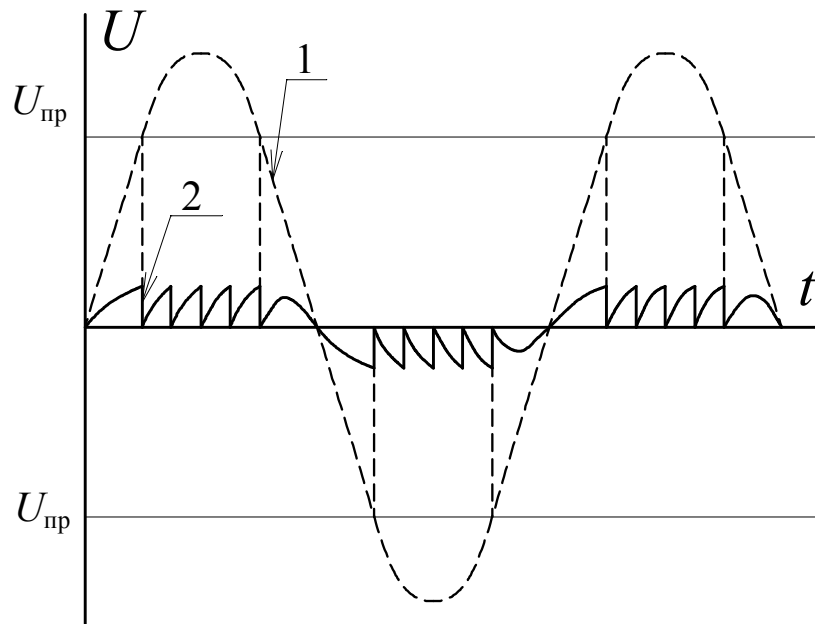


Рис. 1.31. Эпюры напряжения на воздушном включении в твердом диэлектрике: 1 — напряжение на образце; 2 — напряжение на включении;  $U_{пр}$  — напряжение на образце, при котором происходит пробой воздушного включения

Наибольшую опасность ЧР представляют на переменном или импульсном напряжении.

Разрушающее действие ЧР на диэлектрики обусловлено следующими факторами, возникающими при пробое включения:

- 1 — воздействие ударных волн;
- 2 — тепловое воздействие;

- 3 — бомбардировка заряженными частицами;
- 4 — воздействие химически активными продуктами разряда (озон, окислы азота);
- 5 — воздействие излучения;
- 6 — развитие древовидных побегов — дендритов.

В зависимости от величины заряда  $q_{\text{чр}}$ , измеряемого при ЧР, возможна классификация ЧР по  $q_{\text{чр}}$ :

1. При превышении некоторого порога напряжения в изоляции возникают ЧР с интенсивностью  $q_{\text{чр}} = 10^{-12} \dots 10^{-11}$  Кл. Такие ЧР не вызывают быстрого разрушения изоляции и во многих случаях могут быть допустимы. Такие разряды называются начальными.

2. Дальнейшее возрастание напряжения или увеличение размеров включений в процессе длительной работы изоляции приводит к резкому возрастанию интенсивности ЧР, причем прежде всего возрастает  $q_{\text{чр}}$  до величины  $q_{\text{чр}} = 10^{-10} \dots 10^{-8}$  Кл. Их возникновение резко сокращает срок службы изоляции и они не должны допускаться при рабочих условиях. Такие разряды называются критическими.

На постоянном напряжении интервал между ЧР во включении составляет секунды-десятки секунд, что на несколько порядков больше, чем на переменном напряжении промышленной частоты. Это позволяет увеличить рабочие напряженности электроизоляционных конструкций постоянного напряжения по сравнению с переменным.

Развитие ЧР на импульсном напряжении принципиально не отличается от переменного напряжения. Часто основной причиной пробоя изоляции при многократном воздействии импульсного напряжения являются ЧР.

## 2. Высоковольтная изоляция

Высоковольтная изоляция подразделяется на внутреннюю и внешнюю. Внешняя находится в контакте с атмосферой, внутренняя — внутри герметичного объема. Различается также изоляция для наружной и внутренней установки (наружная — вне помещений, внутренняя — отделена от внешних воздействий).

Различают кратковременное пробивное напряжение  $U_{\text{ПР}}$  и длительное  $U_{\text{РАБ}}$ . На изоляцию воздействуют грозовые и коммутационные импульсы, испытательные напряжения, а  $U_{\text{РАБ}}$  должно воздействовать длительное время (20-30 лет) без пробоев.

При длительном воздействии  $U_{\text{РАБ}}$  происходит старение изоляции.

Причины старения:

- 1) электрические — частичные разряды, трекинг, изменение  $\gamma$ ,  $\text{tg } \delta$ ;
- 2) тепловые — ускорение химических реакций, увеличение  $\text{tg } \delta$ , уменьшение  $\rho$ ;
- 3) механические — трещины, усталость, разрушение;
- 4) химические — окисление, образование радикалов и т. п.;
- 5) внешняя среда — влага, ультрафиолетовые лучи, температура.

### 2.1. Высоковольтные изоляторы

По назначению изоляторы подразделяются на линейные и станционно-аппаратные, которые, в свою очередь, делятся на опорные и проходные.

#### 2.1.1. Линейные изоляторы

Линейные изоляторы применяются для крепления и изолирования проводов и тросов воздушных линий электропередачи. По конструктивному исполнению они делятся на штыревые и подвесные.

Штыревые изоляторы изготавливаются из электротехнического фарфора или стекла и монтируются на опорах с помощью штырей или крюков. Выпускаются различного конструктивного исполнения. Обозначение, например, ШФ10-В — штыревой, фарфоровый, номинальное напряжение 10 кВ, конструктивное исполнение В (всего существует три варианта конструктивного исполнения — А, Б, В). Выпускаются промышленностью на напряжение до 35 кВ.

Подвесные изоляторы применяются для напряжений больше 35 кВ. Подразделяются на тарельчатые (шарнирные) и стержневые. Изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла и полимерных



материалов. На рис. 2.1 приведена конструкция подвесного тарельчатого изолятора.

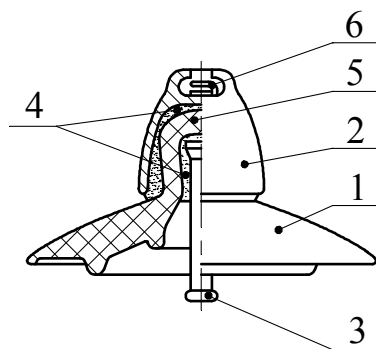


Рис. 2.1. Подвесной шарнирный изолятор с конусной головкой: 1 — тарелка изолятора; 2 — чугунная шапка; 3 — стальной стержень; 4 — цементная замазка; 5 — головка изолятора; 6 — замок

Шапка 2 и стержень 3 обеспечивают шарнирное соединение одного изолятора с другим при сборке в гирлянду изоляторов. Изоляторы испытывают только растягивающие усилия, но благодаря конструктивному исполнению головка 5 изолятора работает на сжатие и поэтому выдерживает очень большие механические нагрузки (до 30-50 Тс). Обозначение изолятора, например, ПСГ6-А — подвесной, стеклянный, грязеустойчивый. Минимальная разрушающая нагрузка 6 тонн-сила.

Подвесные стержневые изоляторы изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла, ситалла, стекловолокна с полимерным покрытием. Один изолятор может заменить гирлянду из 7 тарельчатых изоляторов на напряжение 110 кВ. Шарнирно крепится при помощи двух шапок с замками на концах изолятора. Достоинством стержневых изоляторов является непробиваемость, кроме того, за счет малого диаметра изолятора повышаются градиенты электрического поля по поверхностному перекрытию. Обозначение изолятора, например, СФ-110/2,25 — стержневой, фарфоровый, номинальное напряжение 110 кВ, минимальная разрушающая нагрузка 2,25 тонн-сила.

### 2.1.2. Станционно-аппаратные изоляторы

Опорные изоляторы предназначены для крепления шинопроводов, деталей аппаратов и изолирования их от заземленных конструкций и между собой. Изготавливают для наружной и внутренней установки на напряжение до 110 кВ. На большее напряжение опорные изоляторы собирают в колонны.

Опорные изоляторы для наружной установки делятся на штыревые и стержневые. Штыревые изоляторы используются в тех случаях, когда требуется большая механическая прочность на изгиб. Изготавливаются из электротехнического фарфора. Обозначение, например,

ОНШ-35-2000 — опорный, наружной установки, штыревой, номинальное напряжение 35 кВ, минимальная разрушающая нагрузка 2000 кГ-сила.

Опорно-стержневые изоляторы изготавливаются на напряжение 35-150 кВ из электротехнического фарфора. Концы изолятора армированы чугунными фланцами. Обозначение, например, ОНС-110-1000 — опорный, наружной установки, стержневой, номинальное напряжение 110 кВ, минимальная механическая прочность 1000 кГ-сила.

Проходные изоляторы и вводы используются там, где токоведущие части проходят через стены, перекрытия зданий, ограждения электроустановок или вводятся внутрь металлических корпусов оборудования. Проходными изоляторами называют изоляторы на напряжение до 35 кВ, на напряжение 110 кВ и выше — вводы. Вводы имеют более сложную конструкцию изоляции и выполняются с маслобарьерной изоляцией (до 150 кВ) или с бумажномасляной изоляцией (220 кВ и выше).

Проходные изоляторы на высокие напряжения до 35 кВ включительно изготавливаются из электротехнического фарфора, стекла, бакелитовой бумаги. На рис. 2.2 приведена конструктивная схема проходного изолятора.

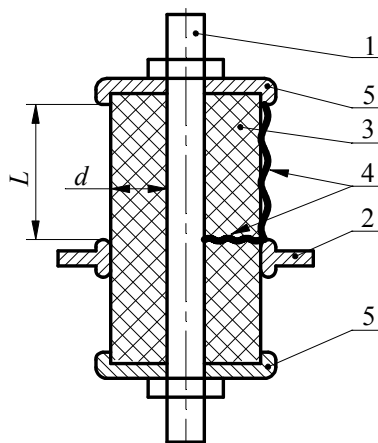


Рис. 2.2. Конструктивная схема проходного изолятора: 1 — токоведущий стержень (труба); 2 — заземленный фланец; 3 — твердая изоляция; 4 — пути пробоя ( $U_{пр} > U_{пер}$ ); 5 — высоковольтные фланцы

Для увеличения напряжения перекрытия  $U_{пер}$  на наружной поверхности изолятора делают ребра, а также увеличивают диаметр изолятора у заземленного фланца. Проходные изоляторы маркируются по напряжению, току и изгибающей механической нагрузке. Например, П-10 / 400 - 750, что означает: проходной изолятор,  $U_H = 10$  кВ,  $I_H = 400$  А,  $P_{изг} = 750$  кГс.

Вводы — это проходные изоляторы на 110 кВ и выше. Они содержат внешнюю и внутреннюю изоляцию сложной конструкции.

Внешней изоляцией является фарфоровая покрывка. Внутренняя — участки изоляции в теле ввода. Вводы бывают двух типов — маслобарьерные и бумажномасляные (для  $U_H \geq 220$  кВ).

1) Маслобарьерный ввод 110-150 кВ конденсаторного типа (рис 2.3). Чтобы повысить  $U_{пр}$ , а) разбивают промежуток на  $n$  малых промежутков барьерами 5; б) выравнивают поле металлическими обкладками (фольга на барьерах). В результате  $U_{пр}$  повышается в  $\sim 2,5$  раза.

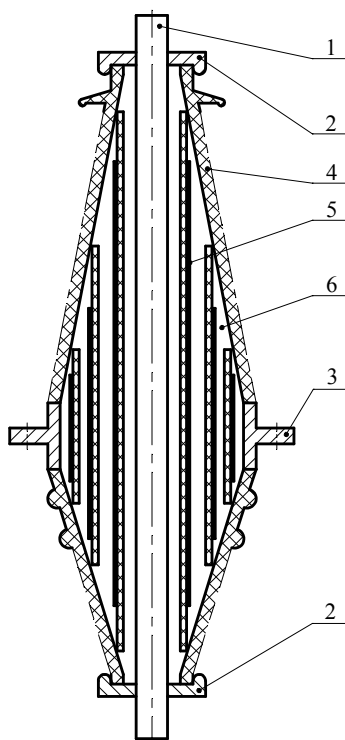


Рис. 2.3. Конструктивная схема маслобарьерного ввода: 1 — токопровод (стержень), 2 — высоковольтный фланец, 3 — заземленный фланец, 4 — фарфоровая рубашка, 5 — барьеры с обкладками, 6 — масло

Обкладки выравнивают поле в радиальном и аксиальном направлениях. Наиболее важно выровнять поле в аксиальном направлении для уменьшения длины ввода, для этого уступы делают одинаковыми. На рис. 2.4 приведены эпюры распределения напряженностей электрического поля в радиальном (а) и аксиальном (б) направлениях маслобарьерного ввода.

Токоведущий стержень обматывается несколькими слоями бумаги. Основную электрическую прочность изоляции ввода обеспечивает масло, находящееся внутри покрывки.

2) Бумажномасляный ввод конденсаторного типа на класс напряжения  $U \geq 220$  кВ. Ввод изготавливается путем намотки на токоведущий стержень (или трубу) изоляционного тела из бумаги. Через каждые 2-4 мм намотки бумаги в тело закладываются конденсаторные об-

кладки из алюминиевой фольги для выравнивания поля в осевом и радиальном направлениях. После намотки тело пропитывается маслом в вакууме, а после сборки ввод герметизируется.

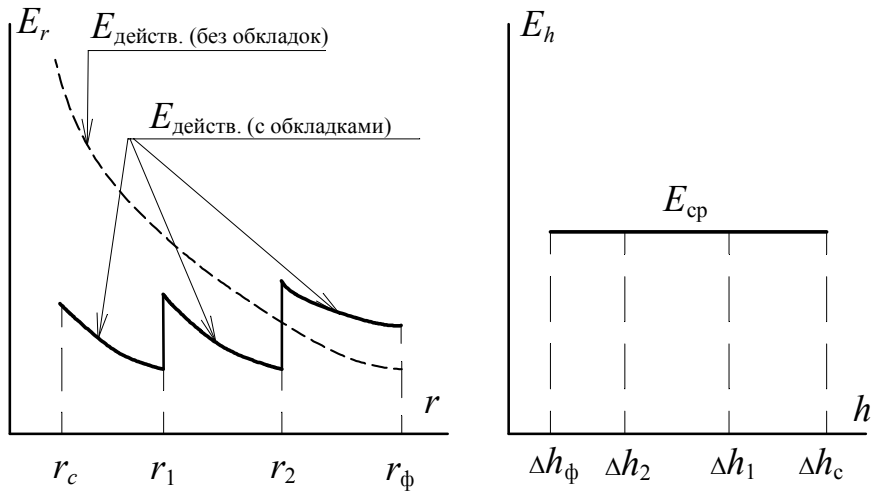


Рис. 2.4. Распределение напряженности электрического поля в радиальном (а) и аксиальном (б) направлениях ввода:  $r_c$  — радиус токопровода (стержня);  $r_1$  — радиус первой обкладки (фольги);  $r_2$  — радиус второй обкладки (фольги);  $r_\phi$  — радиус обкладки у фланца (заземлена);  $\Delta h_c$  — длина уступа изоляции у стержня;  $\Delta h_1$  — длина уступа на первом барьере;  $\Delta h_2$  — длина уступа на втором барьере;  $\Delta h_\phi$  — длина уступа на барьере у фланца

## 2.2. Изоляция высоковольтных конденсаторов

Назначение конденсаторов:

- 1) улучшение  $\cos \varphi$ ;
- 2) ВЧ связь;
- 3) компенсация сдвига по фазе между током и напряжением;
- 4) выпрямительные установки — фильтры и др.;
- 5) высоковольтные импульсные установки.

В качестве изоляции используется: газ, жидкости, твердые неорганические материалы, твердые органические материалы. Твердая изоляция в высоковольтных конденсаторах чаще органическая — бумага, пленки с пропиткой маслом. Конденсатор характеризуется удельной запасаемой энергией, например Дж / дм<sup>3</sup>:

$$W_{\text{уд}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_p^2}{2}.$$

Высоковольтные конденсаторы разного назначения, разных номинальных напряжений и реактивной мощности устроены одинаково: состоят из пакетов секций, соединенных последовательно-параллельно и расположенных в герметизированном корпусе, залитом пропиточной жидкостью.

Основным элементом любого силового конденсатора является секция — спирально намотанный рулон из лент диэлектрика и алюминиевых обкладок, выполняющих роль электродов. Секции после намотки сплющивают для уменьшения объема.

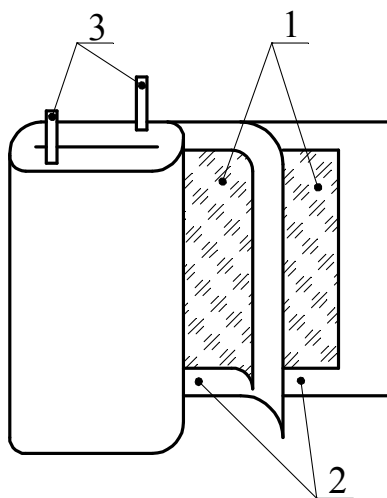


Рис. 2.5. Устройство секции высоковольтного конденсатора: 1 — фольга; 2 — диэлектрик (слои бумаги, пленки); 3 — выводы

### 2.3. Изоляция трансформаторов

В силовых трансформаторах изоляция состоит из различных по конструкции элементов, работающих в разных условиях. Воздушные промежутки между вводами и по их поверхности — внешняя изоляция. Изоляционные участки расположенные внутри бака трансформатора и внутри вводов — внутренняя изоляция. Внутренняя изоляция подразделяется на главную и продольную. Главная изоляция — между разными обмотками, стенками бака, магнитопроводом и др. Продольная изоляция между элементами одной и той же обмотки: между витками, слоями, катушками.

В высоковольтных силовых трансформаторах в качестве главной используется маслбарьерная изоляция. Продольная изоляция выполняется бумажно-масляной. Количество барьеров зависит от номинального напряжения трансформатора.

На рис. 2.6 приведено схематическое устройство главной изоляции высоковольтного трансформатора.

Высоковольтные обмотки выполняются катушечного типа или непрерывной цилиндрической многослойной намоткой.

Трансформаторы до 35 кВ выполняются с изолированной нейтралью. Трансформаторы свыше 110 кВ — с заземленной нейтралью.

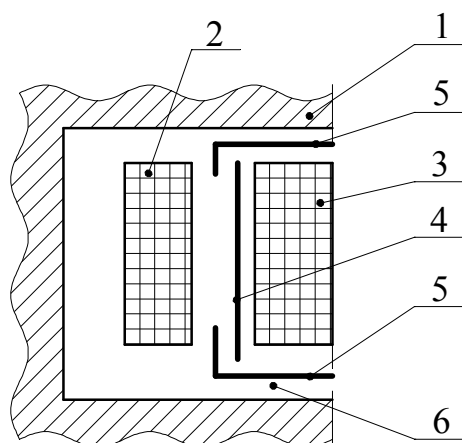


Рис. 2.6. Схема устройства изоляции высоковольтного трансформатора: 1 — магнитопровод, 2 — низковольтная обмотка (НВ), 3 — высоковольтная обмотка (ВВ), 4 — барьер, 5 — щитки электроизоляции, 6 — масло

## 2.4. Изоляция кабелей

Основное назначение кабелей — передача электрической энергии от подстанции к потребителям.

Силовые кабели высокого напряжения выполняются трех типов:

1) кабели с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой на напряжение до 35 кВ (рабочая напряженность  $E_{РАБ}=2...3$  кВ/мм);

2) кабели с бумажной изоляцией с пропиткой маслом под давлением — маслonaполненные кабели: 2...3 атм — низкое давление ( $E_{РАБ}=3...5$  кВ/мм); 4...5 атм — среднее давление ( $E_{РАБ}=6...8$  кВ/мм); 8...15 атм — высокое давление ( $E_{РАБ}=10...15$  кВ/мм);

3) кабели с монолитной полимерной изоляцией (полиэтилен, фторопласт и др.).

Кроме этого нашли применение кабели в трубах под давлением масла или газа. Разрабатываются криогенные кабели с охлаждением до температуры жидкого азота (77 К) или жидкого гелия (5 К). Кабели выполняются на напряжение до 500 кВ. Разрабатываются кабели на напряжение 750-1150 кВ.

На рис. 2.7 приведена схема устройства трехфазного кабеля с поясной изоляцией. Выпускаются на рабочее напряжение до 10 кВ. На 35 кВ выпускаются кабели с отдельно освинцованными жилами и броней из стальных лент типа АОСБ (А — алюминиевая жила, О — отдельно освинцованные жилы, СБ — броня стальными лентами).

На рис. 2.8 приведена схема устройства маслonaполненного кабеля на рабочее напряжение 110 кВ. Как правило, выполняются однофазными в свинцовой оболочке с броней из круглых или плоских проволок. Например, типа МССК-110 — М — маслonaполненный; С —

среднего давления; С — свинцовый экран; К — броня круглой стальной проволокой.

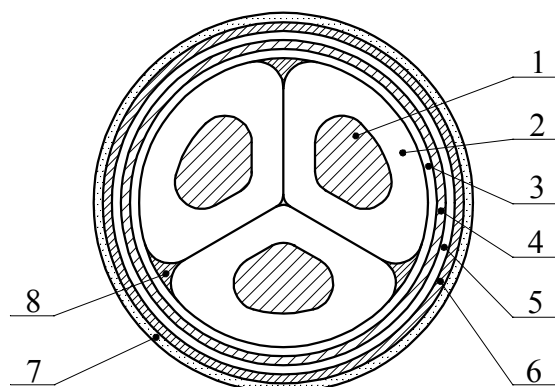


Рис. 2.7. Схема устройства изоляции кабелей до 35 кВ: 1 — жила, 2 — фазная изоляция, 3 — поясная изоляция, 4 — герметичное покрытие, 5 — подушка, 6 — броня, 7 — антикоррозионное покрытие, 8 — наполнитель (джут)

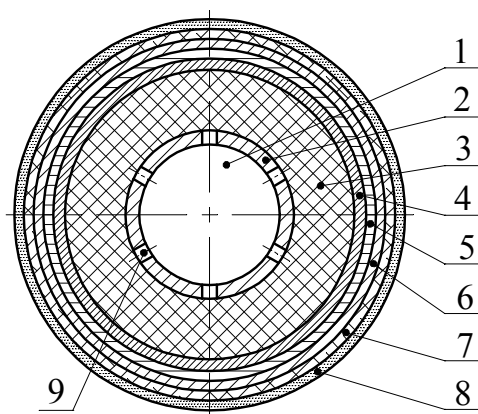


Рис. 2.8. Схема устройства изоляции кабеля 110 кВ: 1 — масляный канал, 2 — перфорированная токоведущая жила, 3 — бумажно-масляная изоляция, 4 — полупроводящий слой, 5 — герметичное покрытие, 6 — подушка, 7 — броня, 8 — антикоррозионное покрытие, 9 — отверстия для прохода масла в изоляцию

## 2.5. Изоляция электрических машин

К вращающимся машинам высокого напряжения относятся турбо- и гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и двигатели большой мощности с номинальным напряжением 3 кВ и выше. Они выполняют важные функции в энергосистемах и на промышленных предприятиях. К их изоляции предъявляются очень высокие требования. Гидрогенераторы разрабатываются и изготавливаются на напряжение до 220 кВ. Устройство изоляции вращающейся машины высокого напряжения определяется конструкцией ее статорной обмотки. Изоляция статорных обмоток подразделяется на главную (корпусную) и продольную. Главная — изоляция между проводниками обмотки и корпусом, а

продольная — между витками одной катушки и катушками в одном пазу.

Большое значение имеет регулирование электрического поля в изоляции статорной обмотки. Основная задача регулирования электрических полей — устранение частичных разрядов в воздушных зазорах между поверхностью изоляции и стенками пазов и устранение скользящих разрядов по поверхности изоляции в местах выхода обмоток из паза статора, где поле получается резконеоднородным. Для этого используются полупроводящие покрытия из железистой асбестовой ленты и различные лаки. На рис. 2.9 приведено устройство высоковольтной изоляции в пазу электрической машины.

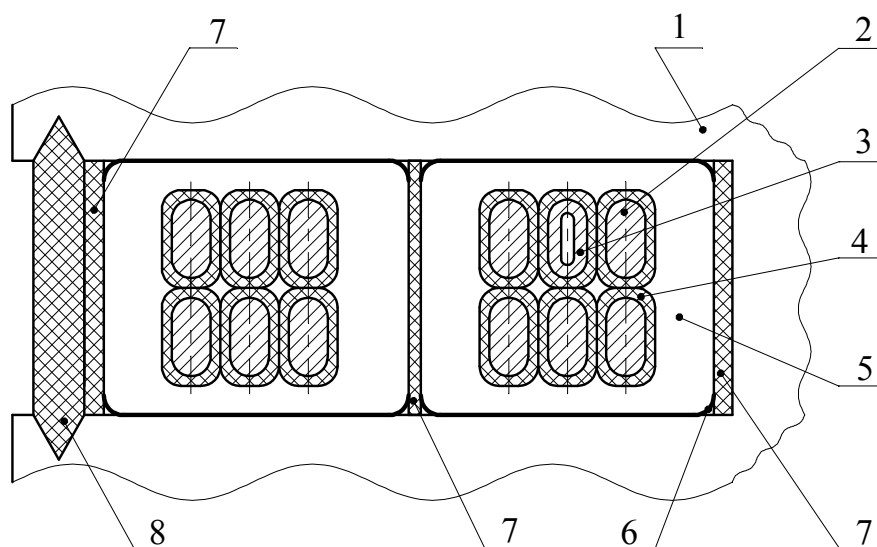


Рис. 2.9. Схема устройства высоковольтной изоляции электрической машины: 1 — статор, 2 — проводник сплошной, 3 — проводник полюса, 4 — витковая (продольная) изоляция, 5 — главная корпусная изоляция, 6 — полупроводящее покрытие, 7 — прокладки, 8 — клин

Изоляционные материалы, которые используются в электрических машинах, изготавливают на основе слюды (миканит, микаленты, микафорий), широко используются компаунды (термопластичные), в качестве связующих применяют терморезистивные лаки и смолы.

## 2.6. Профилактика изоляции

### 2.6.1. Задачи и цели профилактики

Профилактика — система мероприятий, с помощью которых обеспечивается надежная работа изоляции в процессе эксплуатации. Профилактика проводится с целью выявления дефектов, возникающих в изоляции при эксплуатации. Ослабление электроизоляционных свойств происходит за счет:



- а) общего старения;
- б) появления местных дефектов.

Общее старение охватывает большой объем изоляции.

Местные дефекты появляются в виде сосредоточенных трещин, воздушных включений, частичных увлажнений.

В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены в результате простого осмотра изоляции, поэтому для их выявления необходима определенная система профилактических испытаний.

Профилактические испытания изоляции резко снижают аварии в энергетических системах из-за своевременного выявления дефектной изоляции.

Для каждого вида изоляции характерны определенные виды дефектов; изучение их физических особенностей и причин появления также входит в задачи профилактики изоляции. Это позволяет более правильно организовать эксплуатацию оборудования и разрабатывать наиболее эффективные методы профилактических испытаний.

Таким образом, в задачи профилактики изоляции входит:

- 1) создание нормальных условий работы изоляции;
- 2) обнаружение дефектов и их устранение;
- 3) изучение физических особенностей и причин появления дефектов;
- 4) разработка эффективных методов профилактики.

В табл. 2.1 приведены основные методы профилактических испытаний изоляции и их краткая характеристика.

Таблица 2.1.

Профилактические испытания изоляции

№ п/п	Метод испытания изоляции	Дефекты, выявляемые этим методом	Общая характеристика метода
1	Измерение сопротивления изоляции	Своязные проводящие пути или пробой	Один из основных методов
2	Измерение $\text{tg}\delta$	Процессы ионизации и старения изоляции в целом	Один из основных методов
3	Измерение емкости	Общее увлажнение изоляции	В основном для контроля влажности трансформаторов и электрических машин
4	Определение наличия частичных разрядов	Процессы ионизации в воздушных полостях	Дополнительный метод (получает все большее распространение)

5	Измерение распределения напряжения	Частичный пробой, несквозные пути утечки	Основной метод для гирлянд изоляторов
6	Приложение повышенного напряжения	Местные дефекты при снижении электрической прочности	Контроль минимального запаса электрической прочности

### 2.6.2. Измерение сопротивления изоляции (токов утечки)

Этот метод из-за своей простоты нашел очень широкое применение в практике и является одним из основных методов контроля качества изоляции.

Известно, что любая изоляция имеет конечную величину сопротивления, хотя и достаточно большую. Поэтому при приложении напряжения через изоляцию, кроме токов на зарядку геометрической емкости и абсорбционных токов, течет ток, определяемый электропроводностью диэлектрика. С увеличением дефектности изоляции ток утечки возрастает. Это явление и положено в основу данного метода.

Сопротивление изоляции равно:

$$R_{из} = \frac{U}{I}.$$

На постоянном напряжении  $R_{из}$  будет изменяться во времени, поскольку на величину тока будут влиять процессы медленной поляризации. На рис. 2.10 показан характер изменения тока через изоляцию и сопротивление изоляции от времени.

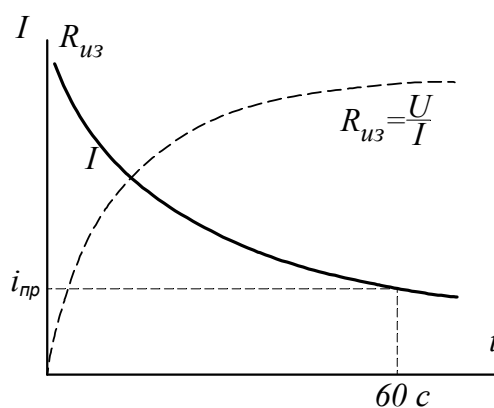


Рис. 2.10. Изменение тока утечки и сопротивления изоляции во времени

Опытным путем установлено, что для большинства изоляционных конструкций время достижения установившегося значения тока

утечки  $I$  меньше 1 мин., т. е. к этому времени после приложения напряжения  $R_{из}$  также достигнет установившегося значения.

Резкое падение  $R_{из}$  показывает на далеко зашедшее развитие дефекта в изоляции, или на наличие сквозного проводящего пути, или пробоя. Обычно суждение об изоляции составляется на основании сравнения с результатом предыдущих измерений  $R_{из}$  или заводских данных.

Измерение сопротивления изоляции производится с помощью специальных приборов — мегаомметров, у которых шкала проградуирована в МОм или кОм.

Конструкции отечественных мегаомметров для измерения различны. Наибольшее применение нашли индукторные (с ручным приводом) типа М-110 на 500 В, МОМ-5 на 1000 В и МС-06 на 2500. В настоящее время находят широкое применение электронные мегаомметры, например, типа ЭСО210.

### 2.6.3. Измерение $\operatorname{tg} \delta$

Диэлектрические потери в изоляции характеризуются углом диэлектрических потерь. Если обратиться к рис. 2.11, то  $\operatorname{tg} \delta$  определяется отношением активной составляющей тока в диэлектрике к емкостной составляющей

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c},$$

где

$I_a$  — активная составляющая тока через диэлектрик;

$I_c$  — реактивная составляющая тока через диэлектрик.

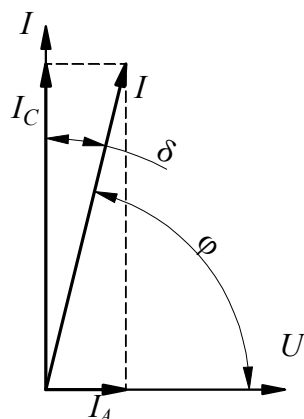


Рис.2.11. Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями

Измерение величины  $\operatorname{tg} \delta$ , а не величины самих диэлектрических потерь:

$$P = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega U C \operatorname{tg} \delta,$$

имеет следующие преимущества:

1) величина  $\operatorname{tg} \delta$  как характеристика материала не зависит от размеров объекта, но позволяет обнаружить возникающие в изоляции дефекты, особенно если они распространены по всему объему;

2) величина  $\operatorname{tg} \delta$  может быть непосредственно измерена мостом переменного тока.

Метод контроля изоляции путем измерения угла диэлектрических потерь является самым эффективным и распространенным. Он позволяет выявить следующие дефекты: увлажнение, воздушные (газовые) включения с процессами ионизации, неоднородности и загрязнения и др.

Измерения  $\operatorname{tg} \delta$  ведутся при напряжении  $U \leq 10$  кВ и частоте 50 Гц при помощи высоковольтных мостовых схем (мост Шеринга). Оценка состояния изоляции по значению  $\operatorname{tg} \delta$  предусматривается нормативами почти для всех видов изоляции. В зависимости от конструктивных особенностей объекта (заземлен один электрод или нет) используется нормальная или перевернутая схемы моста Шеринга.

По нормальной схеме обычно выполняются измерения в лабораториях, а также измерения междуфазной изоляции (кабель, трансформатор и т.п.).

Выпускаются мосты типа МДП, которые позволяют измерять  $\operatorname{tg} \delta$  при емкостях объектов от 40 до 20000 пФ.

При работе с перевернутой схемой нужно иметь в виду, что от измерительных ветвей и конденсатора  $C_3$  (измеряемый объект) идут проводники, находящиеся под высоким напряжением.

Для измерений по перевернутой схеме применяется малогабаритный переносной мост МД-16, который позволяет измерять  $\operatorname{tg} \delta$  при емкостях объекта от 30 до 40000 пФ.

#### **2.6.4. Методы обнаружения частичных разрядов**

1. Метод измерения электромагнитных волн, излучаемых частичными разрядами (индикаторы радиоизлучений — ИРИ). ИРИ называют дефектоскопами.

Этот метод основан на радиоприеме электромагнитных излучений при ЧР в изоляции. Он чаще всего применяется для выявления дефектных изоляторов на линиях электропередачи.

Недостатками этого метода являются: плохая помехоустойчивость (помехи создаются короной проводов и др.); отсутствие количественной оценки.

2. Метод диэлектрических потерь, основанный на определении точки перегиба на кривой зависимости тангенса диэлектрических потерь от напряжения на диэлектрике (рис. 2.12), которая называется кри-

вой ионизации. Излом на этой кривой совпадает с возникновением частичных разрядов в объеме изоляции.

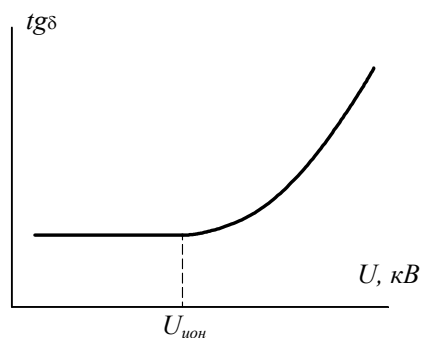


Рис. 2.12. Кривая ионизации

К недостаткам этого метода можно отнести не способность регистрировать сосредоточенные дефекты и место их нахождения. В настоящее время метод регистрации точки перегиба на кривой ионизации вытесняется методами регистрации высокочастотных составляющих тока или напряжения частичных разрядов.

### 2.6.5. Методы регистрации высокочастотных составляющих частичных разрядов (индикаторы частичных разрядов – ИЧР)

Желательным является создание такой техники для определения частичных разрядов, которая позволяла бы регистрировать самые слабые частичные разряды и обеспечивала количественные измерения энергии, рассеиваемой одиночными разрядами. Это требование сейчас воплощают в индикаторах частичных разрядов, которые непосредственно включаются в цепь разряда. Они состоят из приемного контура, усилителя и измерительного прибора. В основу положено измерение кажущегося заряда:

$$\Delta Q_0 = \Delta U C_0,$$

где  $C_0$  – емкость изоляции.

Измеряются пульсации напряжения  $\Delta U$ , которые через усилитель подаются на пластины ЭО. По моменту возникновения пульсаций на экране осциллографа определяют напряжение возникновения ионизации, а по амплитуде импульсов и их частоте – интенсивность частичных разрядов. Существует несколько вариантов схемы.

а) Схема с активным сопротивлением (рис. 2.13).

Сопротивление  $R_1$  включается последовательно с измеряемым объектом и падение напряжения на нем регистрируется индикатором частичных разрядов. По осциллографу судят о наличии частичных разрядов. Недостатком этого метода является малая помехоустойчивость.

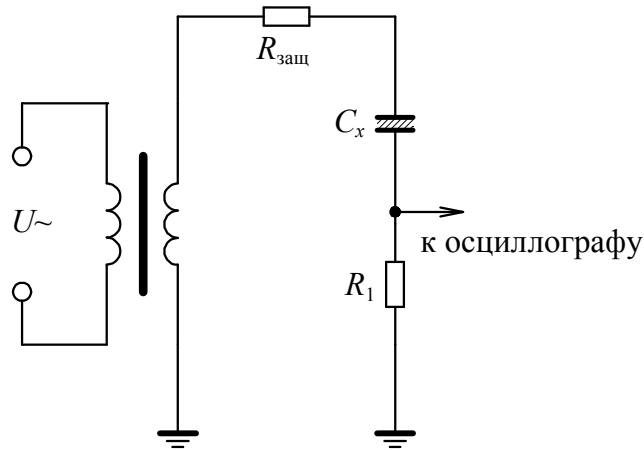


Рис. 2.13. Схема для обнаружения частичных разрядов с помощью активного сопротивления:  $R_{\text{защ}}$  — защитное сопротивление,  $C_x$  — испытуемый объект,  $R_1$  — разделительная емкость

На осциллографе можно наблюдать картину, приведенную на рис. 2.14.

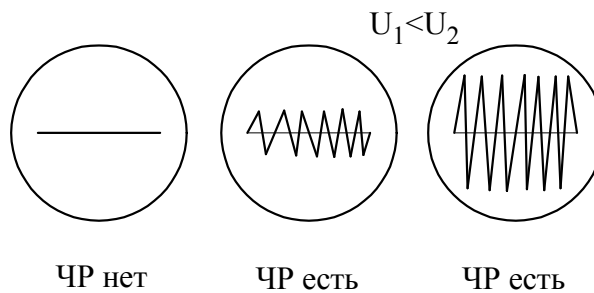


Рис. 2.14. Вид осциллограмм при разной интенсивности частичных разрядов

б) Схема с индуктивностью и емкостью (рис. 2.15).

Как было показано выше при возникновении ЧР появляются высокочастотные колебания амплитудой  $\Delta U$ . Индикатор частичных разрядов (ИЧР) подключен к объекту через разделительную емкость  $C_{\text{разд}}$ , которая служит заграждающим фильтром для токов рабочей частоты. При возникновении ЧР в объекте ( $C_x$ ) хаотические колебания напряжения на объекте возбуждают в ИЧР незатухающие периодические колебания с частотой, соответствующей периоду колебаний контура

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.1)$$

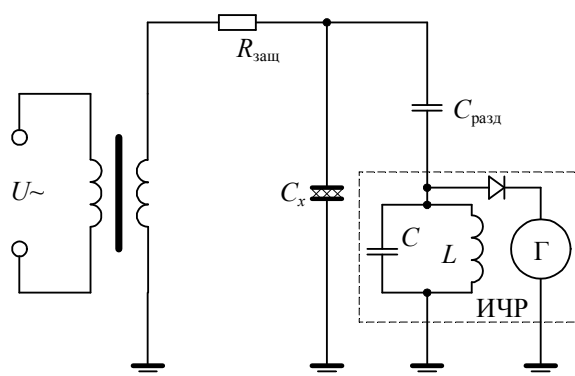


Рис. 2.15. Схема измерения частичных разрядов с применением колебательного контура и гальванометра:  $R_{\text{защ}}$  — защитное сопротивление,  $C_x$  — испытуемый объект,  $C_{\text{разд}}$  — разделительная емкость,  $L-C$  — колебательный контур,  $\Gamma$  — гальванометр

Частота настройки ИЧР обычно принимается порядка нескольких десятков килогерц. Амплитуда высокочастотных колебаний  $\Delta U$  измеряется гальванометром  $\Gamma$ . По значению  $\Delta U$  из формулы (2.1) определяется кажущаяся интенсивность ионизации.

В заключение следует отметить, что использование метода ЧР для профилактических испытаний является весьма перспективным и сейчас широко внедряется в промышленности, т. к. он позволяет вести непрерывный контроль под рабочим напряжением.

Но следует отметить и недостатки:

1) наличие большого количества помех, затрудняющих расшифровку полученных результатов (источник помех — корона на проводах, искрение коллекторов электрических машин и т.д.);

2) метод фиксирует не наличие дефекта, а наличие ЧР, в то время как может существовать дефект и без ЧР (трещина, заполненная водой или другой проводящей жидкостью, обуглероженная пора, где прекратились ЧР, хотя это серьезные дефекты).

Но в комбинации с другими методами профилактики индикация частичных разрядов дает эффективные результаты.

### 2.6.6. Контроль влажности изоляции

Емкость изоляции при постоянной температуре и частоте приложенного напряжения является величиной постоянной. Поэтому скачкообразное изменение величины емкости указывает на наличие в изоляции дефектов. Особенно сильное влияние на изменение емкости оказывает увлажнение изоляции, поэтому для контроля увлажнения изоляции нашел метод измерения емкости изоляции при разных частотах, который получил название метод "емкость-частота".

При увеличении частоты емкость изоляции какого-либо устройства (трансформатора, кабеля, изолятора и т.т.) уменьшается. Это

явление положено в основу метода "емкость-частота". Метод "емкость-частота" заключается в сравнении величин емкости, измеренных при двух различных частотах  $f = 2$  Гц и  $f = 50$  Гц, ( $C_2$  и  $C_{50}$ ) при  $t = 10 - 20^\circ\text{C}$ . О качестве изоляции судят по отношению  $C_2/C_{50}$ , чем это отношение меньше, тем изоляция лучше (суше).

На рис. 2.16 представлены зависимости изменения емкости от частоты для сухой (1) и увлажненной изоляции (2).

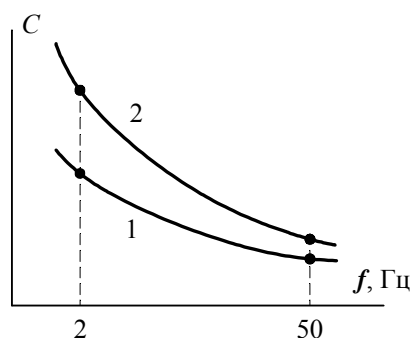


Рис. 2.16. Зависимость емкости изоляции от частоты: 1 — сухая изоляция, 2 — увлажненная изоляция

Опытным путем было найдено, что для сухой изоляции отношение

$$k_f = \frac{C_2}{C_{50}} \leq 1,2 - 1,3.$$

### 2.6.7. Испытание повышенным напряжением

Как мы уже знаем, в процессе эксплуатации изоляция электротехнических устройств стареет, ее электрическая прочность снижается и время жизни уменьшается. Особенно способствуют старению температурные, механические и электрические воздействия. Старение изоляции происходит неравномерно. Неоднородность изоляции и внешних воздействий приводят к тому, что скорость процессов старения на разных участках неодинакова. Образуются места, которые имеют значительно меньшую электрическую прочность, чем здоровая изоляция. В большинстве случаев (например, у электрических машин) причиной аварии являются пробой изоляции в местах образования сосредоточенных дефектов. Чтобы предотвратить аварийные повреждения, изоляцию периодически испытывают повышенным напряжением для выявления опасных дефектов и для проверки наличия необходимого запаса электрической прочности изоляции.

Испытание повышенным напряжением гарантирует также, что изоляция оборудования имеет нужный уровень прочности по отношению к перенапряжениям, возникающим в эксплуатации.



Испытательное напряжение должно прикладываться к изоляции в течение времени, достаточного для развития частичных разрядов и даже развития разряда до пробоя. В то же время при длительном приложении повышенного напряжения электрическая прочность изоляции резко снижается. На практике применяют 1 минутные испытания напряжением промышленной частоты 50 Гц.

Эффективность испытания определяется величиной испытательного напряжения. При малом напряжении дефекты не выявляются, а при чрезмерно высоком могут пробиться те участки изоляции, которые не пробивались бы в эксплуатации. Испытательное напряжение нормируется.

При выпуске с завода готовых изделий испытание повышенным напряжением является основным видом испытания изоляции. Испытательное напряжение для разных типов оборудования определены действующими стандартами.

При профилактических испытаниях в процессе эксплуатации величина испытательного напряжения должна составлять  $\sim 0,75$  от величины заводского испытательного напряжения.

Испытание повышенным напряжением проводится на переменном, постоянном и импульсном напряжениях.

### 3. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения

#### 3.1. Установки для получения высоких переменных напряжений

Для получения высоких переменных напряжений применяются однофазные высоковольтные испытательные трансформаторы на напряжение до  $U_n = 1200$  кВ. На большие напряжения используют каскадное соединение трансформаторов ( $U_n = 2200$  кВ и более).

Особенностью испытательных трансформаторов являются:

- 1) кратковременность работы;
- 2) отсутствие атмосферных перенапряжений;
- 3) наличие бросков тока и резких спадов напряжения при пробоях и перекрытиях испытуемых объектов.

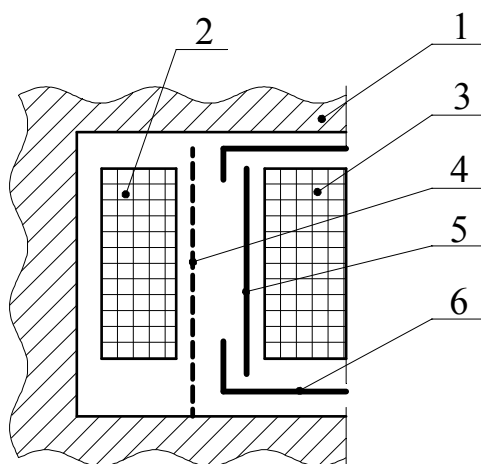


Рис. 3.1. Конструкция однофазного трансформатора: 1 — магнитопровод, 2 — обмотка низкого напряжения, 3 — обмотка высокого напряжения, 4 — экран медный, 5 — барьер электроизоляционный, 6 — шайбы электроизоляционные

Как правило, между обмотками низкого и высокого напряжений расположен медный разрезанный экран, соединенный с баком трансформатора. Экран предназначен для защиты обмотки низкого напряжения от наведения высоких потенциалов при резких изменениях напряжения со стороны высоковольтной обмотки.

На напряжение более 1000 кВ применяются каскадное включение трансформаторов. Каскады трансформаторов обычно состоят из 2-3 высоковольтных испытательных трансформаторов, соединенных последовательно. Поскольку один вывод обмотки трансформатора соединен с корпусом, то корпус каждого последующего трансформатора находится под высоким напряжением предыдущего трансформатора.

Следовательно, все последующие трансформаторы, кроме первого, должны быть изолированы от земли и друг от друга.

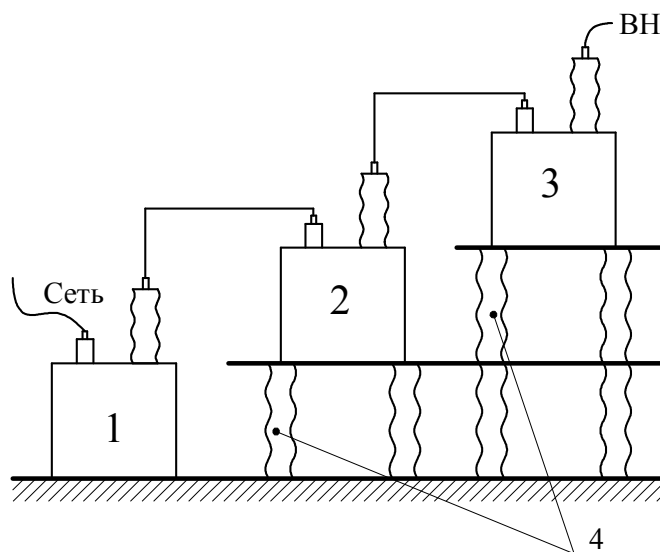


Рис. 3.2. Упрощенная схема соединения каскада трансформаторов: 1 - 3 — высоковольтные трансформаторы, 4 — опорные изоляторы

Напряжение на выходе каскада, состоящего из  $n$  последовательно включенных трансформаторов:

$$U_{\text{ВН}} = n \cdot U_2,$$

где  $U_2$  — напряжение на выходе первого трансформатора.

### 3.2. Установки для получения высоких постоянных напряжений

Постоянное напряжение часто используют для испытаний конденсаторов, кабелей, вращающихся машин.

Для получения высоких напряжений постоянного тока используются различные выпрямительные установки. Все схемы выпрямления классифицируются по следующим признакам:

- 1) по форме выпрямленного напряжения — одно- и двухполупериодные схемы;
- 2) по схеме соединения выпрямителей — мостовая схема, последовательно-параллельные схемы;
- 3) по числу фаз — одно-, двух- и трехфазные схемы;
- 4) схемы умножения напряжения.

Однополупериодная схема выпрямления приведена на рис. 3.3.

Выпрямление напряжения без фильтра по схеме рис. 3.3, а дает большую глубину пульсаций выпрямленного напряжения (рис. 3.3, в). Наличие фильтра (рис. 3.3, б) уменьшает глубину пульсаций (рис. 3.3, г) за счет подпитки от конденсатора  $C_{\text{Ф}}$  в течение времени отрицательного полупериода, когда выпрямитель  $V$  закрыт.

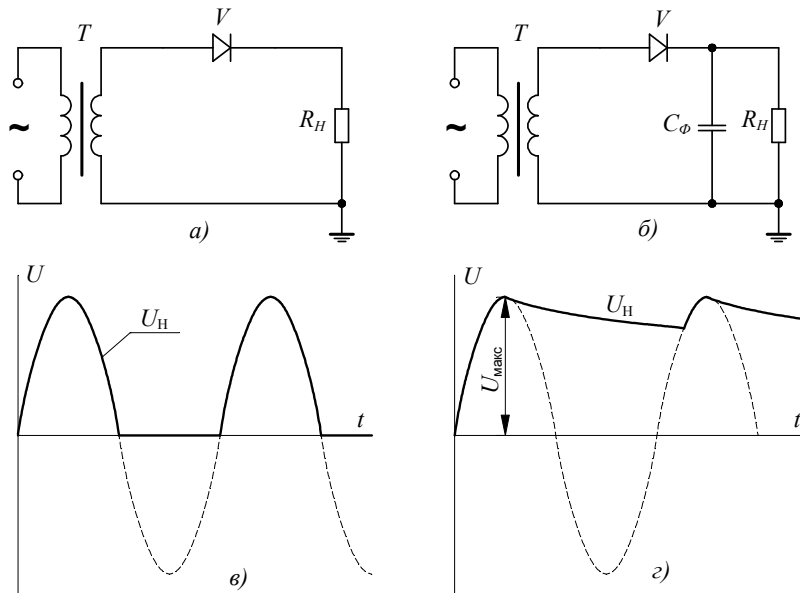


Рис. 3.3. Схема выпрямления однополупериодная: а), в) — без фильтра; б), г) — с фильтром;  $T$  — высоковольтный трансформатор;  $V$  — выпрямитель;  $R_H$  — сопротивление нагрузки;  $C_\Phi$  — емкость фильтра

Двухполупериодная мостовая схема выпрямления приведена на рис. 3.4.

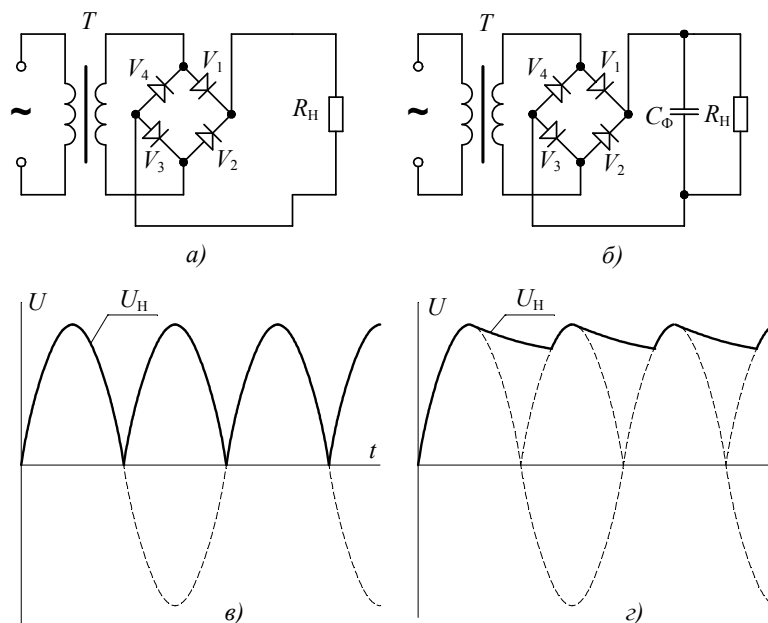


Рис. 3.4. Мостовая схема выпрямления: а), в) без фильтра, б), г) с фильтром

Четыре выпрямителя образуют мост, в одну диагональ которого включается нагрузка  $R_H$ , а к другой диагонали подключается трансформатор. При "+" полупериоде открыты выпрямители  $V_1$  и  $V_3$ , а при "-" полупериоде —  $V_2$  и  $V_4$ . Следовательно, через нагрузку протекает ток в одном направлении в течение всего периода переменного тока (рис. 3.4,

а, в). Это основное достоинство двухполупериодной схемы выпрямления. Фильтр  $C_{\Phi}$  уменьшает глубину пульсаций выпрямленного напряжения (рис. 3.4, б, г).

Включение однофазных схем выпрямления приводит к перекосу фаз в 3-х фазной сети. Для исключения этого явления используют 3-х фазные схемы выпрямления (рис 3.5, а). Кроме этого уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения (рис. 3.5, б), особенно с применением фильтра  $C_{\Phi}$ .

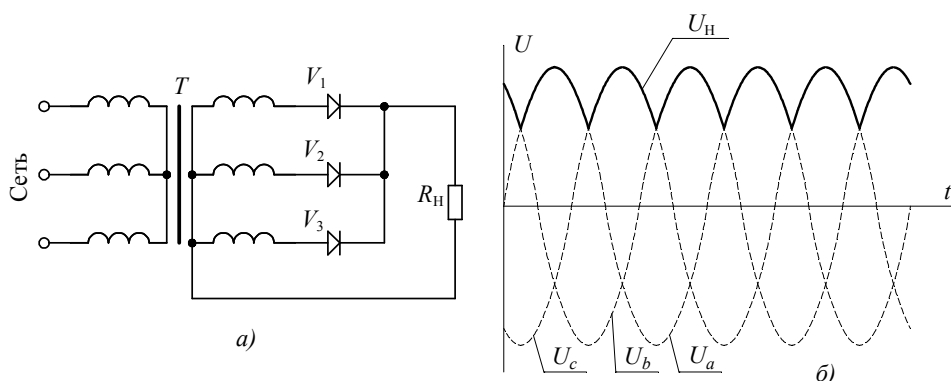


Рис. 3.5. Трехфазная однополупериодная схема выпрямления

Высокие выпрямленные напряжения удобно получать с помощью схем умножения выпрямленного напряжения. Различают:

- 1) схемы удвоения;
- 2) схемы утроения;
- 3) каскадные схемы умножения напряжения.

Простейшая однополупериодная схема удвоения напряжения приведена на рис. 3.6, а.

В один полупериод (положительный) выпрямитель пропускает ток. Емкость  $C$  заряжается до  $U_m$ : обкладки имеют полярность "+" и "-". Во втором полупериоде, когда сменилась полярность концов обмотки трансформатора, напряжение трансформатора "+" суммируется с напряжением на конденсаторе "-". На нагрузке получается пульсирующее выпрямленное напряжение, изменяющееся от нуля до  $2U_m$  (рис. 3.6, б).

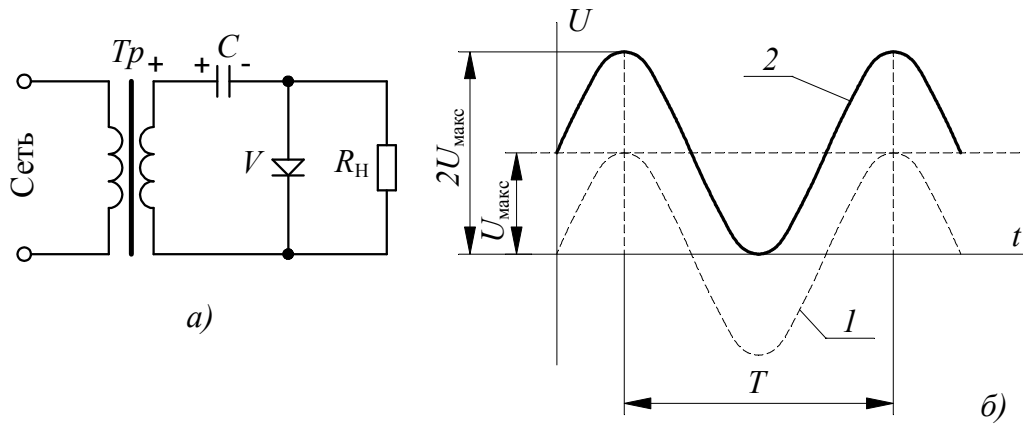


Рис. 3.6. Однополупериодная схема удвоения (а) и осциллограмма напряжения на нагрузке (б): 1 — фазное переменное напряжение; 2 — удвоенное выпрямленное напряжение

Выпрямитель оказывается также под двойным напряжением  $U_{\text{обр}} = 2U_m$ .

### 3.2.1. Каскадный генератор постоянного тока

Получение высоких напряжений постоянного тока в сотни и тысячи киловольт возможно с помощью схем выпрямления и умножения выпрямленных высоких напряжений (каскадный генератор).

Схема каскадного генератора постоянного тока состоит из схем удвоения напряжения, соединенных в многократной последовательности. Напряжение на выходе каскадного генератора равно:

$$U_{\text{вых}} = 2 \cdot n \cdot U_m$$

где  $n$  — число ступеней (схем удвоения) в каскаде;  $U_m$  — амплитудное значение питающего трансформатора.

## 3.3. Импульсные испытательные установки

Для испытания изоляции высоковольтного электрооборудования грозowymi и коммутационными импульсами используются генераторы импульсных напряжений (ГИН).

Грозовые воздействия воспроизводятся стандартными импульсами напряжения: полной и срезанной волнами. Стандартные импульсы (1,2/50 или 2,0) можно получить на установке, схема которой приведена на рис. 3.7.

Зарядка емкостей  $C$  производится параллельно, а разряжаются они последовательно, что приводит к сложению зарядных напряжений ступеней.

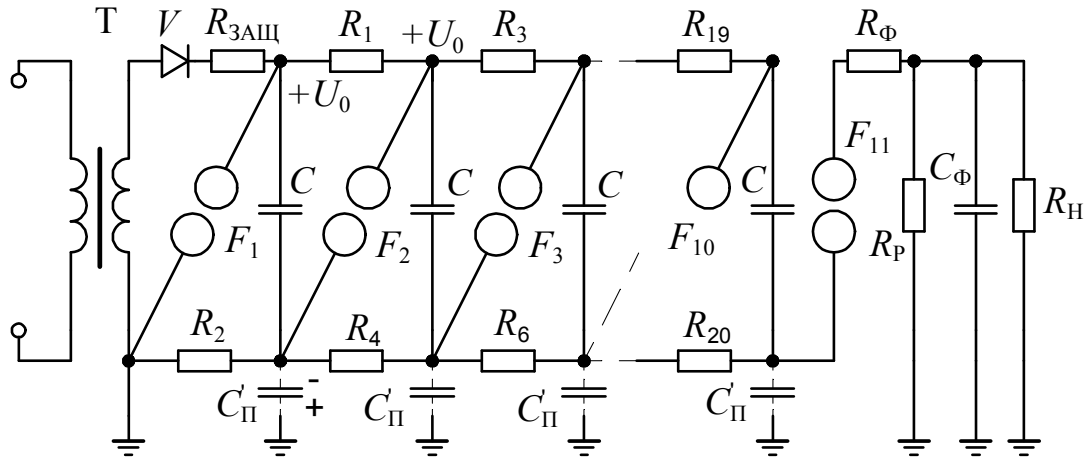


Рис. 3.7. Принципиальная электрическая схема ГИН с односторонней зарядкой:  $T$  — высоковольтный трансформатор;  $V$  — выпрямитель;  $R_{3АЩ}$  — сопротивление для ограничения зарядного тока;  $R_1$ — $R_{20}$  — зарядные сопротивления;  $F_1$ — $F_{11}$  — искровые промежутки;  $C$  — емкости ступени ГИН;  $C'_{П}$  — "паразитные" емкости;  $R_{Ф}$ ,  $C_{Ф}$  — фронтовое сопротивление и емкость;  $R_{Р}$  — разрядное сопротивление;  $R_{Н}$  — сопротивление нагрузки

Для обеспечения практически одинаковой зарядки всех конденсаторов до  $U_0$  необходимо соблюдать условие:  $R_1 \dots R_{20} \ll R_{защ}$ . При напряжении  $U_0$  пробивается только  $F_1$ . Емкость разряжается в контуре  $C - R_2 - F_1$ , но  $R_2$  большое (десятки килоом). В первый момент разрядка идет по  $C - C'_{П} - F_1$  ( $X_c = 1/\omega C$ ,  $\omega$  — круговая частота порядка мегагерц, следовательно,  $X_c$  — малое).  $C'_{П}$  быстро заряжается до  $U_0$ . Тогда к  $F_2$  приложено удвоенное зарядное напряжение  $U_0$ . Поэтому  $F_2$  может иметь расстояние в 2 раза больше, чем  $F_1$  и т.д.

Для регулирования параметров импульса напряжения и получения стандартной волны используются элементы  $R_{Ф}$  — фронтовое сопротивление,  $C_{Ф}$  — фронтовая емкость,  $R_{Р}$  — разрядное сопротивление.

Длину фронта формируют  $C_{Ф}$  и  $R_{Ф}$ , длину импульса —  $R_{\Sigma}$ , т. е.  $R_{Р}$  совместно с  $R_{Н}$ .

$$t_{ф} = 3,24 \cdot R_{Ф} \cdot C_{Ф}$$

$$t_{\theta} = 0,7 \cdot C_{ГИН} \cdot R_{\Sigma}$$

Изменение амплитуды импульса регулируется изменением расстояния между шаровыми электродами  $F_1, F_2, \dots, F_{10}$ . Промежуток  $F_{11}$  служит для отделения зарядной емкости ГИН от нагрузки при зарядке конденсаторов постоянным напряжением, чтобы исключить воздействие постоянного зарядного напряжения на нагрузку.

ГИН используется для испытания изоляции высоковольтного оборудования. Внутренняя изоляция испытывается приложением 3-х

импульсов полных и 3-х импульсов срезанных положительной и отрицательной полярности.

### 3.3.1. Генератор импульсных токов (ГИТ)

Генераторы импульсов тока используются для имитации воздействия импульсов тока большой амплитуды. Электрическая схема ГИТ приведена на рис. 3.8.

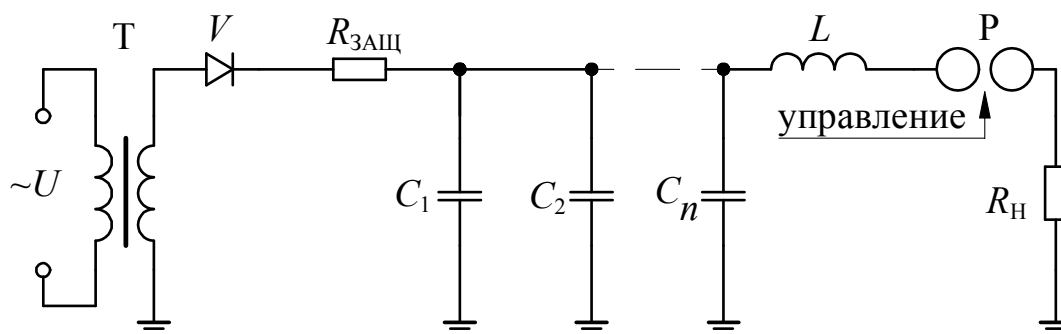


Рис. 3.8. Электрическая схема ГИТ:  $V$  – высоковольтный выпрямитель;  $R_{ЗАЩ}$  – сопротивление для ограничения зарядного тока;  $C_1 - C_n$  – батарея конденсаторов;  $P$  – разрядник управляемый;  $R_n$  – нагрузка;  $L$  – индуктивность разрядного контура

После срабатывания разрядника  $P$  батарея конденсаторов разряжается на сопротивление нагрузки. Например, в канал разряда после пробоя. Величина тока определяется, в первую очередь, индуктивностью и емкостью разрядного контура

$$I_m = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}},$$

где  $U_0$  – зарядное напряжение;  $L$  — индуктивность контура;  $C = n \cdot C_1$  (если  $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ ) — емкость разрядного контура.

## 3.4. Измерение высоких напряжений

### 3.4.1. Шаровые разрядники

Для измерений высоких напряжений широко используются шаровые разрядники. Это универсальное измерительное устройство, которым можно измерять амплитудные значения постоянного, переменного, высокочастотного и импульсного напряжений.

Величина пробивного напряжения зависит от расстояния между шарами, их диаметра, способа подключения (симметричное или один шар заземлен), относительной плотности воздуха  $\delta$ .



Для получения высокой точности необходимо выполнить ряд условий.

1. Расстояние между шарами не должно превышать  $S \leq 0,5D$ , где  $D$  – диаметр шаров. Следовательно, для широкого диапазона измеряемых напряжений нужен набор шаров разного диаметра.

2. Поверхность шаров должна быть гладкой и чистой. Слой пыли снижает пробивное напряжение.

3. Расстояние от шаров до заземленных или находящихся под напряжением предметов должно быть не менее  $L > 5 D$ .

4. Для получения стабильных результатов измерений необходимо облучение разрядного промежутка ультрафиолетовым излучением или радиоактивными изотопами, особенно при малых расстояниях между шарами.

5. Измерение следует производить 4-5 раз и за измеренную величину принимать среднее арифметическое значение, т.к. имеет место статистический разброс пробивных напряжений.

Измерение постоянных и переменных напряжений производится следующим образом. Вначале устанавливается заведомо большое расстояние между шарами, исключающее пробой при измеряемом напряжении. Затем на шаровой разрядник подается напряжение и расстояние между шарами плавно уменьшается до возникновения пробоя промежутка. Эта процедура повторяется 4-5 раз. Определяется среднее пробивное расстояние, затем по таблицам находится соответствующее напряжение.

При измерении амплитуды импульсного напряжения за пробивное расстояние между шарами принимают такое, при котором половина поданных импульсов, приложенных к разряднику, вызывает пробой промежутка, а половина нет. Это напряжение называют 50%-ным пробивным напряжением. Величину пробивного напряжения определяют из таблиц по полученному пробивному расстоянию.

При измерении пользуются градуировочными таблицами, дающими связь пробивного напряжения с диаметром шаровых электродов и расстоянием между ними. В таблицах даны амплитудные значения пробивного напряжения. Таблицы Международной электротехнической комиссии (МЭК) составлены для нормальных атмосферных условий ( $P=760$  мм рт. ст. и  $T=20^\circ\text{C}$ ).

В тех случаях, когда измерения проводятся в условиях, отличных от нормальных, вводится поправка на относительную плотность воздуха  $\delta$ . Тогда искомое значение напряжения будет равно  $U_{и} = U_{т} \cdot \delta$ , где  $U_{т}$  – табличное значение пробивного напряжения;  $\delta = 0,386P/(273+T)$ , где  $P$  и  $T$  – соответственно давление в мм. рт. ст и тем-

пература в градусах Цельсия окружающей среды при проведении измерений.

Кроме шаровых разрядников имеется еще целый ряд устройств и приборов для измерения высокого напряжения.

### 3.4.2. Электростатические вольтметры

Рассмотрим наиболее широко применяемые электростатические вольтметры.

Электростатические вольтметры измеряют действующее значение напряжения. Принцип действия основан на механическом перемещении одного из электродов вольтметра под действием электростатических сил. Измерение производится за счет уравнивания этой механической силы грузом или пружиной

$$F = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{l^2 \cdot 2} U^2 = KU^2,$$

где  $S$  – площадь подвижного электрода;  $l$  – расстояние между электродами,  $U = \sqrt{\frac{F}{K}}$ ,  $K = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{2l^2}$ .

Схема устройства электростатического вольтметра А. А. Чернышева приведена на рис. 3.9.

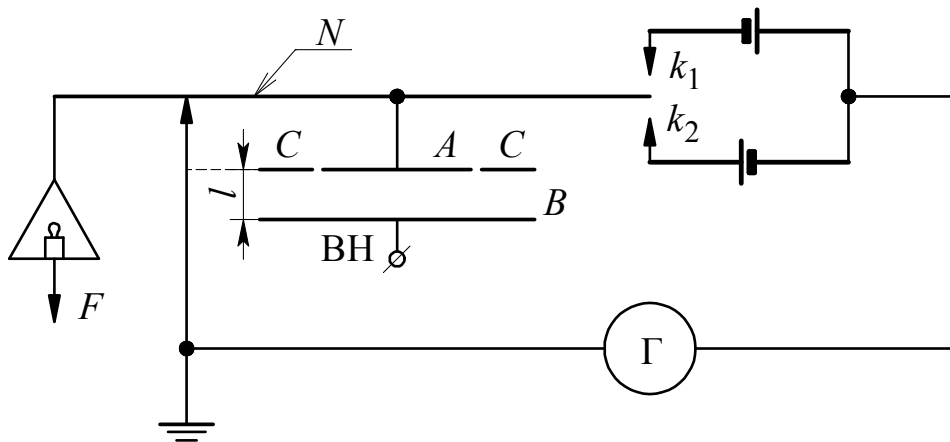


Рис. 3.9. Устройство электростатического вольтметра А. А. Чернышева: А — подвижный заземленный диск, В — неподвижный высоковольтный диск, С — охранное заземленное кольцо, N — металлическое заземленное коромысло, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> — контакты цепи гальванметра, Г — гальванометр

Имеются шаровые вольтметры, например, вольтметр Соренсона, Гобсона и Рамо.

В технических электростатических киловольтметрах, например, С100 на напряжения до 75 кВ, уравнивание подвижного элект-

трода осуществляется упругой растяжкой, на которой укреплено зеркальце. Отсчет показаний производится за счет светового луча.

### 3.4.3. Делители напряжения (ДН)

ДН позволяют не только измерять напряжение, но и зафиксировать форму воздействующего сигнала при помощи электронного осциллографа (рис 3.10).

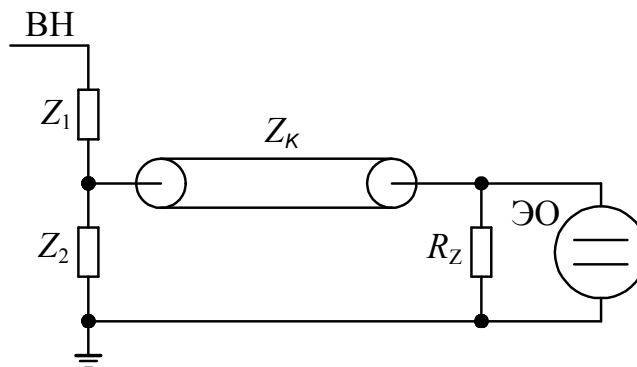


Рис. 3.10. Схема измерения высокого напряжения посредством делителя напряжения

Применяются делители: омические, емкостные и смешанные омическо-емкостные.

Делитель характеризуется коэффициентом деления  $K_d$  — отношение величины полного сопротивления делителя к величине сопротивления низковольтного плеча с учетом передающего кабеля  $Z_k$  и измерительного устройства.

Требования, предъявляемые к делителям напряжения:

1. Коэффициент деления не должен зависеть от амплитуды, полярности, длительности измеряемого напряжения.
2. Коэффициент деления не должен зависеть от внешних электрических полей.
3. Делитель должен быть удобным в эксплуатации и относительно дешевым.

У каждого типа делителя есть свои достоинства и недостатки. Наиболее универсальным является третий тип делителя — емкостно-омический, правда, он и наиболее сложный.

#### 3.4.3.1. Омический делитель ( $R_1 \gg R_2$ )

Схема омического делителя приведена на рис. 3.11.

В качестве сопротивления высоковольтного плеча  $R_1$  используют жидкостные или проволочные малоиндуктивные резисторы.

Жидкостные резисторы изготавливают, например, из раствора  $CuSO_4$  в дистиллированной воде.

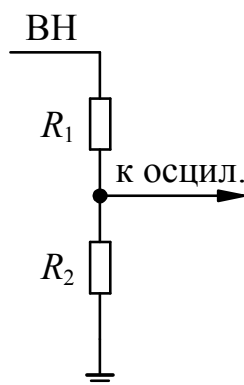


Рис. 3.11. Схема замещения омического делителя

Недостатки жидкостных омических делителей:  $K_d$  зависит от температуры, от загрязнения посторонними ионами.

Проволочные резисторы изготавливают из высокоомной проволоки – нихрома, константана. Применяется малоиндуктивная бифилярная намотка с малым шагом. Индуктивность проволочных резисторов больше, чем жидкостных. Это приводит к искажению формы импульсов при коротких временах воздействия.

#### 3.4.3.2. Емкостный делитель ( $C_2 \gg C_1$ )

Схема емкостного делителя напряжения приведена на рис. 3.12.

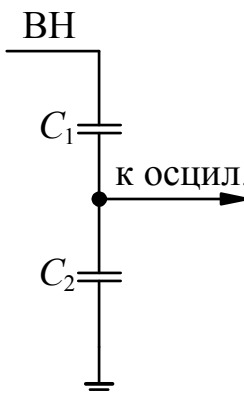


Рис. 3.12. Схема замещения емкостного делителя напряжения

Основной недостаток емкостного делителя: невозможно точно согласовать с передающим кабелем, что приводит к наличию отраженного сигнала и искажению основного. При коротких временах воздействия лучше, чем омический ДН. Сложности при расчете  $K_d$ .

#### 3.4.3.3. Смешанный делитель напряжения

Схема смешанного делителя напряжения приведена на рис. 3.13.

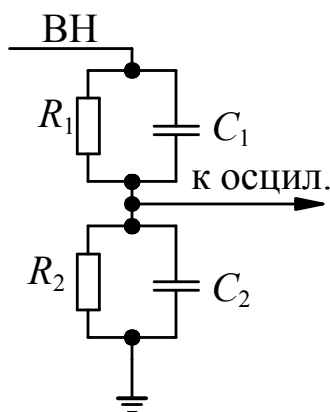


Рис. 3.13. Схема замещения смешанного делителя напряжения

Сложность в настройке смешанного делителя напряжения, т.к.  $K_d$  по  $C$  и  $R$  должны быть одинаковы.  $K_{dC} = K_{dR}$ . Сложно рассчитать  $K_d$ . Имеет достоинства омического и емкостного делителей, т.е. можно измерять короткие и длинные сигналы. Недостатки: сложность изготовления и дороговизна.

Делитель должен присоединяться непосредственно к объекту испытаний, а не через длинные подводящие шины (рис. 3.14).

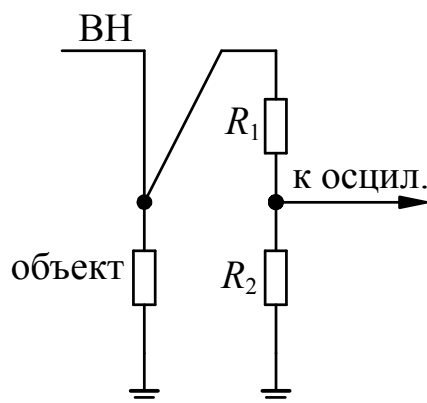


Рис. 3.14. Схема присоединения высоковольтного делителя к объекту, на котором производится измерение высокого напряжения

## 4. Перенапряжения и защита от них

### 4.1. Классификация перенапряжений

Перенапряжение — всякое повышение напряжения в электрической сети больше максимального рабочего  $U_{р.макс} = U_H + (0,2 \div 0,05) \cdot U_H$  в зависимости от класса напряжения.

При перенапряжениях создаются тяжелые условия для работы изоляции, т.к. они могут во много раз превышать  $U_{р.макс}$ .

Перенапряжения подразделяются на

1. внешние (грозовые);
2. внутренние (переходные процессы в электрических сетях).

На схеме приведена классификация перенапряжений.

Необходимо знать следующие характеристики перенапряже-



ний:

1. Максимальное значение амплитуды напряжения при перенапряжении  $U_{макс}$  или кратность перенапряжений

$$K_{п} = \frac{U_{макс}}{U_{р.макс}}$$

2. Длительность воздействия перенапряжения.

3. Форму кривой перенапряжений (апериодическая, колебательная, высокочастотная и др.)

4. Широту охвата элементов электрической цепи.

Все перечисленные характеристики имеют стохастическую природу и имеют значительный статистический разброс, который обязательно учитывается при расчетах. Для изоляции высоковольтных устройств низких классов напряжения ( $U \leq 220$  кВ) наиболее опасными являются грозовые перенапряжения. Их изоляция выдерживает коммутационные перенапряжения любой кратности.

Для изоляции высоковольтных устройств высоких и сверхвысоких классов напряжения ( $U > 330$  кВ) наиболее опасными являются коммутационные перенапряжения.

Поэтому на низких классах напряжения ограничивают специальными устройствами только грозовые перенапряжения, а на высоких классах принудительно ограничивают и внутренние перенапряжения.

#### 4.2. Внутренние перенапряжения

Наиболее многообразны внутренние перенапряжения. Причины возникновения внутренних перенапряжений очень разнообразны (отключение линии, трансформаторов и другие переключения; обрывы фаз; к. з., перекрытие изоляторов и пробой).

Внутренние перенапряжения вызываются колебаниями энергии, запасенной в элементах сети или поступающих в сеть от источников энергии (генераторы, при изменении первоначальных параметров).

Элементы электрической сети: источники энергии; накопители энергии (конденсаторы, индуктивности); поглотители энергии (активные сопротивления, корона, проводимость изоляции).

Внутренние перенапряжения делятся на коммутационные, квазистационарные (установившиеся), стационарные.

Условно развитие перенапряжения графически можно представить в соответствии с рис. 4.1.

I стадия – переходный процесс (коммутационные перенапряжения). Длится несколько периодов.

II стадия – условно установившееся состояние (квазистационарная). Переходный процесс закончился, но параметры цепи другие, поэтому высокое напряжение, а регуляторы напряжения на генераторах еще не успели сработать.

III стадия – работа регуляторов напряжения у генераторов. Снижение напряжения до нового установившегося рабочего напряжения.

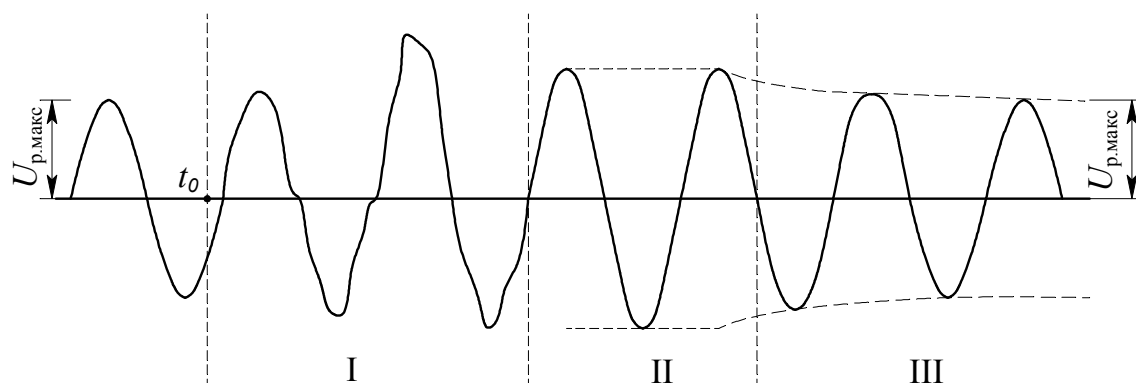


Рис. 4.1. Вид напряжения сети при появлении внутренних перенапряжений:  $t_0$  — момент коммутации

Увеличение длины и класса напряжения линии приводит к увеличению энергии в элементах сети и, как следствие, к увеличению кратности перенапряжений. В связи с этим для линий класса  $U > 330$  кВ осуществляется принудительное ограничение перенапряжений до уровней:

$$30 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 2,7$$

$$500 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 2,5$$

$$750 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 2,2$$

$$1150 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 1,8$$

Ограничение перенапряжений осуществляется защитными разрядниками (РЗ), трубчатыми разрядниками (РТ), вентильными разрядниками (РВ), нелинейными ограничителями перенапряжений (ОПН) и схемными решениями (реакторы, конденсаторы, сопротивления активные и др.).

### 4.3. Грозозащита воздушных линий электропередач и подстанций

Основной количественной характеристикой разряда молнии является амплитуда тока молнии. Воздушные линии электропередач (ВЛ) в районах со средней продолжительностью грозовой деятельности (20-30 часов в год) поражаются разрядами молнии 15-20 раз в год на 100 км длины. Токи молнии изменяются в широких пределах от единиц до сотен килоампер. Средний расчетный ток молнии составляет 15 кА. При разряде молнии в землю могут поражаться различные объекты, в частности, воздушные линии электропередачи, подстанции, станции. Протекание тока молнии через объект вызывает возникновение волны напряжения молнии, которая может пробить и разрушить изоляцию электротехнических устройств. При расчетах импульсной электрической прочности пользуются стандартной волной напряжения.



### 4.3.1. Защита от прямых ударов молнии

Для защиты объектов от поражения молнией используются молниеотводы. В зависимости от защищаемого объекта применяют стержневые (подстанции) или тросовые (ВЛ) молниеотводы. Необходимым условием эффективной работы молниеотводов является их хорошее заземление.

Наибольшие грозовые перенапряжения возникают при прямом ударе молнии (ПУМ) в линию или подстанцию. В месте удара возникает кратковременное (импульсное) напряжение в миллионы вольт, т. е. выше импульсной электрической прочности изоляции электропередач и электрооборудования. Для обеспечения надежной работы электрической сети необходимо осуществить ее эффективную и экономичную грозозащиту.

Чтобы быть защищенным от ПУМ, объект должен полностью находиться внутри пространства, которое представляет собой зона защиты молниеотвода.

Зоной защиты молниеотводов называется пространство вокруг молниеотвода, попадание в которое разрядов молнии маловероятно.

### 4.3.2. Зона защиты стержневого молниеотвода

Поверхность, ограничивающая зону защиты стержневого молниеотвода, может быть представлена ломаной линией (рис. 4.2).

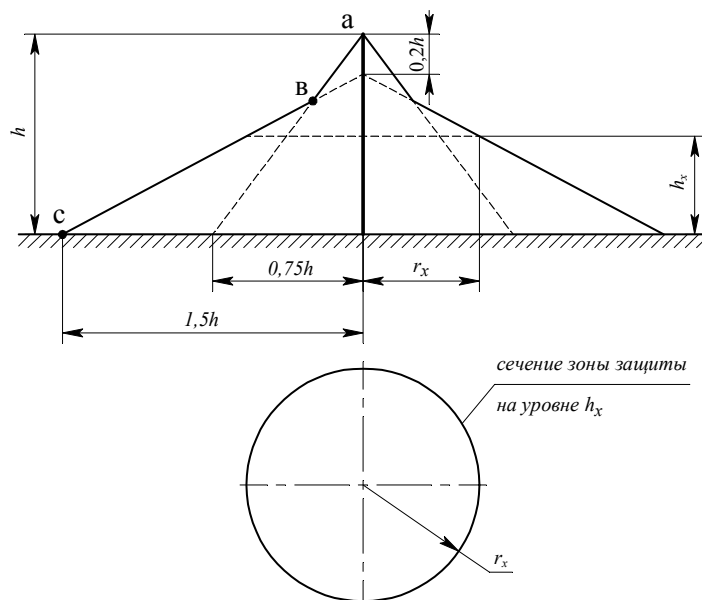


Рис. 4.2. Построение зоны защиты стержневого молниеотвода

Отрезок  $av$  — часть прямой, соединяющей вершину молниеотвода с точкой поверхности земли, удаленной на  $0,75h$  от оси молниеотвода. Отрезок  $bc$  — часть прямой, соединяющей точку молниеотвода на

высоте  $0,8h$  с точкой поверхности земли, удаленной на  $1,5h$ . Точка  $b$  находится на высоте  $2/3h$ . Радиус защиты на высоте  $h_x < 2/3h$

$$r_x = 1,5h \left( 1 - \frac{h_x}{0,8h} \right), \quad (4.1)$$

а на высоте  $h_x > 2/3h$

$$r_x = 0,75h \left( 1 - \frac{h_x}{h} \right). \quad (4.2)$$

Зона защиты двумя молниеотводами имеет большие размеры, чем сумма защиты двух одиночных молниеотводов (рис. 4.3).

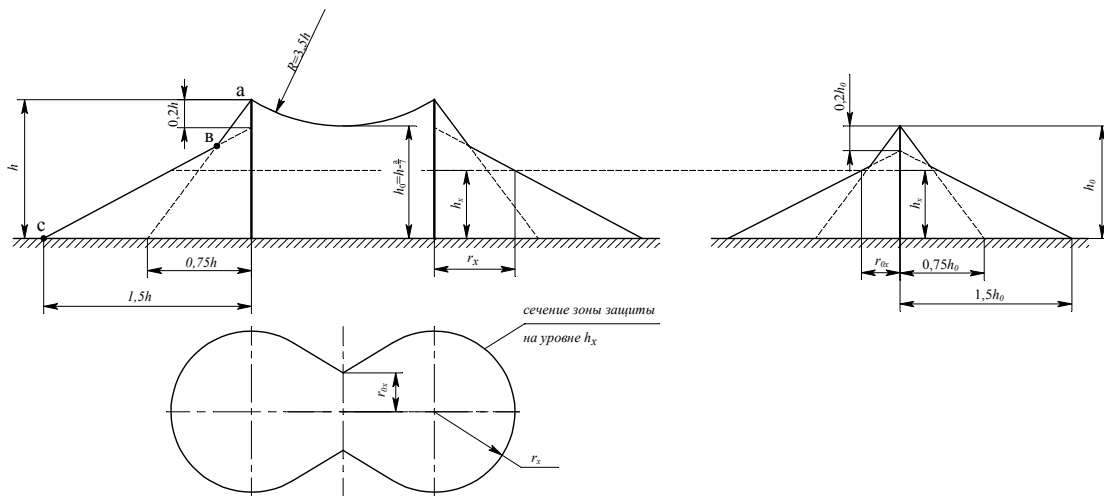


Рис. 4.3. Зона защиты двух стержневых молниеотводов

Открытые распределительные подстанции располагаются на большой территории. Их приходится защищать несколькими молниеотводами. Зона защиты определяется тем же путем, как и зона защиты двух молниеотводов.

#### 4.3.3. Зона защиты тросового молниеотвода

Тросовые молниеотводы используются в основном для защиты проводов ВЛ. В связи с этим пользуются не зонами защиты, а углами защиты, т. е. углами между вертикальной линией перпендикулярной тросу и линией, соединяющей провод и трос (рис. 4.4).

Линии длиной до 1000 км (ВЛ 500 кВ) поражаются молнией не менее 200 раз в грозовой сезон. Поэтому для ВЛ защита с помощью тросовых молниеотводов приобретает основное значение. Опыт эксплуатации ВЛ показывает, что угол защиты должен быть 20-25 градусов (рис. 4.4.). Сопротивление заземления опор с глухозаземленной нейтралью должно быть менее 5 Ом, а с изолированной нейтралью — менее 10 Ом.

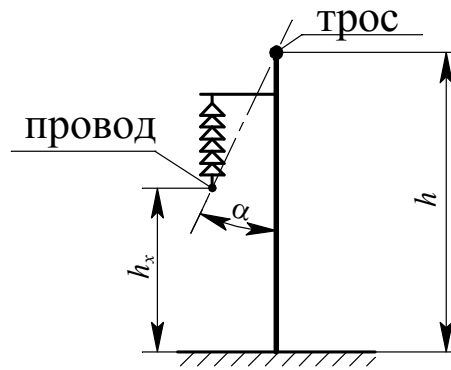


Рис. 4.4. Зона защиты тросового молниеотвода

Грозозащита подстанций, кроме защиты от прямых ударов молнии, должна включать в себя следующие виды защит:

- 1) от перекрытий при ударах молнии в заземленные конструкции подстанций, т.е. от обратных перекрытий с заземленных элементов на токоведущие части оборудования;
- 2) от волн, приходящих с линии.

Для выполнения первого требования необходимо сопротивление заземления подстанции делать малым. Для напряжения выше 1000 В сопротивление заземления подстанции  $R_3 \approx 0,5$  Ом. Уменьшение  $R_3$  наиболее эффективный путь защиты от обратных перекрытий.

Для выполнения второго требования применяются вентильные разрядники (РВ) и ограничители перенапряжения (ОПН). Вентильный разрядник обладает пологой вольт-секундной характеристикой (ВСХ). Это позволяет ему защищать оборудование в широком диапазоне изменений длин волн, набегающих с линии (рис. 4.5).

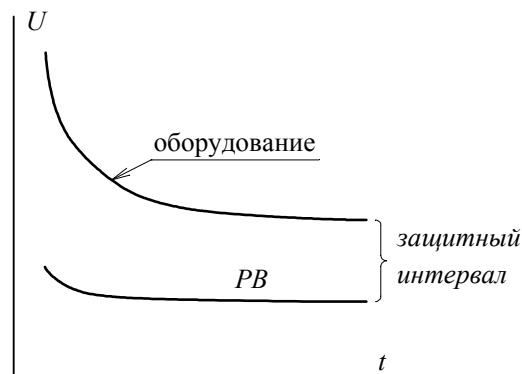


Рис. 4.5. Вид вольт-секундных характеристик защищаемого объекта и РВ

Для эффективной защиты необходимо, чтобы:

- 1) остающееся напряжение на рабочем сопротивлении не превышало допустимого;

2) крутизна набегающей на подстанцию волны была ограниченной.

Для выполнения этих условий все линии, подходящие и отходящие от подстанции, оборудуются тросовой защитой длиной 2-3 км — защитные подходы. Углы защиты выполняют менее 20° и даже отрицательные. Наличие защищенных подходов исключает прямой удар молнии в провод, что уменьшает токи через РВ и, следовательно, остающееся напряжение на рабочем сопротивлении РВ.

При движении волны по проводу с линии в защищенном подходе возникает интенсивное коронирование, что сглаживает фронт волны (уменьшает крутизну импульса) и уменьшает амплитуду напряжения.

### 4.3.3. Грозоупорность объектов (ВЛ)

Воздушные линии электропередачи из-за большой протяженности поражаются наиболее часто. Поэтому нарушение работы энергосистем вызывается в основном нарушением изоляции ВЛ.

При расчетах грозоупорности ВЛ вводится понятие об уровне грозоупорности. Уровень грозоупорности оценивается максимальной амплитудой тока молнии  $I_0$  и его крутизной  $a$ , при которых еще не происходит нарушения изоляции линии (крутизна  $a = \frac{I_0}{t_\phi}$ , где  $t_\phi$  — длительность фронта волны тока).

Показателем грозоупорности считают вероятное число лет работы установки без грозовых отключений

$$M = \frac{1}{N_{\text{откл}}},$$

где  $M$  — число лет работу без грозовых отключений;  $N_{\text{откл}}$  — ожидаемое число случаев возникновения опасных грозовых перенапряжений в год.

Например, для ВЛ

$$N_{\text{откл}} = 0,9h \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot n_d \cdot v_{\text{пер}} \cdot \eta,$$

где  $h$  — средняя высота подвеса троса или провода;  $L$  — длина линии;  $n_d$  — число грозовых дней в году;  $v_{\text{пер}}$  — вероятность перекрытия изоляции ВЛ при ударе молнии;  $\eta$  — вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу.

Аналогично подсчитывается и грозоупорность других объектов (подстанций).

#### 4.4. Средства защиты от перенапряжений

В сетях до 35 кВ часто для защиты используют открытые разрядные промежутки — защитные разрядники ("рога") и трубчатые разрядники. Срабатывание таких разрядников вызывает резкий спад напряжения, возникновение переходных процессов и опасных перенапряжений на продольной изоляции высоковольтных устройств (трансформаторы, генераторы, реакторы и т.д. Кроме этого, такие разрядники имеют крутую вольт-секундную характеристику (ВСХ), т.к. форма электрического поля резконеоднородная. Это не позволяет осуществлять защиту объектов в области коротких времен воздействия напряжения (грозовые перенапряжения) (рис 4.6).

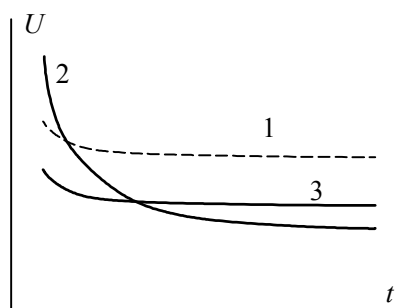


Рис. 4.6. Вольт-секундная характеристика защищаемой изоляции (1) и искрового промежутка с резконеоднородным полем (2) и однородным полем (3)

Одним из лучших разрядников такого типа является трубчатый разрядник (РТ), рис. 4.7.

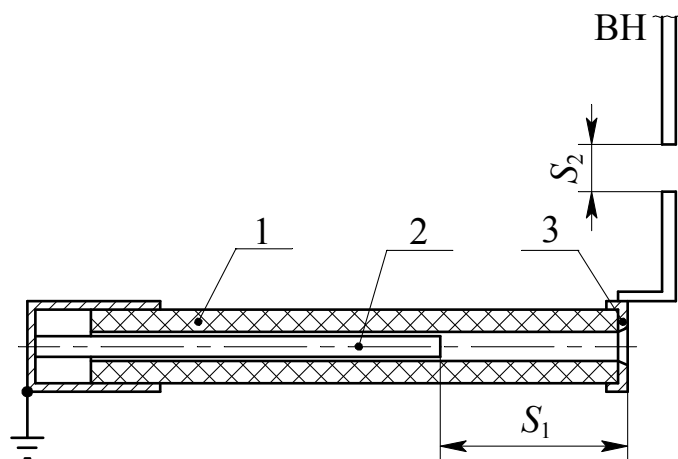


Рис. 4.7. Устройство трубчатого разрядника:  $S_1$  — основной промежуток;  $S_2$  — внешний искровой промежуток; 1 — диэлектрическая труба; 2 — стержневой электрод; 3 — открытый электрод

Электроды искрового промежутка помещаются в диэлектрическую трубу 1 из газогенерирующего материала (например, винипласт).

Основной промежуток —  $S_1$  обеспечивает дугогашение. Промежуток  $S_2$  служит для отделения газогенерирующей трубки от сети, чтобы избежать ее разложения от токов утечки. При появлении перенапряжений пробивается  $S_1$  и  $S_2$ . Через них протекает импульсный ток и сопровождающий ток промышленной частоты. Температура повышается, происходит интенсивное газовыделение. Давление повышается до десятков атмосфер. Газ выходит через открытый электрод 3. Создается продольное дутье. Дуга выдувается наружу. При переходе тока через 0 дуга гаснет. Из-за недостатков (см. ВСХ) РТ не применяются для защиты ответственного оборудования.

Наиболее широкое распространение в сетях высокого напряжения получили вентильные разрядники (РВ), которые имеют пологую ВСХ. Они состоят из нескольких искровых промежутков (ИП), включенных последовательно, последовательных нелинейных рабочих сопротивлений (НС) и шунтирующих сопротивлений ( $R_{ш}$ ).

ИП служат для отделения НС от постоянного воздействия рабочего напряжения и протекающего через него тока, который разрушает НС. НС служит для ограничения сопровождающего тока до величины, необходимой для гашения дуги.  $R_{ш}$  служит для выравнивания распределения напряжения по элементарным разрядным промежуткам с целью исключения ложного срабатывания разрядника.

РВ ограничивает перенапряжения и гасит дугу сопровождающего тока без отключения сети или подстанции.

После гашения дуги разрядник возвращается в исходное состояние и готов к повторной работе. Число срабатываний РВ 20 или 50.

В простейших РВ (типа РВС, РВП) ток гашения дуги составляет 80 А. Более современные РВ имеют ток гашения дуги 250 А.

Материалами НС являются вилит и тервит. Вольт-амперная характеристика их описывается выражением

$$U = K \cdot I^\alpha,$$

где  $\alpha$  - коэффициент вентильности;  $K$  – постоянная.

Для вилита  $\alpha = 0,11 \div 0,2$ ; для тервита  $\alpha = 0,15 \div 0,25$ .

РВ делятся на 4 группы. Наилучшими защитными свойствами обладают РВ I группы, но и более дорогие.

IV группа — РВП (подстанционные),

III группа — РВС (станционные),

II группа — РВМ (магнито-вентильные), РВМГ (магнито-вентильные, грозовые),

I группа — РВТ (токоограничивающие) РВРД (с растягивающейся дугой).

Существенное улучшение защитных характеристик может быть достигнуто при отказе от использования ИП. Для этого требуются материалы с резко нелинейной ВАХ. Этим требованиям отвечает материал на основе оксида цинка, из которого изготавливают нелинейные резисторы — варисторы. Защитные устройства на их основе носят название нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН). Коэффициент нелинейности ОПН составляет  $\alpha = 0,02 \div 0,1$ . ОПН собираются из отдельных дисков (варисторов), которые помещаются в герметичный фарфоровый корпус.

ОПН подключаются непосредственно к сети и заземляются через регистратор срабатываний. Малый коэффициент нелинейности ОПН позволяет глубоко ограничивать перенапряжения и применять их в сетях сверхвысокого и ультравысокого классов напряжений.

#### 4.5. Волновые процессы в линиях

При ПУМ в линию или вблизи нее в землю возникают электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль провода ЛЭП. Атмосферные перенапряжения на линиях и подстанциях определяются движением и преломлением этих волн. Поэтому анализ волновых процессов при расчетах устройств грозозащиты имеет принципиально важное значение.

Волна распространяется вдоль линии в воздухе со скоростью  $v = C / \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} = C = 300$  м/мкс — скорость света. ( $\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды;  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная).

Для воздуха  $\mu_0 = 1$ ;  $\varepsilon = 1$ .

Для кабельных линий  $\mu = 1$ ;  $\varepsilon \approx 4$ .

Следовательно, в кабелях  $v \approx 0,5 C$ .

Напряжение и ток волны связаны между собой

$$\frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = Z \text{ — волновое сопротивление.}$$

Волновое сопротивление единичного провода ВЛ  $Z = 400 \div 450$  Ом.

Кабельные линии имеют  $Z = 50 \div 100$  Ом.

В общем случае волновой процесс в линиях определяется 4-мя основными параметрами: емкостью  $C$ , индуктивностью  $L$ , активным сопротивлением провода  $r$  и активной проводимостью диэлектрика  $g$ .

##### 4.5.1. Преломление и отражение волн в узловых точках

Узловой точкой линии называют такую точку, в которой скачком изменяется соотношение между электрическим и магнитным полем, т. е. изменяется волновое сопротивление линии  $Z_{\text{Л}}$ .

Для расчета преломленных и отраженных волн в узловых точках используют эквивалентную схему замещения линии с распределенными параметрами на линию с сосредоточенными параметрами по правилу Петерсена (рис. 4.8).

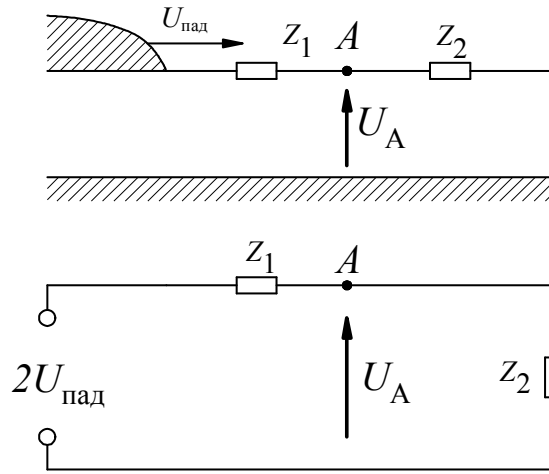


Рис. 4.8. Эквивалентная схема замещения длинной линии по правилу Петерсена для расчета преломленных и отраженных волн в узловой точке А:  $U_{\text{пад}}$  — падающая волна напряжения;  $Z_1$  — волновое сопротивление длинной линии, по которой падает волна напряжения;  $Z_2$  — волновое сопротивление длинной линии после точки неоднородности; А — узловая точка (место неоднородности);  $U_A$  — напряжение в узловой точке

Рассмотрим несколько примеров отражения и преломления волн в узловых точках при бесконечной падающей волне с прямоугольным фронтом.

1. Конец линии (точка А) разомкнут,  $Z_2 = \infty$ .

$$U_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{\text{пад}} = 2U_{\text{пад}}. \quad (4.3)$$

Падающая волна напряжения отражается полностью с тем же знаком и в точке А, на конце линии, напряжение удваивается.

Для волны тока.

$i_2 = 0$ , т.е. преломленный ток равен нулю.

$$i_{\text{отр}} = \frac{U_0}{Z_1} = -\frac{U_n}{Z_1} = -i_n. \quad (4.4)$$

Падающая волна тока отражается от разомкнутого конца полностью с обратным знаком и ток в линии равен нулю.

2. Линия в конце (точка А) закорочена,  $Z_2 = 0$ .



Падающая волна напряжения отражается полностью от короткозамкнутого конца линии с обратным знаком, напряжение в точке А равно нулю, а волна тока отражается с тем же знаком — удваивается.

3. Линия в конце (точка А) согласована, т. е.  $Z_1 = Z_2 = Z$ .

Нетрудно видеть, что в этом случае падающие волны напряжения и тока не испытывают отражений и преломлений при падении на согласованное  $Z$ .

Для системы рис. 4.8

$$\begin{cases} U_{\text{прел}} = U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}} \\ i_{\text{прел}} = i_{\text{пад}} - i_{\text{отр}} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$i_{\text{пад}} = \frac{U_{\text{пад}}}{Z_1}; \quad -i_{\text{отр}} = \frac{U_{\text{отр}}}{Z_1}; \quad i_{\text{прел}} = \frac{U_{\text{прел}}}{Z_2}. \quad (4.6)$$

Определим  $U_{\text{прел}}$  и  $U_{\text{отр}}$  через  $U_{\text{пад}}$ .

Решая совместно (4.5), (4.6), имеем

$$U_{\text{прел}} = U_{\text{пад}} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha U_{\text{пад}}, \quad (4.7)$$

$$U_{\text{отр}} = U_{\text{пад}} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta U_{\text{пад}}. \quad (4.8)$$

где

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \text{ — коэффициент преломления.} \quad (4.9)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \text{ - коэффициент отражения.} \quad (4.10)$$

Отсюда уравнение в (4.5) запишется

$$\alpha U_{\text{пад}} = U_{\text{пад}} + \beta U_{\text{пад}}. \quad (4.11)$$

где  $\alpha - \beta = 1$ .

Определим границы изменения  $\alpha$  и  $\beta$ .

1. Предположим, что  $Z_2 = 0$ , тогда из выражения (4.9)  $\alpha = 0$ . При  $Z_2 = \infty$   $\alpha = 2$ . Следовательно,  $\alpha$  изменяется в диапазоне  $0 \leq \alpha \leq 2$ .

2. Предположим, что  $Z_2 = 0$ , тогда из выражения (4.10)  $\beta = -1$ . При  $Z_2 = \infty$   $\beta = 1$ . Следовательно,  $\beta$  изменяется в диапазоне  $-1 \leq \beta \leq +1$ .

#### 4.5.2. Перенапряжения при несимметричном отключении фаз

При несимметричном отключении фаз линии электропередачи, когда отключаются одна или две фазы линии, возможно возникновение

резонансных перенапряжений (феррорезонанс). Такие случаи могут иметь место при: обрыве одного провода на линии; перегорании плавких вставок; однофазном или двухфазном к.з.; одновременном отключении фаз выключателя, что может иметь место при пофазном управлении выключателями и т.д.

В сетях с изолированной нейтралью при несимметричных коммутациях могут образоваться резонансные контуры, если к линии подключены трансформаторы на холостом ходу или мало нагруженные. В таких контурах и возникают феррорезонансные (ФР) перенапряжения.

Общая схема, в которой возможно возникновение ФР перенапряжений представлена на рис. 4.9.

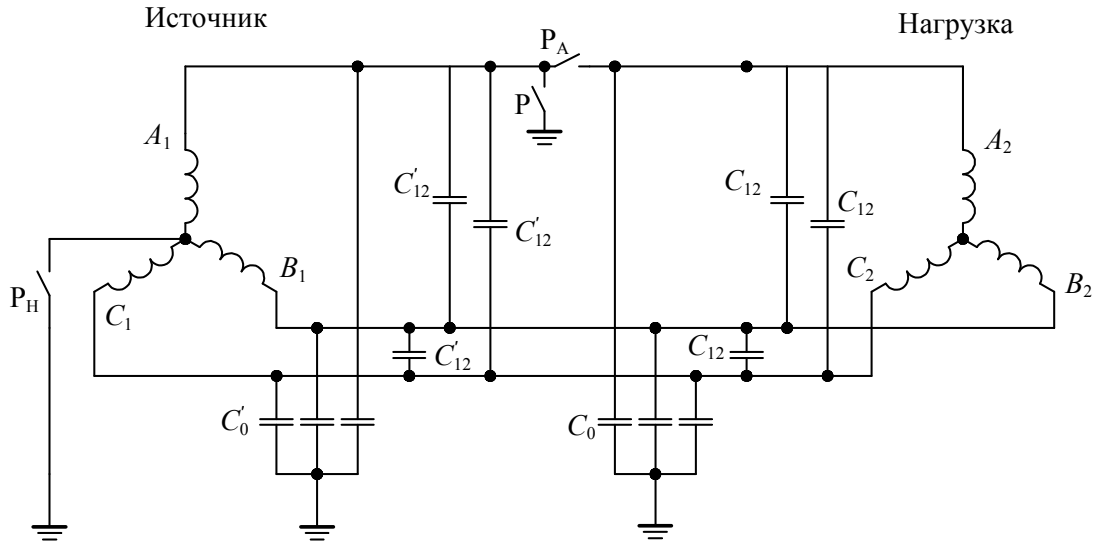


Рис. 4.9. Схема для исследования перенапряжений при несимметричном отключении фаз:  $A_1, B_1, C_1$  — фазы источника;  $A_2, B_2, C_2$  — фазы нагрузки — трансформатора с изолированной нейтралью;  $C'_{12}$  — междуфазные емкости системы до ключа  $P_A$ ;  $C'_0$  — емкости фаз на землю системы до ключа  $P_A$ ;  $C_{12}$  — междуфазные емкости нагрузки;  $C_0$  — емкости фаз нагрузки;  $P, P_A, P_H$  — ключи

Ключом  $P_A$  условно показано место разрыва фазы А. На схеме также показаны емкости фаз между собой ( $C'_{12}$ ) и на землю ( $C'_0$ ) до разрыва (до ключа  $P_A$ ) и соответствующие емкости  $C_{12}$  и  $C_0$  после разрыва. Нейтраль системы - источника может быть заземлена или изолирована (ключ  $P_H$ ). А нейтраль трансформатора нагрузки должна быть изолирована. Это характерно для всех линий вплоть до 110 кВ включительно. (При заземлении нейтрали нагрузки феррорезонанс не возникает).

Примем, что в фазе А оборвался провод и упал на землю, т. е. разомкнем ключ  $P_A$  и заземлим фазу А со стороны системы ключом  $P$ . Тогда схема замещения будет как на рис. 4.10, где треугольник емкостей  $C_{12}$  заменен на соответствующую ему эквивалентную звезду, а тре-

угольником емкостей  $C'_{12}$  можно пренебречь, т. к. они не влияют на рассматриваемые процессы.

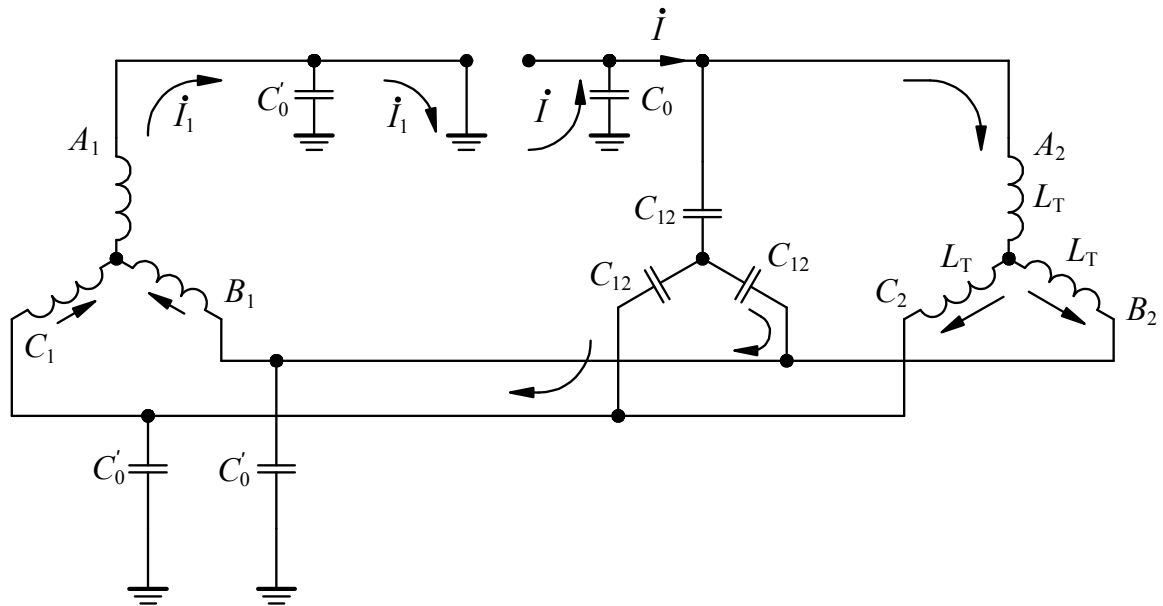


Рис. 4.10. Схема замещения с несимметричной коммутацией (один провод заземлен)

Ток  $I_1$  в фазе  $A$  после обрыва провода будет уходить на землю через место заземления, а затем через емкость  $C_0$  будет возвращаться снова на провод к нагрузке. Здесь он разветвляется: часть тока течет через емкость  $C_{12}$ , а другая часть через обмотки (индуктивности)  $L_T$  трансформатора. Весь ток замыкается через фазы  $B_1$  и  $C_1$  источника. Потенциалы нулевых точек трансформатора нагрузки и звезды междуфазных емкостей  $C_{12}$  одинаковы.

Поэтому схему рис. 4.10 можно преобразовать в однофазную (рис. 4.11).

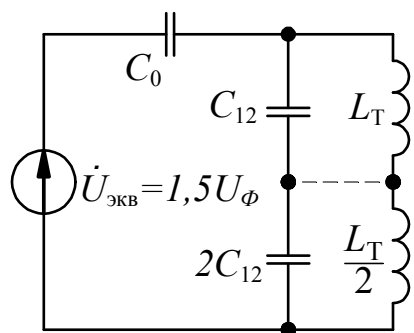


Рис. 4.11. Однофазная схема замещения для схемы по рис. 4.10

В соответствии с этой схемой

$$\dot{U}_{\text{ЭКВ}} = 1,5\dot{U}_L + \dot{U}_{C_0}$$

или

$$\dot{U}_{\text{ЭКВ}} = 1,5\dot{U}_{\text{ф}} = 1,5\dot{U}_L - \dot{U}_{C_0} \quad (4.12)$$

Перенапряжения возникают благодаря прохождению тока через последовательно соединенные емкости  $C_0$  и индуктивность  $1,5 L_T$  — колебательный контур. Здесь возникает необходимость определить величины напряжений на емкости и индуктивности. Уравнение (4.12) может быть решено графически. Графическое решение представлено на рис. 4.12.

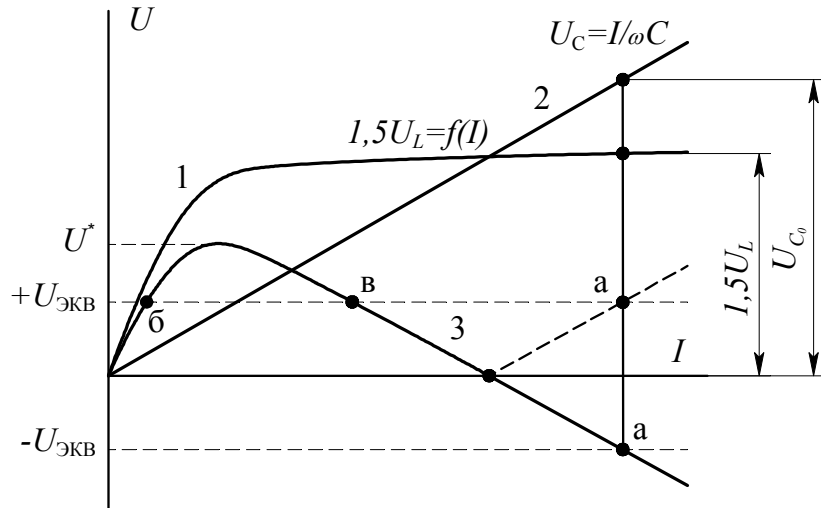


Рис. 4.12. Графическое решение уравнения для колебательного контура с нелинейной индуктивностью: 1 — изменение напряжения на нелинейной индуктивности (обмотке трансформатора); 2 — изменение напряжения на емкости; 3 — суммарное изменение напряжения в контуре

Из рис. 4.12 видно, что для схемы рис. 4.11 возможны 3 режима, соответствующие точкам  $a$ ,  $b$ ,  $v$ . Два из этих режимов (точки  $a$  и  $b$ ) являются индуктивными, а один (точка  $a$ ) — емкостный. Устойчивыми являются только два режима — точки  $a$  и  $b$ . Режим в точке  $v$  неустойчив и обязательно переходит или в точку  $b$ , или в точку  $a$ . Если в схеме преобладает индуктивный режим, то система вернется в точку  $b$  и перенапряжений не возникнет. Если преобладает емкостный режим, то возникает гармонический резонанс (феррорезонанс), который приводит к значительным перенапряжениям (как видно из рис. 4.12), в 3 раза и более. Кроме этого на трансформаторе нагрузки изменяется порядок чередования фаз на обратный — это «опрокидывание» чередования фаз. При этом, если трансформатор имел моторную нагрузку, то после обрыва провода (или одновременной коммутации выключателей) направление вращения двигателей изменится на обратное.

Наиболее радикальным средством, устраняющим подобные явления, может быть заземление нейтрали трансформатора нагрузки. Однако, это требование не всегда выполнимо даже для систем 110 кВ. Поэтому необходимо стремиться к уменьшению вероятности несимметричных отключений (отказ от плавких предохранителей и выключателей с пофазным управлением, не следует длительно оставлять включенными холостые или слабо нагруженные трансформаторы).

#### 4.6. Волновые процессы в обмотках трансформаторов

Волны грозового (и коммутационного) характера, набегающие по линии электропередачи на подстанцию, приводят к возникновению импульсных напряжений, воздействующих на обмотку трансформатора (двигателя, генератора и др.). Характер пробоев изоляции обмоток указывает на важную роль волновых процессов.

В трансформаторе под действием импульса напряжения возникает сложный электромагнитный процесс, приводящий к перенапряжениям между катушками (витками) — продольная изоляция, и между обмотками и заземленными частями — главная изоляция.

Суммарная длина проводов в обмотках трансформаторов высокого напряжения достигает нескольких километров (длинная линия). При воздействии импульсного напряжения в обмотке возникают волновые процессы, имеющие некоторую аналогию с процессами в линиях электропередачи. Однако схема замещения обмотки трансформатора, даже без учета активного сопротивления и проводимости, значительно сложнее схемы замещения линии (рис. 4.13).

Из-за того, что провод обмотки навивается вокруг магнитопровода, появляются два дополнительных параметра схемы замещения: емкость между соседними витками или катушками  $K$  (продольная емкость) и взаимная индуктивность  $M(x)$  каждого витка со всеми остальными витками обмотки. Величины  $L$ ,  $C$ ,  $K$  — средние значения индуктивности, емкости относительно заземленных элементов и соседних обмоток и продольной емкости на единицу длины обмотки.

В связи с этим ограничимся качественным рассмотрением процессов в трансформаторах. Электромагнитный переходный процесс в трансформаторе зависит от ряда факторов:

- схемы соединения обмоток;
- режима нейтрали (заземлена или изолирована);
- конструкции обмоток;
- падения волны по одной, двум, трем фазам ЛЭП.

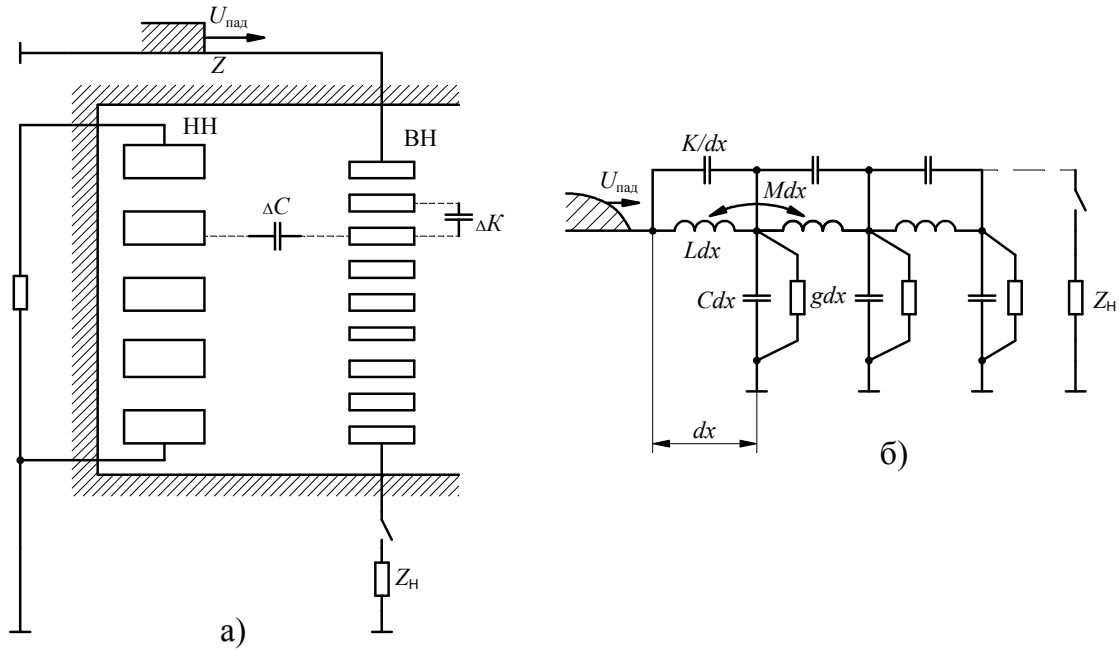


Рис. 4.13. Конструктивная схема однофазной катушечной обмотки (а) и электрическая схема замещения (б) высоковольтного трансформатора:  $Z_n$  — сопротивление нейтрали трансформатора

Вначале рассмотрим основные закономерности переходного процесса для однофазного трансформатора с катушечной обмоткой. На обмотку ВН воздействует прямоугольная бесконечно длинная волна напряжения. Весь процесс воздействия волны можно представить состоящим из трех стадий:

- а) начальный процесс (действует фронт волны)  $t = 0$ ,
- б) установившийся режим (переходные процессы закончились)  $t = \infty$ ,
- в) переходный процесс (свободные колебания)  $0 < t < \infty$ .

#### 4.6.1. Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформаторов

В начальный момент ( $t = 0$ ), когда воздействует фронт волны напряжения (крутизна фронта большая, что эквивалентно высокой частоте), индуктивность обмотки не попускает ток. Следовательно, ток будет протекать только по емкостям  $C$  и  $K$  и схема замещения примет вид (рис.4.14, а).

Для этой начальной стадии распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора запишется в виде

$$U_{\text{нач}} = U_{\text{пад}} e^{-\alpha l \left( \frac{x}{l} \right)},$$

где  $l$  — длина обмотки.

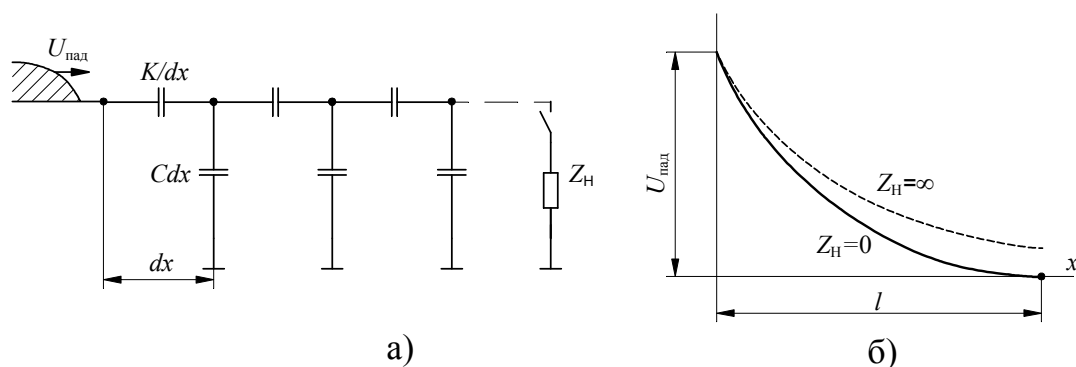


Рис. 4.14. Начальное распределение напряжения по обмотке трансформатора: а) — электрическая схема замещения для начального процесса ( $t=0$ ); б) — распределение напряжения вдоль обмотки для  $t=0$

Из формулы видна большая роль параметра

$$\alpha l = \sqrt{\frac{C_{обм}}{L_{обм}}},$$

где  $C_{обм}$  — емкость обмотки между началом и концом;  $L_{обм}$  — индуктивность обмотки между началом и концом.

Для современных трансформаторов  $5 < \alpha l \leq 10$ . На значительной части обмотки распределение напряжения будет одинаково как для режима заземленной нейтрали  $Z_H = 0$ , так и с изолированной нейтралью  $Z_H = \infty$  (рис. 4.14, б).

В режиме с заземленной нейтралью конец обмотки будет иметь потенциал, равный 0. В режиме с изолированной нейтралью конец обмотки будет иметь емкость  $C_{dx}$  относительно земли (см. схему замещения), на которой будет падение напряжения  $\Delta U$ . В начальном режиме основное падение напряжения прикладывается к началу обмотки из-за крайне неравномерного распределения напряжения. В связи с этим изоляция первых витков или катушек делается усиленной.

#### 4.6.2. Установившийся режим (или принужденный режим)

Для импульсной прямоугольной волны напряжения этот режим соответствует длительному времени приложения напряжения  $t \rightarrow \infty$ . Через обмотку протекает "сквозной" принужденный ток  $i_{пр}$ . Емкостные токи равны нулю, т.к. емкости уже зарядились. Схема замещения представлена только индуктивными элементами (рис. 4.15).

Поскольку обмотка однородна, то распределение напряжения по катушкам (виткам) будет равномерным, но зависит от режима нейтрали. В случае заземленной нейтрали принужденное напряжение  $U_{пр}$  равномерно спадает до нуля (рис. 4.15, а) и может быть записано уравнением

$$U_{\text{пр}(x)} = U_{\text{пад}}(1-x/l).$$

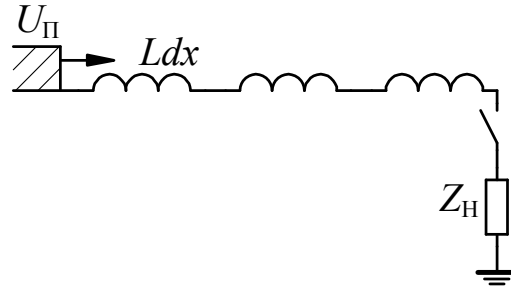


Рис. 4.15. Схема замещения обмотки трансформатора в установившемся режиме

Для изолированной нейтрали ток через обмотку не течет  $i_{\text{пр}} = 0$ . Следовательно,  $U_{\text{пр}}$  в начале и в конце обмотки одинаково (рис. 4.16, б).  $U_{\text{пр}} = U_{\text{пад}}$ . Отсюда следует, что в случае с изолированной нейтралью конец обмотки должен иметь такую же изоляцию, как и начало.

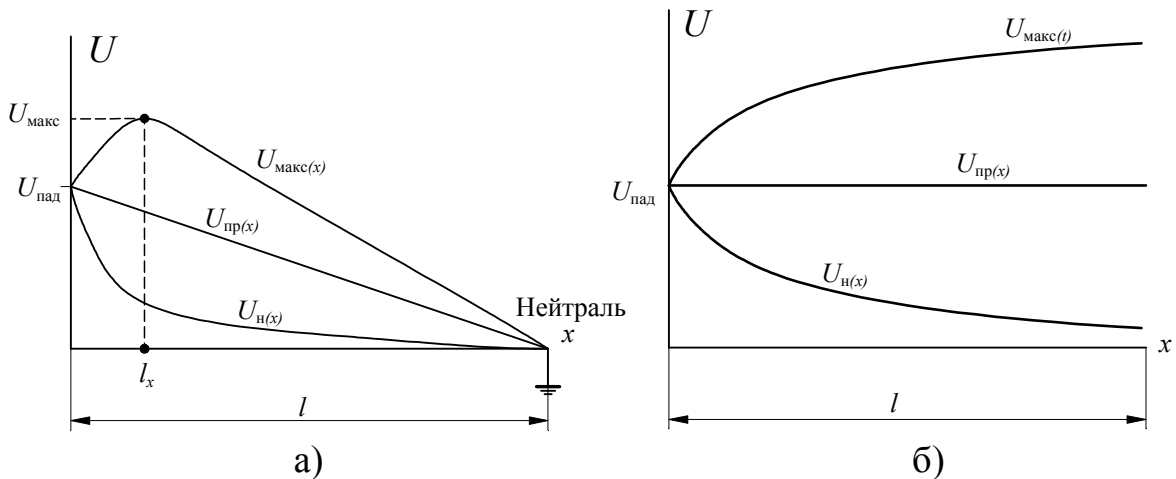


Рис. 4.16. Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора в разных стадиях: а) сопротивление нейтрали равно нулю; б) сопротивление нейтрали равно бесконечности

### 4.6.3. Переходный процесс

Из рис. 4.16 следует очевидное несоответствие между начальным и установившимся режимами в обмотке трансформатора. Это приводит к возникновению переходного процесса, где осью колебаний являются прямые установившегося режима. Схема замещения представлена на рис. 4.13, б, где каждая ячейка  $L, C, K$  представляет колебательный контур с собственной частотой колебаний от  $\omega_1$  до  $\omega_\infty$ . При этом в обмотке могут быть достигнуты максимальные потенциалы больше  $U_{\text{пад}}$ .



$$U_{\max} = U_{\text{пр}(x)} + \sum_{k=1}^n U_{k(x)},$$

где  $U_{k(x)}$  – свободная составляющая колебаний, определяемая как сумма ординат (амплитуд) всех гармоник в данной точке обмотки.

Максимальные потенциалы вдоль обмотки описываются огибающей максимальных потенциалов. Величина  $U_{\max}$  зависит от режима нейтрали. При заземленной нейтрали  $U_{\max} \leq (1,2-1,3)U_{\text{пад}}$  и приходится на начальные витки обмотки (рис. 4.16, а). При изолированной нейтрали в переходном режиме  $U_{\max} \leq 2U_{\text{пад}}$  и приходится на конец обмотки (рис. 4.16, б).

Перенапряжения в переходном режиме опасны для главной изоляции. Поэтому главная изоляция трансформатора должна быть усилена:

— для заземленной нейтрали в начальной части обмотки (1/3 от начала обмотки);

— для изолированной нейтрали усиление необходимо производить по всей длине, но особенно в конце обмотки.

#### 4.6.4. Распределение напряжения вдоль обмоток 3-х фазного трансформатора

Импульсные перенапряжения воздействуют на трансформатор, как правило, со стороны высокого напряжения. При этом волна перенапряжения может приходиться как с ВЛ, так и по кабельной вставке. Распределение напряжения по обмотке 3-х фазного трансформатора зависит от:

— схемы соединения обмоток;

— режима нейтрали.

Обмотки трансформатора с высокой стороны для импульсного воздействия нагружены на воздушную ЛЭП или на кабель. Волновое сопротивление воздушной линии в зависимости от конструкции и класса напряжения составляет  $Z_{\text{Л}} = 250 \div 500$  Ом. Волновое сопротивление кабеля  $Z_{\text{К}} = 50 \div 100 \div 150$  Ом. Волновое сопротивление обмоток трансформатора  $Z_{\text{ТР}} = 10\,000$  Ом, т. е. трансформатор нагружен на малое сопротивление по сравнению с собственным. Для упрощения можно представить, что обмотки, по которым не приходят волны перенапряжения, закорочены. Рассмотрим различные схемы соединения, приведенные на рис. 4.17.

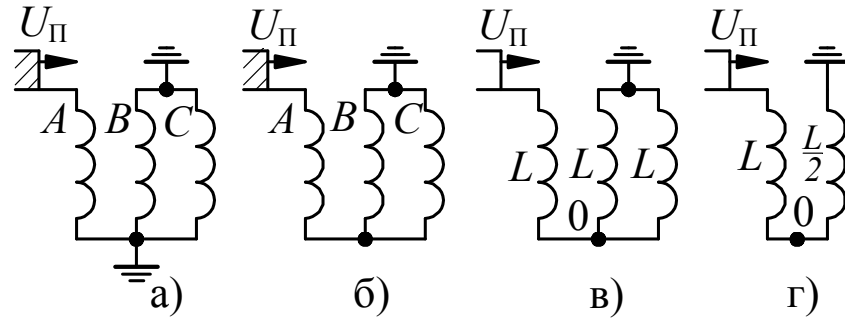


Рис. 4.17. Эквивалентные схемы замещения для анализа перенапряжений в обмотках трансформаторов: а — "звезда" с заземленной нейтралью; б — "звезда" с изолированной нейтралью; в, г — схема замещения для "звезды" с изолированной нейтралью

#### 4.6.4.1. Звезда с заземленной нейтралью

Волна перенапряжения приходит по одной фазе А (рис. 4.17, а). Распределение напряжения вдоль обмотки такое же, как в случае однообмоточного трансформатора с заземленной нейтралью (рис. 4.16, а). То же самое получается при воздействии перенапряжения по двум и трем фазам одновременно.

#### 4.6.4.2. Звезда с изолированной нейтралью

Общий метод расчета переходного процесса остается прежним: определяются кривые первоначального и установившегося распределения потенциалов по обмоткам и по разности этих кривых вычисляются составляющие свободного режима. Возможно два случая: падение волны на одну фазу (рис. 4.17, б) и падение волны на две фазы одновременно. В первом случае волна падает на фазу А, две другие фазы заземлены, имеем модификацию схемы, приведенную на рис. 4.17, в, г. Распределение напряжения падающей волны по высоковольтным обмоткам трансформатора получим как показано на рис. 4.18.

Установившееся распределение  $U_{ПР}$  имеет перелом в точке соединения обмоток (нейтраль) поскольку индуктивное сопротивление двух параллельно соединенных обмоток В и С вдвое меньше сопротивления обмотки А. Потенциал нейтрали в переходном режиме  $U_{МАКС}$  не превосходит  $2/3 U_{пад}$ .

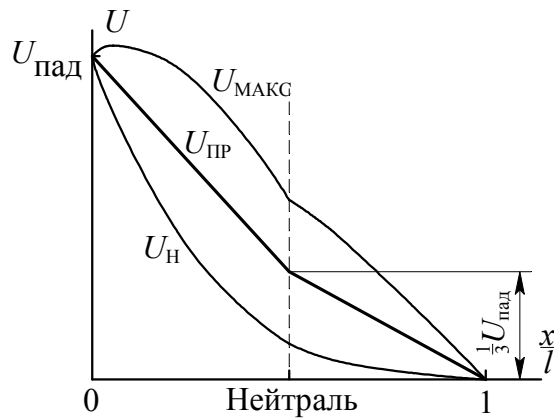


Рис. 4.18. Распределение напряжения по высоковольтным обмоткам 3-х фазного трансформатора при падении волны по фазе А:  $U_H$  — начальное распределение падающего напряжения вдоль обмоток;  $U_{ПР}$  — принужденное распределение напряжения;  $U_{МАКС}$  — огибающая переходного напряжения

В случае падения волны по двум фазам (рис. 4.19, а) схема замещения примет вид, приведенный на рис. 4.19, б. Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора представлено на рис. 4.20.

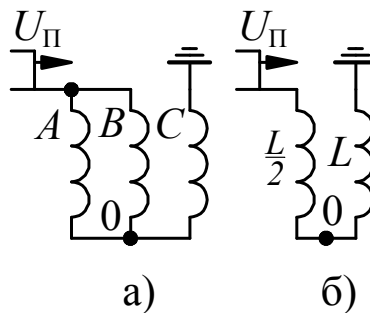


Рис. 4.19. Эквивалентные схемы замещения для анализа перенапряжений в обмотках трансформаторов при падении волн по двум фазам: а — "звезда" с изолированной нейтралью; б — эквивалентная схема замещения

Потенциал нейтрали может превышать  $U_{пад}$  в переходном режиме. Возникает опасность перенапряжения для главной изоляции в области нейтрали.

При падении волн по трем фазам на три обмотки трансформатора режимы распределения напряжения по обмоткам такие же, как для однообмоточного трансформатора с изолированной нейтралью (см. рис. 4.16, б).

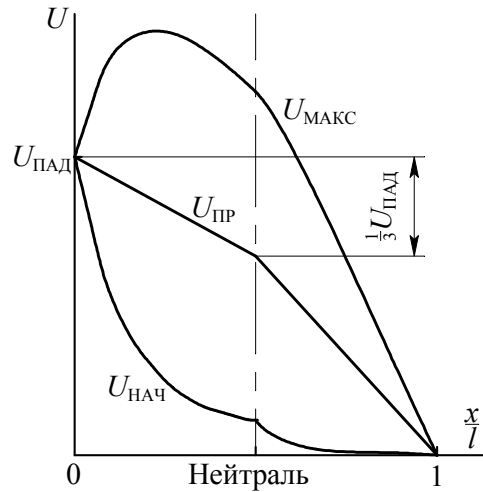


Рис. 4.20. Распределение напряжения по высоковольтным обмоткам 3-х фазного трансформатора при падении волны по двум фазам  $A$  и  $B$ :  $U_H$  — начальное распределение падающего напряжения вдоль обмоток;  $U_{ПР}$  — принужденное распределение напряжения;  $U_{МАКС}$  — огибающая переходного напряжения

#### 4.6.4.3. Соединение обмоток треугольником

Схема замещения для трансформатора с обмотками, соединенными в треугольник, приведена на рис. 4.21, а. При падении волны на обмотку по фазе  $A$ , можно считать, что при этом фазы  $C$  и  $B$  заземлены. В этом случае процесс в обмотке  $AC$  такой же, как в обмотке  $AB$ , т. е. как для однофазного трансформатора с заземленной нейтралью (рис. 4.16, а).

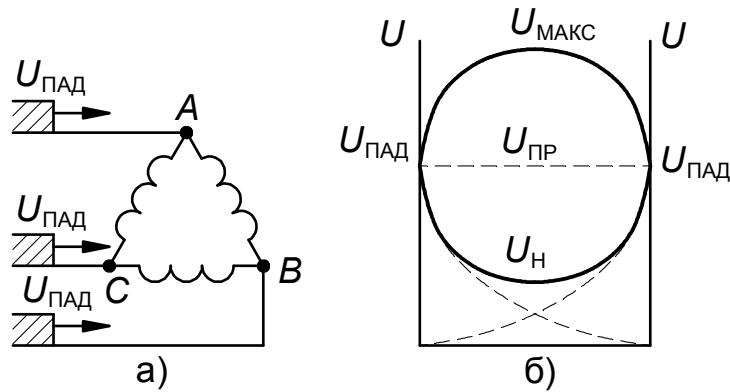


Рис. 4.21. Распределение потенциалов в обмотке трансформатора, соединенного в треугольник при симметричном падении волн: а) — падение волн по трем фазам обмотки, соединенных в треугольник; б) — распределение напряжения в одной из фаз

Падение волн по двум фазам  $A$  и  $B$  приводит к тому, что в обмотках  $AC$  и  $BC$  распределение падения напряжения во всех режимах одинаково и соответствует режиму однофазного трансформатора с за-

земленной нейтралью (рис. 4.16, а). Распределение напряжения в обмотке  $AB$  можно определить методом наложения (рис. 4.21, б).

Вначале определим напряжение в обмотке  $AB$  при падении волны только по фазе  $A$ . Точка  $B$  может считаться заземленной. Следовательно, процесс распределения напряжения будет как для однофазного трансформатора с заземленной нейтралью. Затем, определим напряжение в обмотке  $BA$  при падении волны по фазе  $B$ . Точку  $A$ , можно считать заземленной. Распределение такое же, как и в предыдущем случае. Суммируя начальные  $U_H$  и установившееся (принужденные)  $U_{ПР}$  распределения напряжения, определяем кривые, соответственно, начального и установившегося распределений в обмотке  $AB$  при падении двух волн на нее. По найденным значениям  $U_H$  и  $U_{ПР}$  определяем кривую максимальных перенапряжений  $U_{МАКС}$ . Из рис. 4.21, б видно, что максимальные напряжения, достигающие  $2 U_{ПАД}$ , возникают в середине обмотки. Следовательно, здесь создается наибольшая опасность для главной изоляции.

При падении волн по трем фазам процессы в каждой фазе будут аналогичны выше рассмотренным для фазы  $AB$ .

Для ослабления эффектов перенапряжения и защиты обмоток трансформаторов от пробоя используются различные способы введения в конструкцию обмоток специальных устройств, которые существенно снижают перенапряжения, воздействующие как на главную изоляцию, так и на продольную, например, экранирующие кольца, петлевые обмотки, слоевые обмотки, экраны.

#### 4.6.5. Передача волн перенапряжения из одной обмотки в другую

При падении электромагнитной волны на одну из обмоток трансформатора электромагнитные процессы в ней возбуждают высокие потенциалы в другой обмотке. Возможны 2 вида передачи ВН.

1. Емкостная передача потенциала в трансформаторах (рис. 4.22).

Обычно в высоковольтных трансформаторах емкость на землю обмотки высокого напряжения много меньше, чем емкость на землю обмотки низкого напряжения, т.е.  $C_{11} \ll C_{22}$ . Эквивалентная схема замещения, представленная на рис. 4.22, б, позволяет оценить напряжение на вторичной обмотке в зависимости от напряжения волны, пришедшей на первичную обмотку:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_{12} + C_{22}}{C_{12}},$$

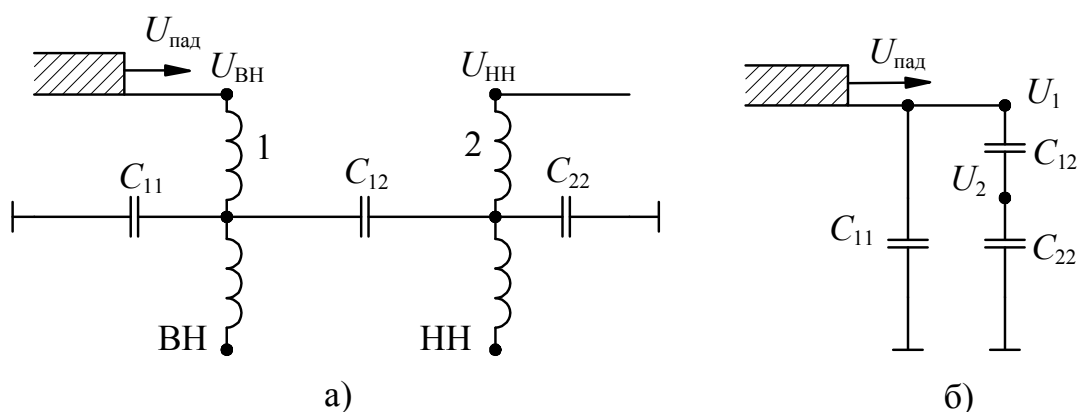


Рис. 4.22. Емкостная передача электромагнитной волны между обмотками трансформатора при приходе волны перенапряжения по одной из фаз: а) — общая схема замещения; б) — эквивалентная электрическая схема для расчета

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} = U_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{22}}{C_{12}}}$$

При емкостной передаче электромагнитной волны между обмотками трансформатора коэффициент трансформации не играет роли и зависит от  $\frac{C_{22}}{C_{12}}$ . Значительные потенциалы могут быть на обмотке 2 (НН), только когда  $C_{22}$  мало.

2. Электромагнитная передача напряжения в трансформаторах. Падение волны на обмотку НН представлено на рис. 4.23.

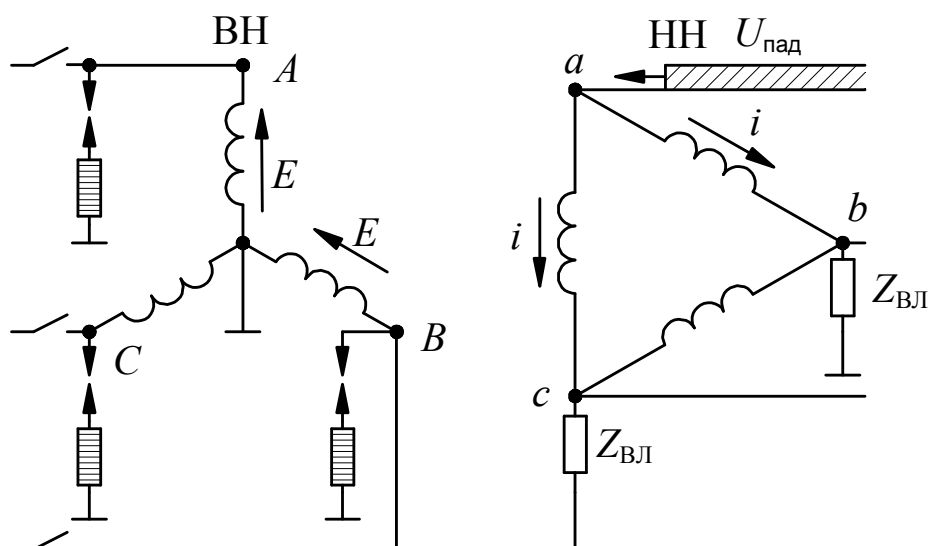


Рис. 4.23. Электромагнитная передача при падении волны перенапряжения на обмотку низкого напряжения

В этом случае возможны два варианта.

а) Если фазы ВН присоединены к ВЛ, то рост потенциала будет незначителен как в начале, так и в середине обмотки.

б) Если фазы ABC отсоединены от ВЛ, то

$$U_A = U_B = U_C \approx U_{\text{пад}} \cdot k_{\text{тр}},$$

где  $k_{\text{тр}}$  — коэффициент трансформации.

Это опасный режим и для внутренней и для внешней изоляции трансформатора. Следовательно, нужна установка защитных аппаратов от перенапряжений на выводах трансформатора.

**Например:** Волна перенапряжения падает со стороны низкого напряжения,  $U_{\text{пад}} = 10 \text{ кВ}$   $k_{\text{тр}} = 10 / 0,4 = 25$ . При таких условиях  $U_A = U_B = U_C = U_{\text{пад}} \cdot k_{\text{тр}} = 250 \text{ кВ}$ , т. е. для трансформатора класса 10 кВ это напряжение в 3 раза выше импульсного испытательного напряжения (75-80 кВ).

#### 4.7. Перенапряжения при отключении ненагруженных ЛЭП и батарей конденсаторов

##### 4.7.1. Отключение ненагруженных ВЛ

При холостом ходе линии ток опережает напряжение практически на  $90^\circ$  (линия, как емкость). При отключении линии, когда контакты выключателя начинают расходиться, между ними загорается дуга. При прохождении тока через 0 (момент  $t_0$  на рис. 4.24), дуга в выключателе погаснет. Линия остается заряженной. На линии остается напряжение  $+U_\phi$ , а напряжение источника продолжает изменяться по синусоиде. Через полпериода напряжение источника достигает значения  $-U_\phi$ . Следовательно, между контактами выключателя напряжение достигает значения  $2U_\phi$ . Прочность промежутка между контактами выключателя за полпериода возрастает не более, чем до  $2U_\phi$  (воздушные выключатели) и  $U_\phi$  (масляные выключатели).

Весьма вероятным является повторное зажигание дуги в выключателе в момент  $t_1$ , когда напряжение источника равно  $-U_\phi$ . При этом линия будет перезаряжаться от  $+U_\phi$  до  $-U_\phi$ . А по линии будет распространяться волна напряжения  $-2U_\phi$  и проходить ток  $i = -\frac{2U_\phi}{Z}$ .

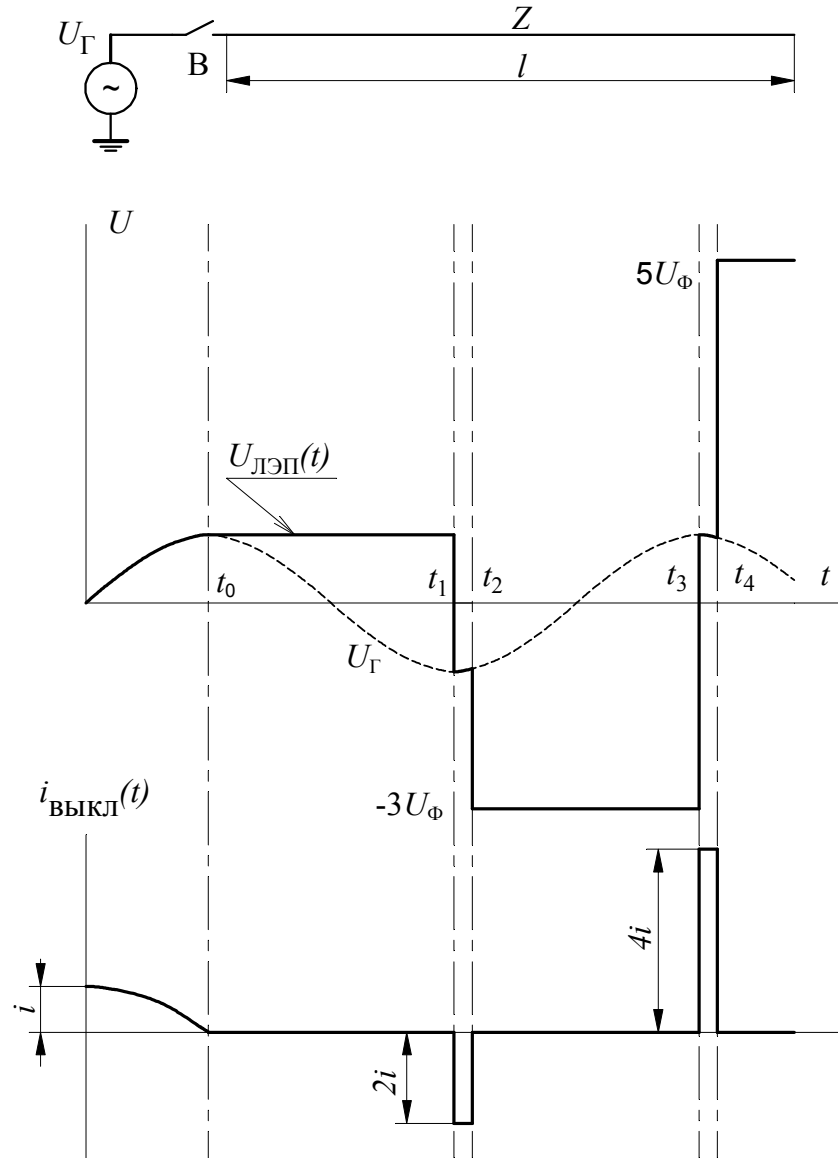


Рис. 4.24. Отключение холостой линии от источника при наличии повторного зажигания

Перезарядка ВЛ происходит в результате распространения по линии волны с крутым фронтом  $-2U_{\Phi}$  (компенсация  $+U_{\Phi}$  и зарядка до  $-U_{\Phi}$ ). На конце разомкнутой линии волна  $-2U_{\Phi}$  отразится с тем же знаком, т.е. достигнет  $-4U_{\Phi}$ , но результирующее напряжение будет  $-4U_{\Phi} + U_{\Phi} = -3U_{\Phi}$ . Волна тока отразится с обратным знаком (рис. 4.25).

При этом на линии будет устанавливаться напряжение  $-3U_{\Phi}$  (рис. 4.24), а суммарный ток на участках линии, где прошла отраженная волна, становится равным нулю. Поэтому, когда отраженная волна придет до источника (контакты выключателя), ток в выключателе проходит через 0 и дуга гаснет (момент  $t_2$ ). Это время пробега волны тока и напряжения значительно меньше полпериода. Но напряжение источника



изменяется синусоидально до  $+U_{\phi}$ , а между контактами выключателя напряжение достигает  $4U_{\phi}$ . И снова возможно зажигание дуги и т.д.

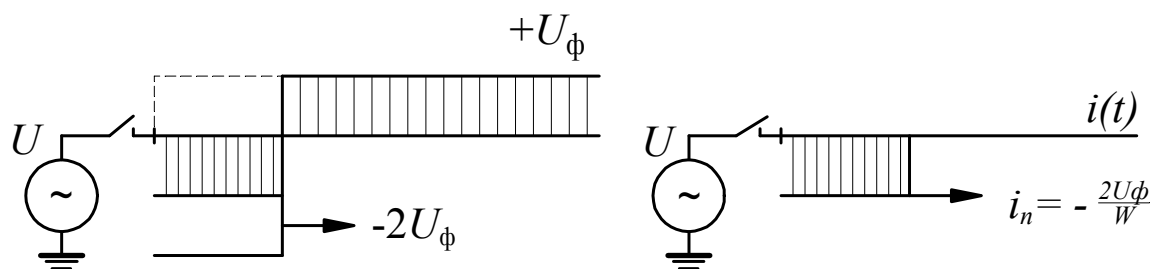


Рис. 4.25. Волновые процессы при отключении холостых линий

Если бы повторные зажигания дуги продолжались неограниченно долго, то перенапряжения на линии могли бы достигнуть сколь угодно большой величины. Но современные выключатели не позволяют этого. В подавляющем большинстве случаев при отключении холостых линий происходит не более одного повторного зажигания дуги. Поэтому напряжение на линии в случае источника бесконечной мощности не должно превышать  $3U_{\phi}$ . Поскольку линии имеют значительную длину, необходимо учитывать снижение напряжения источника за время двойного пробега волны по линии, а также потери в линии. Эти факторы уменьшают возможные амплитуды перенапряжений на линии. Перенапряжения при отключении холостых линий для ряда энергетических систем становятся наиболее важным видом перенапряжений.

Возможные виды ограничения подобных перенапряжений:

Радикальный способ — увеличение скорости восстановления электрической прочности, т.е. скорости расхождения контактов выключателя. Однако с увеличением быстродействия выключателей сильно возрастают перенапряжения при отключении холостых (ненагружены) трансформаторов.

Использование выключателей с шунтирующими сопротивлениями. Недостаток — сложность конструкции и значительная стоимость.

Использование вентильных разрядников. Надежно ограничивают перенапряжения при длине линий не более 200 км. В более длинных линиях нужны специальные разрядники с повышенной пропускной способностью по току.

Присоединение электромагнитных трансформаторов напряжения.

#### 4.7.2. Отключение батарей конденсаторов

Батареи конденсаторов применяются в электрических системах для улучшения коэффициента мощности, регулирования напряжения и увеличения пропускной способности дальних ЛЭП.

При отключении батарей конденсаторов, так же, как и отключении холостых линий, емкостный ток обрывается в момент прохождения его через нуль при максимуме напряжения на конденсаторе. Через полпериода напряжение на контактах выключателя достигает  $2U_{\phi}$ , что может вызвать повторное зажигание дуги в выключателе и т.д., как и при отключении холостых линий. Для ограничения этих напряжений здесь могут быть применены и применяются специальные быстродействующие выключатели, не дающие повторных зажиганий дуги.

### 4.7.3. Дугогасящие аппараты

При замыкании одного из фазных проводов на землю (к. з.) необходимо погасить дугу тока (рис. 4.26).

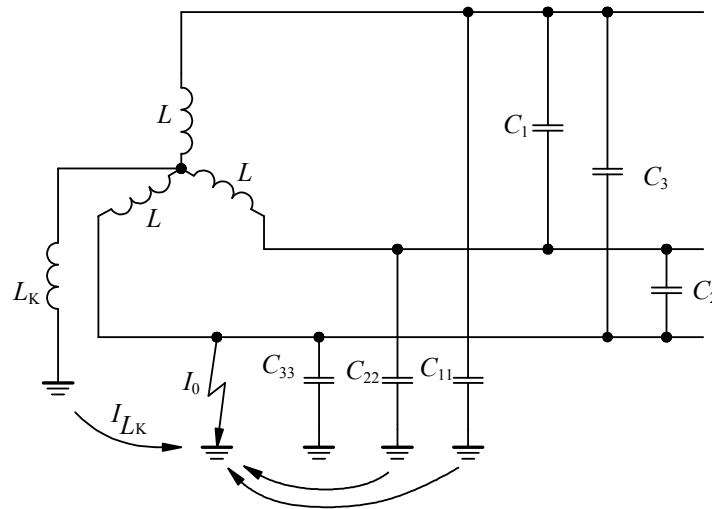


Рис. 4.26. Схема замещения сети с дугогасящей катушкой:  $L_k$  – индуктивность дугогасящей катушки;  $L$  – индуктивность обмотки трансформатора;  $C_1, C_2, C_3$  – емкость фаз линии между собой – междуфазная емкость;  $C_{11}, C_{22}, C_{33}$  – емкость фаз относительно земли;  $I_0$  – ток короткого замыкания;  $I_{Lk}$  – ток через дугогасящую катушку

Одним из наиболее распространенных средств уменьшения (компенсации) тока замыкания на землю является включение в нейтраль трансформатора регулируемого реактора, который называют:

- дугогасящей катушкой;
- катушкой Петерсена (по имени изобретателя);
- настроенной индуктивностью.

При замыкании провода на землю на нейтрали появляется напряжение по отношению к земле равное фазному напряжению, поэтому ток, протекающий через катушку, равен

$$I_{Lk} = \frac{U_{\phi}}{\omega L_k},$$

где

$L_k$  – индуктивность катушки;

$\omega$  - угловая частота сети.

В идеальном случае ток в месте замыкания провода на землю равен нулю и дуга гаснет. Этого можно достичь, если включить в нейтраль источника (трансформатора) индуктивность такой величины, чтобы ток, протекающий через нее, был равен по величине и сдвинут по фазе на  $180^\circ$  относительно тока в месте замыкания на землю. Такое возможно при выполнении равенства

$$3\omega \cdot C_{11} \cdot U_\phi = \frac{U_\phi}{\omega L_k},$$

откуда

$$\omega L_k = \frac{1}{3\omega C_{11}}.$$

Это условие идеальной настройки дугогасящей катушки. отсюда можно найти индуктивность  $L_k$  при известной емкости фазы относительно земли  $C_{11}$ .

В действительных (реальных) условиях ток в месте замыкания на землю не равен нулю. Его величина обусловлена:

- 1) степенью расстройки катушки  $L_k$ ;
- 2) активными потерями в катушке;
- 3) токами утечки с провода на землю;
- 4) высшими гармониками в цепи разряда.

Заземление нейтрали через дугогасящую катушку применяется при токах замыкания на землю более 10 А в сетях 35 кВ и более 30 А в сетях 6 ÷ 10 кВ (все сети с изолированной нейтралью). При меньших токах дуга замыкания на землю обычно гаснет самопроизвольно.

Степень расстройки катушки индуктивности обычно выражают через отношение токов. Возможны два случая

$$\frac{I_0 - I_{Lk}}{I_0} > 0, \text{ и } \frac{I_0 - I_{Lk}}{I_0} < 0.$$

Если отношение больше нуля ( $I_0 > I_{Lk}$ ), то имеет место недокомпенсация. Когда отношение меньше ( $I_0 < I_{Lk}$ ), имеет место перекомпенсация. При равенстве  $I_0 = I_{Lk}$  достигается полная компенсация (идеальный случай). Включение дугогасящей катушки в нейтраль трансформатора при несимметричной системе емкостей  $C_{11} \neq C_{22} \neq C_{33}$  приводит к возникновению напряжения на нейтрали трансформатора относительно земли в рабочем режиме. Это недостаток дугогасящей катушки. Для

устранения или уменьшения несимметрии емкостей на линии должна выполняться и выполняется транспозиция проводов.

Дугогасящая катушка имеет стальной сердечник с зазорами относительно индуктивностей обмотки. Изменяя величину зазора можно устанавливать (регулировать) желаемую вольт-амперную характеристику катушки.

Если нейтраль силового трансформатора недоступна, то в качестве дугогасящего аппарата применяют специальный дугогасящий трансформатор. Гашение дуги трансформатором происходит так же, как и дугогасящей катушкой. Различие только в конструктивном исполнении, но он может быть включен независимо от соединения обмоток силового трансформатора, поскольку подключается непосредственно к сборным шинам подстанции.

## **Заключение**

Техника высоких напряжений относительно молодая отрасль человеческой деятельности. Прогресс в области ТВН непосредственно влияет на решение узловых проблем электроэнергетики. Основные проблемы ТВН, можно сказать, для данного уровня электроснабжения в основном решены. Требуется доработка тех направлений, которые связаны со статистическим характером процессов: грозовые и коммутационные перенапряжения, погодные условия. Требуется доработка защитных и коммутационных аппаратов, которые улучшат координацию изоляции всех элементов сети электроснабжения от генератора до потребителя. Традиционны и вечны задачи совершенствования характеристик изоляции.

Особо следует отметить проблему диагностики изоляции. Современные условия эксплуатации высоковольтного оборудования ставят задачу непрерывного мониторинга ее состояния и прогнозирования срока службы в конкретных условиях эксплуатации. Эта задача становится особо актуальной в условиях острого дефицита средств по замене устаревшего и отработавшего свой штатный срок оборудования. Решение этой проблемы является важной задачей и требует привлечения молодых талантливых кадров.

Для выполнения задач ТВН требуются инженеры с хорошей подготовкой в области теории электрофизических наук, эксперимента и эксплуатации. Творческий подход к делу, трудолюбие и энтузиазм всегда были отличительной особенностью специалистов в области ТВН.

## Литература

1. Техника высоких напряжений./ И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов и др. Под ред. Г. С. Кучинского. — СПб.: Энергоатомиздат, 2003. — 608 с.
2. Техника высоких напряжений./ Под ред. Г. С. Кучинского. — СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. — 700 с.
3. Техника высоких напряжений./ Под ред. М. В. Костенко. — М.: Высшая школа, 1973. — 528 с.
4. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 464 с.
5. Техника высоких напряжений/ Под ред. Д. В. Разевига. — М.-Л.: Энергия, 1963. — 471 с.

## Дополнительная

1. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения./ Перевод с немецкого. М. Байер, В. Бек и др. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 555 с.
2. Техника высоких напряжений./ Под ред. Д. В. Разевига. — М.: Энергия, 1976. — 488 с.

**Владислав Федорович Важов  
Валерий Александрович Лавринович  
Сергей Анатольевич Лопаткин**

Техника высоких напряжений  
Курс лекций для бакалавров направления 551700 "Электроэнергетика"