

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
Высшего профессионального образования  
«Амурский государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой энергетики  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Мясоедов  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. ИЗОЛЯЦИЯ

Основной образовательной программы по направлению подготовки  
(специальности)

140204 – "Электрические станции"

140205 – "Электроэнергетические системы и сети"

140211 – "Электроснабжение "

140203 – "Релейная защита и автоматизация энергетических систем"

Составитель: В.В. Соловьев

Благовещенск 2012

## *Содержание*

1. Рабочая программа дисциплины	3
2. Краткий конспект лекций	36
3. Методические указания по выполнению лабораторных работ	86
4. Перечень программных продуктов	87
5. Методические указания по применению современных информационных технологий.	87
6. Методические указания профессорско-преподавательскому составу	87
7. Комплекты заданий для лабораторных работ	88
8. Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний	128
9. Контрольные вопросы к экзамену	129
10. Учебно-методическое и информационное обеспечение	130

### **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целями освоения дисциплины «Электроэнергетика» являются формирование систематизированных знаний об основных закономерностях и принципах построения электрических сетей, производства электроэнергии, видов и типов электростанций, схем электрических станций и подстанций, конструктивных особенностях линий электропередачи, методах расчета установившихся режимов электрических сетей, условиях выполнения балансов мощностей в электроэнергетической системе, особенностей систем электроснабжения различных объектов, общих сведений о релейной защите и автоматизации, изоляции и перенапряжениях, о современных методах анализа и управления качеством электроэнергии, приобретение студентами навыков анализа и составления схем электрических сетей, станций и подстанций, систем электроснабжения, расчета установившихся режимов, развитие культуры экономически целесообразного выбора проектируемого варианта схемы электроснабжения и электрооборудования, определения показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения, а также выбора технических средств и схемных решений для его улучшения.

Задачи дисциплины:

- Изучение основ электроэнергетических систем (ЭЭС), производства электроэнергии, электрических сетей, электрических станций и подстанций, расчета параметров режима, конструктивного исполнения линий электропередачи, основ релейной защиты и автоматики.
- Освоение методов расчета установившихся режимов сетей разных классов номинального напряжения, методики выбора ответвлений РПН силовых трансформаторов, автотрансформаторов и линейных регуляторов.
- Формирование навыков по расчету и анализу установившихся режимов электрических сетей, по обеспечению желаемого напряжения в сети, условий выполнения балансов активной и реактивной мощностей в ЭЭС, по проектированию и эксплуатации систем электроснабжения.
- Изучение научных основ построения систем электроснабжения, технологий анализа и синтеза схем электроснабжения напряжением до и выше 1 кВ, принципов и методов разработки и реализации оптимальных технических решений при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения. Освоение методик формирования величины расчетной нагрузки на различных уровнях системы электроснабжения, технико-экономических моделей, используемых при выборе типа и параметров электротехнического оборудования, методических подходов к решению проблемы компенсации реактивной мощности в современных условиях.
- Изучение изоляции линий электропередачи, электрооборудования станций и подстанций, экологических аспектов электроустановок высокого напряжения.
- Формирование навыков эксплуатации изоляции электроустановок.
- Получение знаний в области стандартизации качества электроэнергии.
- Изучение влияния низкого качества электроэнергии на электроустановки и системы электроэнергетики, видов и средств контроля и управления качеством электроэнергии, основных методов и способов достижения нормируемых показателей качества электроэнергии.

- Овладение методами расчета показателей качества электроэнергии в различных точках систем электроснабжения и выбора средств и способов его нормализации.
- Формирование навыков по решению проблемы качества электроэнергии при проектировании и эксплуатации объектов систем электроснабжения.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Дисциплина «Электроэнергетика» входит в цикл общепрофессиональных дисциплин (ОПД.Ф.08) и относится к дисциплинам, формирующим общепрофессиональные знания и навыки, необходимые при изучении дисциплин циклов СД и ДС, при выполнении дипломного проекта.

Она включает следующие разделы:

Производство электроэнергии;

Передача и распределение электроэнергии;

Изоляция;

Качество электроэнергии.

Требования к обязательному минимуму содержания ООП по направлению подготовки дипломированного специалиста «Электроэнергетика». Федеральный компонент ОПД.Ф.08 Электроэнергетика:

производство электроэнергии: современные и перспективные источники электроэнергии; электрические схемы, электрооборудование электростанций, собственные нужды и их схемы; распределительные устройства, их схемы; заземление электрических сетей; системы измерения, контроля, сигнализации и управления напряжением и частотой; резерв мощности; автоматизация процесса производства электроэнергии на электростанциях; ремонт оборудования;

передача и распределение электроэнергии: общие сведения об электроэнергетических системах; линии электропередачи переменного и постоянного тока; понижающие и преобразовательные подстанции; характеристика оборудования линий и подстанций; типы конфигураций электрических сетей; электрические нагрузки узлов электрических сетей; схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов; расчет режимов линий электропередачи и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах; балансы активной и реактивной мощности в энергосистеме, качество электроэнергии; регулирование напряжения и частоты в электроэнергетической системе;

электроснабжение: особенности систем электроснабжения городов, промышленных предприятий, объектов сельского хозяйства и транспортных систем; типы электроприемников, режимы их работы; методы расчета электрических нагрузок; методы достижения заданного уровня надежности оборудования, систем электроснабжения; условия выбора параметров основного оборудования в системах электроснабжения различного назначения; режимы нейтрали; типы энергоустановок, экономика электроснабжения; накопители энергии; ресурсосберегающие технологии. Нормативные показатели качества электроэнергии: технические, социально-экономические и экологические требования, предъявляемые к системам электроснабжения;

релейная защита и автоматизация: типы автоматических устройств релейной защиты и их функции; повреждения и ненормальные режимы; защита синхронных генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор, защита сборных шин станций и подстанций; автоматическое включение резервного питания; автоматическое включение синхронных генераторов на параллельную работу; автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности, частоты и активной мощности; противоаварийная автоматика, автоматический контроль и телемеханика в энергосистемах;

изоляция и перенапряжения: виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения; изоляция воздушных линий электропередачи; молниезащита воздушных линий; изоляция электрооборудования станций и подстанций, закрытых и открытых распределительных устройств; элегазовая изоляция; молниезащита оборудования станций и подстанций; защита изоляции электрооборудования от внутренних перенапряжений; экологические аспекты электроустановок высокого напряжения.

Дисциплина базируется на курсах цикла общих математических и общенаучных дисциплин (ЕН) «Математика» и «Физика», читаемых в 1 – 4 семестрах, курсе «Теоретические основы электротехники», входящем в цикл общепрофессиональных дисциплин (ОПД) и читаемом в 3 – 4 семестрах.

Студенты, обучающиеся по данной дисциплине, должны знать и владеть следующими материалами:

Математика – решение систем алгебраических уравнений, дифференциальные и интегральные исчисления, графы, теория функций комплексного переменного, теория вероятностей и математическая статистика, математическая логика;

Физика – электричество и магнетизм, явления сверхпроводимости, полупроводники, принципы неопределенности;

Теоретические основы электротехники – уравнения электромагнитного поля, законы электрических цепей; трехфазные цепи; теория электромагнитного поля, поверхностный эффект и эффект близости; электромагнитное экранирование.

Материаловедение. Электроматериаловедение – пробой газов, жидких и твердых диэлектриков; жидкие диэлектрики, полимеры, электроизоляционные материалы.

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) Знать:

общие сведения об электроэнергетических системах;  
современные и перспективные источники электроэнергии;  
типы электростанций и особенности их технологического режима;  
электрические схемы станций и подстанций;  
электрооборудование электростанций;  
основы заземления электрических сетей;  
резерв мощности;  
основы передачи и распределения электроэнергии;  
линии электропередачи переменного и постоянного тока;  
конфигурацию электрических сетей и способы присоединений подстанций;  
конструкцию линий электропередачи;  
схемы замещения линий и трансформаторов, автотрансформаторов;  
методы расчета установившихся режимов электрических сетей;  
балансы активной мощности и ее связь с частотой;  
балансы реактивной мощности и ее связь с напряжением.  
особенности систем электроснабжения предприятий, городов, объектов сельского хозяйства;  
теоретические основы проектирования систем электроснабжения;  
технические параметры систем электроснабжения;  
методы расчета электрических нагрузок;  
конструкцию, конфигурацию и исполнение электрических систем электроснабжения;  
принципы построения систем электроснабжения;

типы оборудования, применяемого в электроснабжении, методы их выбора;  
условия выбора параметров систем электроснабжения, схемы электроснабжения;  
режимы работы и технико-экономические характеристики систем электроснабжения, режимы нейтрали;  
влияние качества электроэнергии (КЭ) на электроприемники и технологические процессы, системы электроснабжения;  
нормирование качества электроэнергии, требования по качеству электроэнергии, предъявляемые к системам электроснабжения;  
методы расчета ПКЭ;  
современные схемные решения и технические средства улучшения ПКЭ;  
принципы и способы управления КЭ;  
типы устройств релейной защиты и их функции;  
исполнение защиты генераторов, трансформаторов, сборных шин станций и подстанций, виды системной и противоаварийной автоматики;  
виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения электрических станций и подстанций, воздушных и кабельных линий электропередачи;  
условия работы изоляции при длительном воздействии рабочего напряжения;  
молниезащиту воздушных линий, оборудования станций и подстанций.

## 2) Уметь:

выбирать источники электроэнергии, применять типовые схемы распределительных устройств;  
использовать принципы технологического процесса производства электроэнергии на различных типах электростанций, включая нетрадиционные источники энергии;  
разрабатывать и анализировать электрические схемы станций и подстанций;  
выбирать оборудование собственных нужд электростанций и их схемы;  
классифицировать электрические сети;  
составлять схемы замещения и определять их параметры для разомкнутых и простых замкнутых сетей различной конфигурации;  
рассчитывать основные характеристики линий электропередачи;  
рассчитывать нормальные и послеаварийные установившиеся режимы сетей различных конфигураций нескольких уровней номинального напряжения;  
выбирать номера ответвлений РПН и ПБВ силовых трансформаторов и автотрансформаторов, линейных регуляторов;  
составлять и обеспечивать балансы активной и реактивной мощностей в ЭЭС;  
анализировать рабочие режимы электроэнергетической системы;  
классифицировать электроприемники;  
рассчитывать электрические нагрузки;  
разрабатывать схемы внешнего и внутреннего электроснабжения;  
выбирать параметры основного оборудования в системах электроснабжения;  
выбирать режимы нейтрали и осуществлять компенсацию емкостных токов замыкания на землю;  
выбирать типы электроустановок;  
самостоятельно разрабатывать эффективные проектные решения в области электроэнергетики;  
применять ресурсосберегающие технологии;  
определять источники искажения КЭ и пользоваться ГОСТом 13109-97;  
определять показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения;  
выбирать точки, виды и периодичность контроля качества электроэнергии;  
определять ущербы от пониженного качества электроэнергии;

проводить комплексные исследования КЭ и решать вопросы его нормализации для объектов систем электроснабжения, в том числе выбирать схему или техническое устройство для нормализации ПКЭ;

выбирать релейную защиту, исходя из повреждения или аномального режима электроустановки или электроэнергетической системы;

выбирать средства автоматики и автоматизации;

анализировать условия работы изоляции электроустановок и линий электропередач различных классов напряжения;

анализировать и определять характеристики физических процессов, протекающих во внешней и внутренней изоляции под воздействием высоких напряжений, оценивать их влияние на надежность электропередачи и электроустановок;

выбирать изоляцию;

эксплуатировать внешнюю и внутреннюю изоляцию линий электропередачи и электроустановок при любых условиях работы энергосистемы;

защищать изоляцию электрооборудования от внутренних перенапряжений.

3) Владеть навыками:

построения и анализа схем электростанций и подстанций;

составления электрических схем основных типов электроустановок и расчетов их базовых энергетических показателей;

выбора простейших схем электрических соединений электрических станций;

анализа и составления электрических схем электрических сетей;

составления схем замещения электрических сетей;

расчета параметров режима электрических сетей;

обеспечения условий выполнения балансов в ЭЭС.

определения величин расчетных нагрузок;

разработки схем электроснабжения с учетом категорий по надежности и перегрузочной способности элементов схемы электроснабжения на вариантной основе;

выбора режимов нейтрали электроустановок в рассматриваемой системе электроснабжения и их конструктивного исполнения;

анализа качества электроэнергии в системах электроснабжения;

использования методов расчета показателей качества электроэнергии в различных узлах систем электроснабжения;

выбора оптимальных с точки зрения обеспечения качества электроэнергии схем подстанций и систем электроснабжения;

контроля и управления качеством электроэнергии на различных объектах систем электроснабжения;

выбора средств релейной защиты и автоматики в зависимости от вида повреждения в системе электроэнергетики;

проектирования и эксплуатации изоляции электроустановок с учетом экологических аспектов.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 332 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра)  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				ЛК	ПЗ	ЛЗ	СРС	

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости ( <i>по неделям семестра</i> )  Форма промежуточной аттестации ( <i>по семестрам</i> )
				ЛК	ПЗ	ЛЗ	СРС	
<b>Производство электроэнергии – 60 часов</b>								
1	Современные и перспективные источники электроэнергии	5	1-7	8	8		10	3,7 недели – опрос на лекции; 4,6 недели – опрос на практическом занятии, защита индивидуального домашнего задания
2	Электрические схемы и электрооборудование электрических станций	5	8-18	10	10		14	11, 15 недели – опрос на лекции; 8,10,12,14,16 недели – опрос на практическом занятии, защита индивидуального домашнего задания
3	Промежуточная аттестация	5						зачет
<b>Передача и распределение электроэнергии – 90 часов</b>								
1	Структура и характеристики ЭЭС, электрических сетей	5	1-6	18	6		4	1,3,5 недели – блиц-опрос на лекции; 2,4,6 недели – опрос на практическом занятии; 4,6 недели – защита индивидуального домашнего задания
2	Расчет установившихся режимов	5	7-15	26	10		11	7,9,11,13,15 недели - блиц-опрос на лекции; 8,10,12,14 недели - опрос на практическом занятии, защита индивидуального домашнего задания 8 неделя -

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости ( <i>по неделям семестра</i> )  Форма промежуточной аттестации ( <i>по семестрам</i> )
				ЛК	ПЗ	ЛЗ	СРС	
								коллоквиум
3	Рабочие режимы электроэнергети- ческих систем	5	16- 18	10	2		3	16 неделя – коллоквиум; 16,18 недели - опрос на практическом занятии, защита индивидуального домашнего задания; 17 неделя – блиц- опрос на лекции
4	Промежуточная аттестация	5						экзамен
<b>Изоляция – 94 часа</b>								
1	Внешняя изоляция	7	1-7	20	6	6	12	3,5,7 недели – опрос на лекции; 2,4,6 недели – опрос на лабораторном занятии, защита отчетов по лабораторной работе
2	Внутренняя изоляция	7	7- 11	14	4	4	8	9,11 недели – опрос на лекции; 8,10 недели – опрос на лабораторном занятии, защита отчетов по лабораторной работе
3	Изоляция электроустаново- к и воздушных линий	7	12- 16	14	6	6	10	13,15 недели – опрос на лекции; 12,14,16 недели – опрос на лабораторном занятии, защита отчетов по лабораторной работе
4	Промежуточная аттестация	7						экзамен
<b>Качество электроэнергии – 88 часов</b>								

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра)  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				ЛК	ПЗ	ЛЗ	СРС	
1	Характеристика систем электроснабжения. Построение систем электроснабжения, включая выбор их элементов и режимов работы	9	1-3	8	2		10	1 неделя – входной контроль; 3 неделя – блиц-опрос на лекции; 2 неделя – опрос на практическом занятии, защита индивидуального домашнего задания
2	Нормирование и контроль качества электроэнергии	9	4-5	6	4		6	5 неделя – блиц-опрос на лекции; 4 неделя – опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания
3	Методы расчета показателей качества электроэнергии	9	6-9	12	6		8	7, 9 недели - блиц-опрос на лекции; 6 неделя – контрольная работа 6, 8 недели - опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания 7 неделя – коллоквиум
4	Улучшение качества электроэнергии	9	10-14	16	2		8	10, 12, 14 недели - опрос на практике, защита индивидуального домашнего задания; 10 неделя – контрольная работа 11,13 недели – блиц-опрос на лекции
4	Промежуточная аттестация	9						экзамен

Примечания:

ЛК – лекции, ПЗ – практические занятия, ЛЗ – лабораторные занятия, СРС – самостоятельная работа студентов.

## **5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1. Лекции**

#### ***Производство электроэнергии – 18 часов***

Раздел 1. Современные и перспективные источники электроэнергии

Тема 1. Введение – 2 часа

Основные понятия и определения. Общая характеристика источников электроэнергии.

Тема 2. Производство электрической энергии – 6 часов

Виды, назначения, воздействия на окружающую среду ГЭС, ГАЭС, ТЭС. Возобновляемые источники энергии, виды, назначения, условия использования. Графики нагрузки энергосистемы: заполнение суточного графика нагрузки. Электроприемники и их категории.

Раздел 2 Электрические схемы и электрооборудование электрических станций

Тема 3. Электрические станции – 4 часа

Электрические схемы электрических станций (ЭС); электрооборудование электростанций; собственные нужды и их схемы; распределительные устройства и их схемы; выбор трансформаторов связи и трансформаторов собственных нужд на электрических станциях; системы измерения, контроля, сигнализации и управления напряжением и частотой; резерв мощности; автоматизация процесса производства электроэнергии на ЭС.

Тема 4. Распределительные устройства и их схемы – 4 часа

Коммутационные аппараты: виды обозначения на схеме, назначение. Комплектные распределительные устройства напряжением выше 6-10 кВ. Схемы распределительных устройств (РУ), область их применения, закрытые и открытые РУ; конструктивное выполнение РУ. Ремонт оборудования.

Тема 5. Заземление электрических сетей – 2 часа

Назначение заземления; заземляющие устройства и заземлители; контур заземления; сопротивление заземления; сопротивление грунта; сопротивление растеканию вертикального электрода; термическая стойкость заземляющих проводников; заземление электрических сетей.

#### ***Передача и распределение электроэнергии – 54 часа***

Раздел 1. Структура и характеристики ЭЭС, электрических сетей

Тема 1. Общие сведения об электроэнергетических системах – 6 часов

Современное состояние энергетики и тенденции ее развития. Топливо-энергетический комплекс. Перспективы развития электроэнергетики на Дальнем Востоке. Определение электроэнергетической системы, электрической станции, электрической сети, подстанции, линии электропередачи. Классификация электрических сетей. Линии электропередачи переменного и постоянного тока. Понижающие и преобразовательные подстанции. Характеристики оборудования линий и подстанций. Типы конфигураций электрических сетей.

Тема 2. Схемы электрических сетей – 4 часа

Разомкнутые сети. Замкнутые сети: кольцевые сети и сети с двухсторонним питанием. Схемы соединения электрической сети. Способы присоединения подстанций к электрической сети. Схемы электрических соединений подстанций.

### Тема 3. Конструкции линий электрических сетей – 8 часов

Конструктивные элементы воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Провода воздушных линий и тросы. Опоры: их классификация и конструктивное исполнение, область применения; линейная арматура; изоляторы. Конструктивные элементы кабельных линий электропередачи. Классификация кабельных линий, принципы формирования марки кабеля, маркировка кабелей, конструктивное исполнение кабелей различного уровня номинального напряжения, их область применения. Кабельная арматура. Прокладка кабелей.

#### Раздел 2. Расчет установившихся режимов

Тема 4. Схемы замещения линий, трансформаторов и автотрансформаторов – 6 часов

Схемы замещения линий с сосредоточенными параметрами. Определение параметров схем замещения воздушных и кабельных линий. Схемы замещения двухобмоточных, трехобмоточных трансформаторов, трансформаторов с расщепленными обмотками, автотрансформаторов и расчет их параметров.

#### Тема 5. Расчет режимов разомкнутых электрических сетей – 6 часов

Расчет режимов линий электропередачи и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах. Приведенная и расчетная нагрузка узла. Потери мощности в двухобмоточном, трехобмоточном трансформаторах, в автотрансформаторе. Падение и потеря напряжения. Расчет режима электрической сети по данным «конца» и по данным «начала» при заданном токе нагрузки, мощности нагрузки. Построение векторных диаграмм при расчете режимов.

#### Тема 6. Расчет режимов в замкнутых электрических сетях – 6 часов

Определение потоков мощности на головных участках в простых замкнутых сетях. Точка потокораздела. Расчет режимов кольцевых сетей. Расчет сети с двумя точками потокораздела. Расчет режимов сети с двухсторонним питанием.

Тема 7. Расчет режимов в электрических сетях нескольких классов номинальных напряжений – 4 часа

Определение напряжения на стороне низшего напряжения трансформатора. Расчет режимов сети с различными номинальными напряжениями. Порядок расчета режима сети любой конфигурации. Регулирование напряжения с помощью ответвлений РПН трансформаторов, автотрансформаторов и линейных регуляторов.

#### Тема 8. Особенности расчета режимов – 4 часа

Расчет режима в однородных сетях. Особенности расчета сетей с равномерно распределенной нагрузкой. Определение наибольшей потери напряжения.

#### Раздел 3. Рабочие режимы электроэнергетических систем

Тема 9. Модели электрических нагрузок узлов электрических сетей при расчетах режимов – 4 часа

Электрические нагрузки узлов электрических сетей. Статические и динамические характеристики нагрузок, понятие и физическая сущность. Статические характеристики осветительной нагрузки, двигателей. Комплексная нагрузка узла. Статические характеристики комплексной нагрузки по напряжению и частоте. Регулируемый эффект нагрузки. Способы задания нагрузки при расчетах режимов.

#### Тема 10. Балансы активной и реактивной мощности в энергосистеме – 6 часов

Баланс активной мощности и ее связь с частотой. Резерв мощности. Регулирование частоты вращения турбины. Статическая и динамическая характеристики турбины. Качество электроэнергии; регулирование напряжения и частоты в электроэнергетической системе. Баланс реактивной мощности и ее связь с напряжением. Генерация реактивной мощности. Потребление реактивной мощности. Регулирование напряжения в ЭЭС.

## *Изоляция – 48 часов*

### Раздел 1. Внешняя изоляция

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения – 4 часа

Предмет и задачи раздела дисциплины. Виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения. Изоляция воздушных линий электропередачи, условия ее работы. Требования к изоляции и классификация электрической изоляции. Напряжения, действующие на изоляцию. Общие сведения о перенапряжениях, возникающих в электроустановках, в электроэнергетических системах, их характеристики. Проблемы изоляции в современной электроэнергетике.

Тема 2. Общая характеристика внешней изоляции – 4 часа

Особенности внешней изоляции. Атмосферный воздух как диэлектрик. Классификация воздушных изоляционных промежутков. Назначение и типы изоляторов. Конструкция изоляторов. Виды, типовые элементы и условия испытаний внешней изоляции.

Тема 3. Разряды в воздушных промежутках – 6 часов

Разряд в однородном поле. Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем. Закон Пашена. Слабонеоднородные и резконеоднородные поля. Развитие разряда и начальные напряжения промежутков с неоднородным электрическим полем. Эффект полярности электродов. Разряды в длинных воздушных промежутках. Время разряда и его структура. Вольт-секундные характеристики изоляции и их значение.

Тема 4. Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов – 6 часов

Поверхностный разряд в резконеоднородном поле при преобладании: а) тангенциальной составляющей напряженности; б) нормальной составляющей напряженности. Разряд вдоль поверхности в однородном поле. Влияние конструктивных особенностей изоляторов на напряжение перекрытия. Развитие разряда и напряжения перекрытия изоляторов при неблагоприятных атмосферных воздействиях, их учет при определении разрядных и испытательных напряжений. Коронный разряд, импульсная корона. Регулирование электрических полей во внешней изоляции за счет экранов, барьеров и принудительного распределения напряжения в изоляционных конструкциях.

### Раздел 2. Внутренняя изоляция

Тема 5. Общие свойства внутренней изоляции – 4 часа

Внутренняя изоляция электроустановок, ее общие характеристики, основные виды и принципы использования. Зависимость электрической прочности изоляции от длительности воздействия напряжения. Кратковременная и длительная электрическая прочность изоляции. Закономерности старения изоляции, характеристики частичных разрядов. Самовосстанавливающаяся и несамовосстанавливающаяся изоляция. Краткая характеристика пробоев жидких и твердых диэлектриков.

Тема 6. Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности - 10 часов

Комбинирование диэлектрических материалов во внутренней изоляции. Маслбарьерная изоляция. Роль барьеров в повышении электрической прочности изоляции. Твердая изоляция. Бумажно-масляная изоляция. Вакуумная изоляция. Элегазовая изоляция. Газовая изоляция. Регулирование электрических полей во внутренней изоляции с помощью барьеров, градирование изоляции, Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий. Допустимые напряжения на внутренней изоляции.

### Раздел 3. Изоляция электроустановок и воздушных линий

Тема 7. Изоляция устройств высокого напряжения – 10 часов

Изоляция кабельных линий высокого напряжения. Общие принципы выполнения и конструкции кабельной изоляции. Кабели с вязкой пропиткой. Маслонаполненные кабели. Газонаполненные и газоизолированные кабели, кабели с элегазовой изоляцией. Кабели с пластмассовой изоляцией. Кабельные муфты. Испытания изоляции кабелей. Изоляция силовых трансформаторов: классификация и особенности изоляции. Конструкция изоляции трансформаторов. Изоляция электрооборудования станций и подстанций. Изоляция электрооборудования закрытых и открытых распределительных устройств. Изоляция трансформаторов тока, ее конструкция, испытания. Изоляция выключателей (масляных, воздушных, элегазовых, вакуумных), ее испытания. Изоляция герметизированных распределительных устройств (на основе элегаза). Конструкция ячеек ГРУ, КРУЭ, их монтаж и эксплуатация. Изоляция вводов высокого напряжения, конструктивные особенности и профилактические испытания. Изоляция силовых конденсаторов, ее конструкция, испытания. Изоляция электрических машин высокого напряжения, ее конструкция и испытания. Волновые процессы в обмотках электрических машин. Молниезащита оборудования станций и подстанций; защита изоляции электрооборудования от внутренних перенапряжений.

Тема 8. Изоляция воздушных линий электропередачи – 4 часа

Разрядные напряжения воздушных промежутков, характерных для линий электропередачи. Выбор линейной изоляции. Статистический метод выбора изоляции для нестандартных воздушных линий (ВЛ). Методика выбора длины воздушного промежутка. Выбор промежутка провод-земля или провод-транспорт. Молниезащита воздушных линий. Экологические аспекты электроустановок высокого напряжения. Экологическое влияние ВЛ и РУ подстанций и станций.

### ***Качество электроэнергии – 42 часа***

Раздел 1. Характеристика систем электроснабжения. Построение систем электроснабжения, включая выбор их элементов и режимов работы

Тема 1. Характеристика систем электроснабжения и их особенностей - 2 часа

Параметры и режимы систем электроснабжения. Особенности систем электроснабжения городов, промышленных предприятий, объектов сельского хозяйства и транспортных систем, их структур. Типы электроприемников и режимы их работы. Типы энергоустановок. Накопители энергии. Ресурсосберегающие технологии.

Тема 2. Методы расчета электрических нагрузок – 2 часа.

Описание электрической нагрузки случайным процессом. Общее и различия в практических методах определения расчетной нагрузки систем электроснабжения городов и промышленных предприятий. Определение расчетной нагрузки элементов систем электроснабжения на различных ее уровнях. Особенности расчета нагрузки промышленных предприятий. Расчет нагрузок специфичных электроприемников. Расчет электрических нагрузок городов. Расчетные электрические нагрузки сельских потребителей.

Тема 3. Построение систем электроснабжения и выбор ее элементов – 2 часа

Принципы построения систем электроснабжения. Методы достижения заданного уровня надежности оборудования, систем электроснабжения. Комплексная характеристика электрических схем систем электроснабжения. Влияние категории надежности электроснабжения электроприемников и допустимых систематических и послеаварийных перегрузок оборудования на построение системы электроснабжения. Особенности систем электроснабжения городов, промышленных предприятий, объектов сельского хозяйства и транспортных систем. Общее и различия в схемах городских и промышленных электрических сетей. Условия выбора параметров основного

оборудования в системах электроснабжения различного назначения. Режимы нейтрали. Экономика электроснабжения. Экономические и технические критерии выбора параметров основного электрооборудования систем электроснабжения. Технико-экономическое обоснование выбора схем электроснабжения и их элементов.

Тема 4. Релейная защита и автоматика – 2 часа

Основные требования, предъявляемые к релейной защите и автоматике в системах электроснабжения. Типы автоматических устройств релейной защиты и их функции. Повреждения и ненормальные режимы. Основные виды защит и параметры релейной защиты. Защита синхронных генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор, защита сборных шин станций и подстанций. Автоматическое включение резервного питания. Автоматическое включение синхронных генераторов на параллельную работу. Автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности, частоты и активной мощности. Противоаварийная автоматика. Автоматический контроль и телемеханика в энергосистемах.

Раздел 2. Нормирование и контроль качества электроэнергии

Тема 5. Влияние качества электроэнергии на электроприемники и технологические установки - 2 часа

Понятие КЭ. Актуальность проблемы КЭ. Технические, социально-экономические и экологические требования, предъявляемые к системам электроснабжения. Характеристика КЭ на предприятиях и объектах, приравненных к ним. Влияние отклонений напряжения на работу асинхронных и синхронных двигателей, полупроводниковых преобразователей, электротермических установок, осветительных электроприемников. Влияние колебаний напряжения на здоровье человека, элементы систем электроэнергетики, потребителей электроэнергии, технологические установки. Влияние несимметрии напряжения на электрические машины, электрические сети, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики, работу электротермических установок. Влияние несинусоидальности напряжения на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики, элементы систем электроэнергетики. Сущность электромагнитных помех и их влияние на объекты системы электроэнергетики, электронную и микропроцессорную технику, работу персональных компьютеров. Оценка ущерба от некачественной электроэнергии.

Тема 6. Нормативно-правовое обеспечение проблемы качества электроэнергии. Нормативные показатели качества электроэнергии - 2 часа

Стандартизация в области качества электроэнергии. Международные, межгосударственные стандарты по качеству электроэнергии. Принципы нормирования КЭ. Нормативные показатели качества электроэнергии. Номенклатура ПКЭ. Основные и дополнительные ПКЭ, их определение. Требования к ПКЭ, нормативные значения основных ПКЭ. Правовая основа взаимоотношений потребителей и энергоснабжающих организаций в области качества электроэнергии.

Тема 7. Контроль качества электроэнергии - 2 часа

Основные определения в области контроля качества электроэнергии. Принципы контроля, анализа и управления КЭ. Виды и периодичность контроля. Выбор пунктов контроля КЭ и контролируемых ПКЭ. Средства и системы контроля КЭ. Погрешности измерений ПКЭ. Представление и анализ результатов контроля КЭ. Определение неустоек за искажение качества электроэнергии.

Раздел 3. Методы расчета показателей качества электроэнергии

Тема 8. Определение отклонений и колебаний напряжения – 6 часов

Определение возможного диапазона отклонений напряжения у потребителей. Определение предельно допустимых отклонений на шинах центра питания. Расчет отклонений напряжения в расчетной точке сети. Методы расчета колебаний напряжения. Определение колебаний напряжения при работе ДСП. Расчет колебаний напряжения при работе сварочных установок, прокатных станов.

Тема 9. Расчет несинусоидальности и несимметрии напряжения – 6 часов

Определение ПКЭ, характеризующих несинусоидальность напряжений. Расчет значений токов высших гармоник, обусловленных различными источниками искажения. Составление схем замещения сети и их преобразования. Определение напряжений высших гармоник. Расчет высших гармоник в компенсирующих устройствах. Проверка возможности возникновения резонанса в сети на частотах высших гармоник. Расчет коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности. Оценка допустимости подключения специфичной нагрузки к сети энергоснабжающей организации.

Раздел 4. Улучшение качества электроэнергии

Тема 10. Регулирование напряжения в сети - 4 часа

Технические, социально-экономические и экологические требования, предъявляемые к системам электроснабжения. Регулирование напряжения. Способы и средства регулирования напряжения. Виды регулирования. Методы регулирования. Анализ режима напряжения в распределительной сети. Обеспечение выполнения закона встречного регулирования.

Тема 11. Ограничение колебаний напряжения – 4 часа

Схемные решения по ограничению колебаний напряжения. Технические средства, ограничивающие уровень колебаний: специальные синхронные компенсаторы, статические источники прямой компенсации и косвенной компенсации колебаний напряжения: СТАТКОМ, ТКРМ, СКУ, ИРМ, СТК и др. Выбор параметров технических средств, ограничивающих размахи изменения напряжения.

Тема 12. Снижение несинусоидальности напряжения – 4 часа

Схемные решения. Силовые резонансные фильтры и алгоритм их выбора или проектирования. Расчет параметров силовых резонансных фильтров. Ненастроенные фильтры и выбор их параметров. Филтросимметрирующие и фильтрокомпенсирующие устройства. Комбинированные фильтры высших гармоник. Гибридные и активные фильтры.

Тема 13. Снижение несимметрии напряжения – 2 часа

Способы симметрирования, схемные решения по снижению несимметрии напряжения. Симметрирующие устройства: трансформаторного типа, схемы Штейнметца, емкостные, емкостно-индуктивные устройства и выбор их параметров.

Тема 14. Управление КЭ - 2 часа

Основные определения в области управления качеством электроэнергии. Принципы построения системы управления качеством электроэнергии. Организационные, методические и технические мероприятия по улучшению КЭ. Определение ущербов от пониженного качества электроэнергии. Оптимизация ПКЭ.

## 5.2. Практические занятия

### *Производство электроэнергии – 18 часов*

Цель проведения практических занятий – научить студентов выбирать и анализировать схемы электрических станций и подстанций.

№ п.п.	Наименование темы	Кол-во часов
1.	Технологическая и структурная схема ТЭЦ	2
2.	Технологическая и структурная схема КЭС, ГЭС и АЭС	2
3.	Выбор силовых трансформаторов (автотрансформаторов) электростанций и подстанций	4
4	Схемы распределительных устройств 35-750 кВ	6

№ п.п.	Наименование темы	Кол-во часов
5.	Схемы собственных нужд электростанций и подстанций	4

### *Передача и распределение электроэнергии – 18 часов*

Практические занятия проводятся с целью закрепления знаний, полученных при изучении теоретического курса, и формировании навыков по расчету установившихся нормальных и послеаварийных режимов в сетях различных конфигураций и классов номинального напряжения, по регулированию напряжения в сети с помощью устройств РПН, ПБВ и линейных регуляторов.

№ п/п	Наименование темы	Кол-во часов
1.	Расчет параметров электрических схем замещения ЛЭП	2
2.	Расчет параметров схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов	2
3.	Составление схем замещения электрической сети. Определение приведенной и расчетной нагрузок узла	2
4.	Расчет режимов в разомкнутых сетях	2
5.	Расчет режимов в кольцевых сетях	2
6.	Расчет режимов в сетях с двухсторонним питанием	2
7.	Выбор ответвлений РПН трансформаторов, автотрансформаторов, линейных регуляторов	2
8.	Расчет режимов в сетях с несколькими номинальными напряжениями	2
9.	Обзор задач по всем темам	2

### *Качество электроэнергии – 14 часов*

Практические занятия проводятся с целью закрепления знаний, полученных при изучении теоретического курса, и приобретения навыков в исследовании качества электроэнергии и построении систем электроснабжения с учетом качества электроэнергии. Тематика практических занятий приведена в табл.

№ п.п.	Наименование темы	Кол-во часов
1	Расчет электрических нагрузок и определение параметров схем электроснабжения	2
2	Эксплуатационный контроль ПКЭ. Определение соответствия показателям качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.	2
3	Расчет отклонений напряжений в распределительных сетях предприятий и энергосистем. Расчет колебаний напряжения.	2
4	Расчет несинусоидальных и несимметричных режимов.	2
5	Регулирование напряжения в электрических сетях. Выбор добавок напряжения при различных средствах регулирования напряжения.	2
6	Выбор параметров технических средств по снижению несинусоидальности напряжения в электрических сетях.	2
7	Выбор параметров технических средств по снижению несимметрии и колебаний напряжения в электрических сетях.	2

Задачи, рассматриваемые на практических занятиях, подбираются в соответствии со спецификой специальности, при этом используются реальные схемы объектов и систем электроснабжения. На практических занятиях каждому студенту выдаются индивидуальные домашние задания.

### 5.3. Лабораторные занятия

Целью проведения лабораторных работ является изучение вопросов, связанных с работой изоляции высоковольтных электроустановок и освоения правил безопасности проведения работ на высоковольтных линиях электропередачи, в распределительных устройствах станций и подстанций.

№ п/п	Наименование лабораторных работ	Кол-во часов
1	Изучение конструкции, условий применения аппарата АИИ-70 и правил безопасности в зале ТВН	2
2	Исследование электрической прочности воздушных промежутков в переменном и постоянном магнитном поле	2
3	Исследование электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков	2
4	Исследование вольт-секундных характеристик изоляционных конструкций. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции.	2
5	Изучение конструкций изоляторов	2
6	Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов	2
7	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	2
8	Определение электрической прочности жидких диэлектриков	2

### 6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

№ п/п	№ раздела дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоёмкость в часах
<b>Производство электроэнергии – 24 часа</b>			
1	1	подготовка к опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию	4 6
2	2	подготовка к опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию	6 8
<b>Передача и распределение электроэнергии – 18 часов</b>			
1	1	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию	2 2

№ п/п	№ раздела дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоёмкость в часах
2	2	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию; подготовка к коллоквиуму	4 5 2
3	3	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию подготовка к коллоквиуму	1 1 1
<b>Качество электроэнергии</b>			
1	1	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию проработка материала, вынесенного на самостоятельное изучение	2 2 6
2	2	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию	2 4
3	3	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию; подготовка к контрольной работе; подготовка к коллоквиуму	2 3 1 2
4	4	подготовка к блиц-опросу на лекции; выполнение индивидуальных домашних заданий и подготовка к практическому занятию; подготовка к контрольной работе; проработка материала, вынесенного на самостоятельное изучение	2 2 1 3

## 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации дисциплины «Электроэнергетика» используются традиционные и современные образовательные технологии. Из современных образовательных технологий применяются информационные и компьютерные технологии с привлечением к преподаванию мультимедийной техники, технологии активного обучения, проблемного обучения. Применяются следующие активные и интерактивные формы проведения

занятий: проблемные ситуации, компьютерные симуляции, деловые игры, на которых проводится структурный анализ схем электроэнергетической системы Дальнего Востока, систем электроснабжения существующих предприятий и городов, вырабатываются навыки построения схем электрических сетей и систем электроснабжения, разбора конкретных ситуаций по нарушению качества электроэнергии и выработки инженерных решений по его обеспечению. В рамках дисциплины предусмотрены мастер-классы специалистов в области электроэнергетики.

Самостоятельная работа студентов подразумевает работу под руководством преподавателя: консультации и помощь при выполнении индивидуального домашнего задания, при подготовке к лабораторной работе, при изучении материалов, выносимых на самостоятельную проработку, при подготовке к деловой игре, работу со схемами электрических станций и подстанций, электроэнергетической системы ДВФО, со схемами электроснабжения предприятий и городов, индивидуальную работу студента в компьютерном классе ЭФ или в библиотеке.

## **8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

### *Производство электроэнергии*

Самостоятельное изучение разделов дисциплины включает работу над лекционным материалом и литературой при подготовке к практическим занятиям, а также активный поиск новой информации в Интернете по заданию лектора или руководителя практических занятий.

Темы индивидуальной работы студента:  
особенности технологических схем ТЭЦ по сравнению с КЭС;  
виды технологических схем АЭС;  
особенности схемы ГЭС по мощности;  
нетрадиционные источники электроэнергии в энергетике;  
особенности схемы ГАЭС;  
парогазовые и паротурбинные установки;  
компоновочные решения ОРУ и КРУЭ.

#### Контрольные вопросы к зачету

1. Современные и перспективные источники электроэнергии.
2. ТЭС, виды, назначение воздействия на окружающую среду.
3. ТЭС, электрические схемы и электрооборудование.
4. ГЭС, сравнительная характеристика видов.
5. ГЭС, электрические схемы и электрооборудование.
6. ГАЭС, назначение, принцип действия, электрические схемы и электрооборудование.
7. Возобновляемые источники энергии: виды, условия использования.
8. График нагрузки энергосистемы: заполнения по виду станций.
9. Особенности ТЭС, АЭС и ГЭС, учитываемые при заполнении суточного графика нагрузки.
10. Особенности технологической схемы ТЭЦ в сравнении с КЭС.
11. Виды технологических схем АЭС.
12. Особенности схемы ГЭС по мощности.
13. Схемы распределительных устройств 10-750 кВ.
14. Схемы подстанций и их виды.

15. Собственные нужды станций и подстанций и их схемы.
16. Собственные нужды ГЭС.
17. Собственные нужды ТЭЦ.
18. Собственные нужды КЭС.
19. Собственные нужды подстанций.
20. Распределительные устройства, их схемы
21. Коммутационные аппараты: виды обозначения на схеме, назначение.
22. Заземление электрических станций и подстанций, электрических сетей.
23. Заземляющие устройства: назначение, применение.
24. Системы измерения.
25. Контроль, сигнализация и управление напряжением и частотой.
26. Резерв мощности.
27. Автоматизация процессов производства электроэнергии на электростанциях.
24. Ремонт электрооборудования.

### *Передача и распределение электроэнергии*

Система оценочных средств и технологий для проведения текущего контроля успеваемости по разделу дисциплины включает вопросы для блиц-опроса на лекциях, индивидуальные домашние задания, вопросы для коллоквиума, вопросы и задания для оценки деятельности студентов во время деловой игры.

Тематика вопросов блиц-опроса на лекциях совпадает с тематикой лекций.

Темы индивидуальных домашних заданий:

- определение параметров схем замещения линий электропередачи;
- определение параметров схем замещения силовых трансформаторов;
- определение приведенной и расчетной нагрузки узла;
- расчет режимов разомкнутых электрических сетей;
- расчет режимов кольцевых сетей;
- расчет режимов магистралей с двухсторонним питанием;
- выбор ответвлений РПН трансформаторов, автотрансформаторов, линейных регуляторов;
- расчет режимов сетей двух уровней номинального напряжения.

Коллоквиум по первому разделу дисциплины проводится на тему: «Общая характеристика ЭЭС, структурный анализ схем электрических сетей». Вопросы к коллоквиуму соответствуют вопросам к экзамену № 1 – 42.

Коллоквиум по второму разделу дисциплины проводится на тему: «Расчет и анализ установившихся режимов». Вопросы к коллоквиуму соответствуют вопросам к экзамену № 43 – 77.

Система оценочных средств и технологий для проведения экзамена включает контрольные вопросы и задания к экзамену.

#### Контрольные вопросы и задания к экзамену

Вопросы к экзамену

1. Понятия: энергетическая система, электроэнергетическая система, электрическая станция, электрическая сеть.
2. Общие сведения об электроэнергетических системах.
3. Классификация электрических сетей.
4. Стандартный ряд номинальных напряжений и наибольшие рабочие значения напряжений.
5. Преимущества объединённых энергосистем.
6. Линии электропередачи переменного и постоянного тока.

7. Дальние линии электропередачи переменного тока.
8. Дальние линии электропередачи постоянного тока.
9. Понижающие и преобразовательные подстанции. Характеристика оборудования подстанций.
10. Системообразующие сети, пример.
11. Питающие сети, пример.
12. Распределительные сети, пример.
13. Типы конфигураций электрических сетей.
14. Способы присоединения подстанций к электрической сети.
15. Схемы электрических соединений подстанций.
16. Конструктивные элементы ВЛЭП и их назначение.
17. Транспозиция проводов, и с какой целью она применяется.
18. Высота опоры, длина пролёта, стрела провеса.
19. Количество изоляторов в гирляндах на ВЛЭП различных номинальных напряжений.
20. Ориентировочные значения длин пролётов ВЛЭП разных классов номинальных напряжений.
21. Конструктивное исполнение проводов. Требования к материалу, из которого изготавливаются провода.
22. Марки проводов. Области применения проводов различных марок.
23. Марки грозозащитных тросов и области их применения.
24. Виды и типы опор. Их назначение.
25. Конструктивное исполнение деревянных опор, область их применения.
26. Конструктивное исполнение железобетонных опор, область их применения.
27. Конструктивное исполнение металлических опор, область их применения.
28. Унификация конструкций металлических и железобетонных опор. Шифры опор.
29. Расположение проводов на опоре.
30. Классификация линейных изоляторов, их конструктивное исполнение.
31. Виды линейной арматуры, её назначение.
32. Классификация кабелей.
33. Кабели напряжением до 1 кВ.
34. Кабели напряжением 3 – 10 кВ.
35. Кабели напряжением 20, 35 кВ.
36. Маслонаполненные кабели низкого давления.
37. Маслонаполненные кабели высокого давления.
38. Газоизолированные линии и газонаполненные кабели.
39. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.
40. Принцип формирования марок кабелей. Маркировка кабелей, примеры.
41. Кабельная арматура, её назначение.
42. Прокладка кабелей.
43. Схемы замещения ВЛЭП и их параметры.
44. Схемы замещения кабельных линий, их параметры.
45. Каталожные данные трансформаторов, основные понятия и определения.
46. Схема соединения обмоток автотрансформатора. Распределение токов при работе автотрансформатора в понижающем режиме.
47. Типовая и номинальная мощности автотрансформаторов.
48. Схема замещения двухобмоточного трансформатора и её параметры.
49. Схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой и её параметры.
50. Схема замещения трёхобмоточного трансформатора, её параметры.
51. Схема замещения автотрансформатора, её параметры.
52. Определение потерь мощности в двухобмоточном трансформаторе.

53. Определение потерь мощности в трёхобмоточном трансформаторе и автотрансформаторе.
54. Приведенная и расчётная нагрузка узла.
55. Падение и потеря напряжения.
56. Расчёт режима линий при заданном токе нагрузки по данным «конца».
57. Расчёт режима линий при заданном токе нагрузки по данным «начала».
58. Построение векторных диаграмм токов и напряжений при расчёте режима линии.
59. Расчёт режимов разомкнутых сетей по данным «конца».
60. Расчёт режимов разомкнутых сетей по данным «начала».
61. Построение векторных диаграмм токов и напряжений при расчёте режимов разомкнутых сетей.
62. Определение потоков мощности на головных участках в простых замкнутых сетях и в сетях с двухсторонним питанием.
63. Расчёт кольцевых сетей.
64. Понятие «точка потокораздела». Расчет простой замкнутой сети с двумя точками потокораздела?
65. Расчёт режимов сетей с двухсторонним питанием.
66. Определение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции с двухобмоточными трансформаторами.
67. Определение напряжения на сторонах среднего и низшего напряжений подстанции с трёхобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами.
68. Расчёт сетей с различными номинальными напряжениями.
69. Регулирование напряжения в электрической сети.
70. Выбор ответвлений РПН в двухобмоточных трансформаторах
71. Выбор ответвлений РПН в трехобмоточных трансформаторах
72. Выбор ответвлений РПН в автотрансформаторах.
73. Линейные регуляторы и область их применения. Выбор ответвлений линейных регуляторов.
74. Расчет режимов линий электропередачи и электрических сетей в послеаварийных режимах.
75. Особенности расчёта режимов в однородных электрических сетях.
76. Определение наибольшей потери напряжения.
77. Особенности расчёта режима сетей с равномерно распределённой нагрузкой.
78. Электрические нагрузки узлов электрических сетей.
79. Статические и динамические характеристики нагрузок, понятия и физическая сущность.
80. Статические характеристики осветительной нагрузки.
81. Статические характеристики асинхронных и синхронных двигателей.
82. Обобщённые статические нагрузки по напряжению и частоте комплексной нагрузки.
83. Задание нагрузки при расчётах режимов.
84. Представление генераторов при расчётах установившихся режимов.
85. Баланс активной мощности в энергосистеме и его связь с частотой.
86. Резерв мощности.
87. Качество электроэнергии.
88. Регулирование частоты вращения турбины
89. Регулирование частоты в электроэнергетической системе.
90. Потребление реактивной мощности
91. Выработка реактивной мощности на электростанциях.
92. Регулирующий эффект нагрузки.
93. Баланс реактивной мощности в энергосистеме и его связь с напряжением.
94. Регулирование напряжения в электроэнергетической системе.

Задания для экзамена сформированы в виде задач, включающих в себя составление схем замещения электрических сетей и определение их параметров, определение приведенной и расчетной мощностей нагрузки узлов электрической сети, расчет режимов разомкнутых и замкнутых сетей, сетей с двумя уровнями номинального напряжения, обеспечение желаемого уровня номинального напряжения на шинах подстанции с помощью РПН.

### *Изоляция*

Система оценочных средств и технологий для проведения текущего контроля успеваемости по разделу дисциплины включает в себя контролирующие тесты, задания для контрольных работ, вопросы и задания для оценки деятельности студентов по лабораторному практикуму.

Контролирующие тесты проводятся по темам соответствующих разделов. В каждом тестовом задании от 7 до 10 заданий. Тест выявляет теоретические знания, практические умения и аналитические способности студентов.

Контрольная работа выполняется в конце семестра по всем пройденным разделам семестра. В контрольной работе содержится четыре задачи. Контрольная работа направлена на проверку умений студентов применять полученные теоретические знания в отношении определенной конкретной задачи.

Система оценочных средств и технологий для проведения экзамена включает контрольные вопросы к экзамену.

#### Контрольные вопросы к экзамену

- 1 Электрофизические процессы в газах.
- 2 Движение заряженных частиц в газе.
- 3 Основные свойства термической плазмы.
- 4 Разновидности разрядов в газах.
- 5 Канальная форма разряда.
- 6 Коронный разряд.
- 7 Импульсная корона.
- 8 Ионизация и рекомбинация частиц в газах.
- 9 Лавина электронов и условие самостоятельности разряда.
- 10 Электропроводимость диэлектриков.
- 11 Поляризация диэлектриков. Диэлектрические потери.
- 12 Виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения.
- 13 Атмосферный воздух как диэлектрик.
- 14 Назначение изоляторов, их цели и конструкция.
- 15 Испытание внешней изоляции.
- 16 Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем.
- 17 Развитие разряда, начальные и пробивные напряжения промежутков с неоднородным электрическим полем.
- 18 Вольт-секундная характеристика воздушных промежутков. Время разряда.
- 19 Разряд в длинных воздушных промежутках.
- 20 Влияние конструкции изоляторов на напряжение перекрытия.
- 21 Развитие разряда и напряжение перекрытия изоляторов при неблагоприятных погодных условиях.
- 22 Учет атмосферных условий при определении разрядных и испытательных напряжений.

- 23 Регулирование электрических полей во внешней изоляции электроустановок.
- 24 Изоляция электрооборудования станций и подстанций, закрытых и открытых распределительных устройств.
- 25 Внутренняя изоляция: понятие и общие свойства.
- 26 Зависимость эл. прочности внутренней изоляции от длительности воздействия напряжения.
- 27 Самовосстанавливающаяся и не самовосстанавливающаяся изоляция. Влияние на неё механических тепловых и др. воздействий.
- 28 Пробой жидких диэлектриков.
- 29 Пробой твёрдых диэлектриков. Разряд по поверхности твердого диэлектрика.
- 30 Маслосольная изоляция.
- 31 Твёрдая изоляция.
- 32 Бумажно-масляная изоляция.
- 33 Газовая и вакуумная изоляция.
- 34 Элегазовая изоляция.
- 35 Градирование изоляции.
- 36 Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий.
- 37 Допустимые напряжения на внутренней изоляции, факторы, влияющие на кратковременную электрическую прочность внутренней изоляции.
- 38 Изоляция воздушных линий электропередачи.
- 39 Изоляция ВЛ на опорах.
- 40 Изоляционные расстояния в пролетах ВЛ.
- 41 Выбор линейной изоляции.
- 42 Изоляционные конструкции ОРУ.
- 43 Изоляционные промежутки в ОРУ.
- 44 Выбор наружной изоляции РУ подстанции.
- 45 Изоляционные конструкции с газовой изоляцией.
- 46 Молниезащита воздушных линий.
- 47 Экологические аспекты электроустановок высокого напряжения.
- 48 Экологическое влияние ВЛ и РУ.
- 49 Основные конструкции кабелей высокого напряжения.
- 50 Кабельные муфты. Испытание изоляции кабелей.
- 51 Классификация и особенности изоляции силовых трансформаторов. Конструкция изоляции трансформаторов.
- 52 Испытания изоляции трансформаторов.
- 53 Изоляция ТТ.
- 54 Изоляция масляных и воздушных выключателей.
- 55 Изоляция вакуумных выключателей.
- 56 Изоляция элегазовых выключателей.
- 57 Изоляция герметизированных РУ, КРУЭ.
- 58 Изоляция вводов ВН.
- 59 Изоляция силовых конденсаторов.
- 60 Изоляция электрических машин высокого напряжения.
- 61 Молниезащита оборудования станций и подстанций.
- 62 Защита изоляции электрооборудования от внутренних перенапряжений.

### ***Качество электроэнергии***

Система оценочных средств и технологий для проведения текущего контроля успеваемости по разделу дисциплины включает вопросы для блиц-опроса на лекциях, индивидуальные домашние задания, задания для контрольных работ, вопросы и задания для оценки деятельности студентов во время деловой игры.

Тематика вопросов блиц-опроса на лекциях совпадает с тематикой лекций.

Темы индивидуальных домашних заданий:

расчет электрической нагрузки объекта электроснабжения и построение его схемы электроснабжения;

оценка соответствия качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109 – 97 и определение виновников его ухудшения;

расчет показателей качества электроэнергии, характеризующих отклонения и колебания напряжения;

расчет несинусоидальности и несимметрии напряжения;

регулирование напряжения, обеспечение встречного регулирования в электрических сетях;

выбор технических средств и их параметров для снижения несинусоидальности напряжения;

выбор технических средств и их параметров для снижения несимметрии и колебаний напряжения.

Темы контрольных работ:

раздел 3 – расчет показателей качества электроэнергии в системах электроэнергетики;

раздел 4 – выбор схемных решений и параметров технических средств, улучшающих качество электроэнергии в системах электроснабжения.

Коллоквиум проводится в виде творческого задания, формируемого по электрическим схемам систем электроснабжения, по первым двум разделам дисциплины на тему: «Нормирование и контроль качества электроэнергии и определение его показателей в электрических сетях». Вопросы для подготовки к коллоквиуму соответствуют вопросам к экзамену № 3 – 28, 42 – 64.

Система оценочных средств и технологий для проведения экзамена включает контрольные вопросы и задания к экзамену.

#### Контрольные вопросы и задания к экзамену

Вопросы к экзамену:

1. Структура и параметры, режимы систем электроснабжения.
2. Технические, социально-экономические и экологические требования, предъявляемые к системам электроснабжения.
3. Характеристика систем электроснабжения промышленных предприятий, их особенности.
4. Характеристика систем электроснабжения городов, их особенности.
5. Особенности систем электроснабжения объектов сельского хозяйства и транспортных систем.
6. Типы электроприемников и режимы их работы.
7. Классификация и область применения методов расчета электрических нагрузок.
8. Представление электрической нагрузки случайным процессом.
9. Методы расчета электрических нагрузок.
10. Сравнительный анализ практических методов определения расчетной нагрузки систем электроснабжения городов и промышленных предприятий.
11. Определение расчетной нагрузки элементов систем электроснабжения на различных ее уровнях.
12. Особенности расчета нагрузки промышленных предприятий.
13. Расчет нагрузок специфических электроприемников.
14. Расчет электрических нагрузок городов.
15. Расчетные электрические нагрузки сельских потребителей.

16. Принципы построения схем электроснабжения. Требования к ним.
17. Методы достижения заданного уровня надежности оборудования, систем электроснабжения.
18. Источники питания. Типы энергоустановок.
19. Методы достижения заданного уровня надежности оборудования, систем электроснабжения.
20. Влияние категории надежности электроснабжения электроприемников и допустимых систематических и послеаварийных перегрузок оборудования на построение системы электроснабжения.
21. Способы подключения систем электроснабжения к сетям сетевых компаний.
22. Характерные схемы электроснабжения предприятий.
23. Характерные схемы электроснабжения городов.
24. Особенности систем электроснабжения городов, промышленных предприятий, объектов сельского хозяйства и транспортных систем.
25. Условия выбора параметров основного оборудования в системах электроснабжения различного назначения.
26. Экономика электроснабжения.
27. Экономические и технические критерии выбора параметров основного электрооборудования систем электроснабжения.
28. Условия выбора параметров основного оборудования в системах электроснабжения различного назначения.
29. Режимы нейтрали.
30. Накопители энергии.
31. Ресурсосберегающие технологии.
32. Повреждения и ненормальные режимы в системах электроэнергетики.
33. Типы автоматических устройств релейной защиты и их функции.
34. Защита синхронных генераторов.
35. Защита трансформаторов и блоков генератор-трансформатор.
36. Защита сборных шин станций и подстанций.
37. Автоматическое включение резервного питания.
38. Автоматическое включение синхронных генераторов на параллельную работу.
39. Автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности, частоты и активной мощности.
40. Противоаварийная автоматика.
41. Автоматический контроль и телемеханика в энергосистемах.
42. Понятие качества электроэнергии. Сущность проблемы качества электроснабжения.
43. Стандартизация в области качества электроэнергии.
44. Основные определения качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97.
45. Нормативные показатели качества электроэнергии.
46. Нормирование отклонений и колебаний напряжения.
47. Нормирование несинусоидальности и несимметрии напряжения.
48. Нормирование электромагнитных помех.
49. Вспомогательные параметры качества электроэнергии.
50. Правовое и методическое обеспечение проблемы качества электроэнергии.
51. Влияние отклонений напряжения на работу электрических сетей и электроприемников, технологических процессов.
52. Влияние колебаний напряжения на работу силовых элементов и автоматических устройств, технологических установок.
53. Влияние несинусоидальности напряжения на работу электрических сетей, электроприемников, технологических устройств.

54. Влияние несимметрии напряжения на работу электрических сетей, электроприемников, технологических устройств.
55. Влияние электромагнитных помех на объекты систем электроэнергетики.
56. Источники искажения качества электроэнергии и их характеристика.
57. Технические, социально-экономические и экологические требования, предъявляемые к системам электроснабжения, по качеству электроэнергии.
58. Определение ущербов от некачественной электроэнергии.
59. Контроль качества электроэнергии.
60. Выбор пунктов контроля КЭ и контролируемых ПКЭ.
61. Средства и системы контроля КЭ.
62. Обработка результатов измерения ПКЭ. погрешности оценки значений ПКЭ.
63. Оценка соответствия качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97.
64. Определение виновников ухудшения качества электроэнергии и неустоек за искажение качества электроэнергии.
65. Расчет отклонений напряжения.
66. Расчет колебаний напряжения в сетях с ДСП.
67. Расчет колебаний напряжения в сетях со сварочной нагрузкой.
68. Расчет колебаний напряжения в сетях с прокатными станами.
69. Расчет колебаний напряжения в сетях с тягой переменного тока.
70. Определение дозы фликера.
71. Метод определения несинусоидальности напряжения.
72. Высшие гармоники, генерируемые различными источниками искажения качества электроэнергии. Эквивалентирование токов высших гармоник.
73. Оценка сопротивлений элементов току высших гармоник.
74. Определение коэффициентов искажения синусоидальности напряжения и n-ой гармонической составляющей напряжения в различных токах сети. Резонансные явления.
75. Метод определения несимметрии напряжения по обратной последовательности.
76. Расчет тока обратной последовательности при однофазной и двухфазной несимметрии.
77. Определение сопротивлений обратной последовательности элементов сети.
78. Определение коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности в различных точках сети.
79. Средства улучшения отклонений напряжения и их характеристика.
80. Встречное регулирование. Построение закона регулирования напряжения.
81. Централизованное регулирование напряжения.
82. Местное регулирование напряжения и алгоритмы определения добавок напряжения.
83. Схемные решения по снижению несинусоидальности напряжения.
84. Технические средства для снижения несинусоидальности напряжения. Их схемы.
85. Выбор силовых резонансных фильтров.
86. Выбор фильтросимметрирующих устройств.
87. Выбор ненастроенных фильтров.
88. Активные и гибридные фильтры, комбинированные фильтры высших гармоник
89. Схемные решения по снижению несимметрии в сети.
90. Виды симметрирующих устройств и их анализ.
91. Выбор параметров симметрирующих устройств.
92. Схемные решения по снижению колебаний напряжения.
93. Технические средства по снижению колебаний напряжения и их выбор.

Задания для экзамена сформированы в виде задач, включающих в себя разработку схем электроснабжения и выбор их параметров, расчет показателей качества

электроэнергии, организация контроля качества электроэнергии, выбор схемных решений и технических средств, улучшающих качество электроэнергии.

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА»**

### *Производство электроэнергии*

а) основная литература:

1. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций : учеб.: рек. Мин. обр. РФ / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. -2-е изд., стер.. -М.: Академия, 2005,2009 -448 с.
2. Балаков Ю.Н. Проектирование схем электроустановок : учеб. пособие: доп. УМО/ Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. -М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2004. -288 с.:а-рис.
3. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения. Учебное пособие.-М: ФОРУМ ИНФРА.- М: 2006-480с.
4. Тепловые и атомные электрические станции [Текст] : учеб. / Л. С. Стерман, В. М. Лавыгин, С. Г. Тишин. - 5-е изд., стер. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2010. - 464 с.
5. Энергетика в современном мире [Текст] / В. Е. Фортвов, О. С. Попель. - Долгопрудный : Интеллект, 2011. - 168 с.

б) дополнительная литература:

1. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии : учеб. пособие : доп. УМО/ А. А. Бурмистров [и др.] ; под ред. В. И. Виссарионова. - 2-е изд., стер.. - М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2009. - 144 с.
2. Солнечная энергетика [Текст] : учеб. пособие / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова. - 2-е изд., стер. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2011. - 276 с.
3. Производство электрической энергии : учеб.-метод. пособие/ А. Г. Ротачева, Я. В. Кривохижа; АмГУ, Эн.ф.. -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009. -184 с.
4. Электрическая часть гидроэлектростанций : учеб. пособие/ В. А. Старшинов, А. И. Пойдо, М. В. Пираторов. -М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2003. -160 с.
5. Электроэнергетика. Производство электроэнергии : учеб.-метод. комплекс для спец. 140204 - "Электрические станции"/ АмГУ, Эн.ф.; сост. А. Г. Ротачева. - Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012.
6. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы [Текст]: учеб. пособие / А. В., да Роза ; пер. с англ., ред. С. П. Малышенко, пер. с англ., ред. О. С. Попель. - М. : Интеллект : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2010. - 704 с.
7. Электротехнический справочник. Том 3, книга 1. М: Энергоатомиздат. 2002г., 878 с.
8. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию предприятий и общественных зданий [Текст] / ред. С. И. Гамазин, Б. И. Кудрин, С. А. Цырук. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2010.
9. Электротехнический справочник [Текст] : в 4 т. / Под общ.ред. В.Г. Герасимов, Под общ. ред. А.Ф. Дьяков, Под общ. ред. Н.Ф. Ильинский, Гл. ред. А.И. Попов. - 8-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2002, 2004 Т. 3 : Производство, передача и распределение электрической энергии : справочное издание. – 2002, 2004. - 964 с. : рис., табл. - Библиогр. в конце разд.- Предм. указ.: с. 961-963.

в) периодические издания (журналы):

1. «Энергетик»;
2. «Промышленная энергетика»;
3. «Электрика»;
4. «Вестник МЭИ»;
5. «Электротехника»;

6. «Электротехника». Реферативный журнал;
  7. «Электричество»;
  8. «Электрические станции»;
  9. «Энергохозяйство за рубежом»;
  10. «Энергетика». Реферативный журнал;
  11. «Electrical Power and Energy Systems»;
  12. «IEEE Transactions. Power systems».
- г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://www.iqlib.ru/">http://www.iqlib.ru/</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знаний.

### *Передача и распределение электроэнергии*

а) основная литература:

1. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие: рек. Мин. обр. РФ/ А. А. Герасименко , В. Т. Федин. -Ростов н/Д: Феникс; Красноярск: Издат. проекты, 2006. -719 с.
2. Лыкин А.В. Электрические системы и сети : учеб.пособие / А.В.Лыкин . - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. - 247 с.
3. Основы современной энергетики в 2 т. : Учеб. : рек. Мин. обр. РФ :Т 2. Современная электроэнергетика/ под ред. Е.В. Аметистова. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010. – 632 с.

б) дополнительная литература:

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети : учеб./ В. И. Идельчик. -М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.
2. Электрические системы. Электрические сети. : Учеб. для электроэнерг. спец. вузов/ ред. В. А. Веников. -2-е изд., прераб. и доп.. -М.: Высш. шк., 1998. -512 с.
3. Электроэнергетика. Передача и распределение электроэнергии : учеб.-метод. комплекс для спец. 40203, 140204, 140205, 140211/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина . - Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -236 с.
4. Кужеков С.Л. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию/ С. Л. Кужеков, С. В. Гончаров. -3-е изд.. -Ростов н/Д: Феникс, 2009. -493 с.
5. Алиев И.И. Электротехника и электрооборудование : справ./ И. И. Алиев. -М.: Высш. шк., 2010. -1199 с.
6. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэн. спец. вузов : Учеб. пособие/ Под ред. В.М. Блок. - М.: Высш. шк., 1990. - 383 с.
7. Электротехнический справочник : В 4 т./ Под общ. ред. В.Г. Герасимов, Под общ. ред. А.Ф. Дьяков, Под общ. ред. Н.Ф. Ильинский, Гл. ред. А.И. Попов Т. 3 : Производство, передача и распределение электрической энергии : справочное издание. -2002. -964 с.
8. Савина Н.В. Электрические сети в примерах и расчетах: учеб. пособие/ Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.Н. Дудченко – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 1999. - 238 с.
9. Зуев Э.Н. Основы техники подземной передачи электроэнергии : учеб. пособие/ Э.Н. Зуев - М.: «Энергоатомиздат» Москва, 1999. – 256с.
10. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электрических станций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования/ Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 608 с.

в) периодические издания (журналы):

1. Электричество;
2. Известия РАН. Энергетика;
3. Электрические станции;
4. Вестник МЭИ;
5. Промышленная энергетика;
6. Энергетика. Сводный том;
7. IEEE Transaction on Power Systems;
8. Энергосбережение;
9. Энергохозяйство за рубежом;
10. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://www.iqlib.ru">http://www.iqlib.ru</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания
2	Консультант +	Справочно-правовая система. Содержит законодательную базу, нормативно-правовое обеспечение, статьи.
3	<a href="http://www.twirpx.com/files/tek/">http://www.twirpx.com/files/tek/</a>	Twirpx.com - это служба, обеспечивающая с помощью веб-интерфейса, расположенного только по адресу <a href="http://www.twirpx.com">http://www.twirpx.com</a> , и специализированного аппаратно-программного обеспечения хранение, накопление, передачу и обработку материалов Пользователей, представленной в электронном виде в публичный доступ. Интернет-библиотека, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания

На практических занятиях и в самостоятельной работе студентов используется система компьютерной математики Mathcad и программный комплекс VISIO.

### *Изоляция*

а) основная литература:

1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / 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. Куффель, Е. Техника и электрофизика высоких напряжений [Текст]: учеб.-справ. Рук. / Е. Куффель, В. Цаенгль, Дж. Куффель.- Долгопрудный: Интеллект, 2011.-520 с.

б) дополнительная литература:

1. Электроэнергетика. Изоляция : учеб.-метод. комплекс для спец. 140204, 140205, 140211, 140203/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина , В. В. Соловьев. -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -1 о=эл. опт. диск (CD-ROM)
2. Электроэнергетика. Изоляция : учеб.-метод. комплекс для спец. 140204, 140205, 140211, 140203/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина, В. В. Соловьев . -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -100 с.

3. Электрические аппараты высокого напряжения : учеб. пособие: доп. Гос. ком. СССР по нар. обр. / под ред. Г. Н. Александрова. - Л. : Энергоатомиздат, 1989. - 344 с. : рис., табл. - Библиогр.: с. 336
4. Савина Н.В, Соловьев В.В, Кривохижа Я.В, Тоушкин А.Г, Лупешко Ю.М Изоляция и перенапряжения. Лабораторный практикум: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007.

в) периодические издания (журналы):

1. Электричество;
2. Электрические станции
3. Известия РАН. Энергетика;
4. Вестник ИГЭУ;
5. Вестник МЭИ;
6. Промышленная энергетика;
7. Энергетика. Сводный том;
8. Электрика
9. IEEE Transaction on Power Systems;
10. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://www.biblio@amursu.ru/">http://www.biblio@amursu.ru/</a>	Электронный ресурс библиотеки АмГУ
2	<a href="http://www.iqlib.ru/">http://www.iqlib.ru/</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знаний.

### *Качество электроэнергии*

а) основная литература:

1. Кудрин, Б. И. Системы электроснабжения [Текст] : учеб. пособие / Б. И. Кудрин. - М. : Академия, 2011. - 352 с. - (Высшее проф. образование. Энергетика).
2. Савина Н. В. Качество электрической энергии в системах энергоснабжения [Текст] : учеб. пособие / Н. В. Савина – Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2007. - 168 с.
3. Управление качеством электроэнергии [Текст] : учеб. пособие : рек. УМО / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов ; под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Изд-ий дом МЭИ, 2008. - 355 с.

б) дополнительная литература:

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 2010. - 375 с.
2. Суднова В.В. Качество электрической энергии [Текст] / В.В. Суднова – М.: Энергосервис, 2000. – 86 с.
3. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [Текст] / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. – М.: Энергоатомиздат. 2000. – 252 с. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/>
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / В. С. Иванов, В. И. Соколов. - М.: Энергоатомиздат. 1987. – 337 с.

5. Электроэнергетика. Качество электроэнергии : учеб.-метод. комплекс для спец. 140211/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина. - Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -129 с.
6. Мясоедов Ю.В. Повышение качества электроэнергии и компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения : [моногр.]/ Ю. В. Мясоедов; АмГУ, Эн.ф.. -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2007. -212 с.
7. Электротехнический справочник [Текст] : В 4 т. / Под общ. ред. В.Г. Герасимов, Под общ. ред. А.Ф. Дьяков, Под общ. ред. Н.Ф. Ильинский, Гл. ред. А.И. Попов. Т. 3 : Производство, передача и распределение электрической энергии : справочное издание. – М.: Изд-ий дом МЭИ. - 2002. - 964 с.
8. Савина Н.В. Применение теории вероятностей и методов оптимизации в системах электроснабжения : [Текст]/ Н.В. Савина.– Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2007. – 271 с.
9. Управление качеством [Текст] : учеб.: рек. Мин. обр. РФ / О. В. Аристов. - М. : Инфра-М, 2007, 2009, 2010. - 240 с.
10. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию предприятий и общественных зданий [Текст] / ред. С. И. Гамазин, Б. И. Кудрин, С. А. Цырук. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010. – 745 с.

в) периодические издания (журналы):

11. Электричество;
12. Известия РАН. Энергетика;
13. Электрические станции;
14. Энергетик;
15. Вестник МЭИ;
16. Промышленная энергетика;
17. Энергетика. Сводный том;
18. Вестник ИГЭУ;
19. IEEE Transaction on Power Systems;
20. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://www.iqlib.ru">http://www.iqlib.ru</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания
2	Консультант +	Справочно-правовая система. Содержит законодательную базу, нормативно-правовое обеспечение, статьи.
3	<a href="http://www.gostedu.ru">http://www.gostedu.ru</a>	ГоСТы, СНиПы и др. образовательные ресурсы
4	<a href="http://www.twirpx.com/files/tek/">http://www.twirpx.com/files/tek/</a>	Twirpx.com - это служба, обеспечивающая с помощью веб-интерфейса, расположенного только по адресу <a href="http://www.twirpx.com">http://www.twirpx.com</a> , и специализированного аппаратно-программного обеспечения хранение, накопление, передачу и обработку материалов Пользователей, представленной в электронном виде в публичный доступ. Интернет-библиотека, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания

На практических занятиях и в самостоятельной работе студентов используется система компьютерной математики Mathcad и программный комплекс VISIO.

## 10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

В качестве материально-технического обеспечения дисциплины используются мультимедийные средства, интерактивная доска. Материал лекций представлен в виде презентаций в Power Point. Для компьютерных симуляций используются электрические схемы энергетических компаний Дальнего Востока, однолинейные электрические схемы электрических станций и подстанций, расположенных на Дальнем Востоке, электрические схемы промышленных предприятий, городов, однолинейные электрические схемы промышленных электрических станций и подстанций.

Для проведения практических занятий и в самостоятельной работе студентов используются схемы открытых и закрытых распределительных устройств и собственных нужд электрических станций и подстанций.

Лабораторные работы проводятся в специализированных аудиториях. Основное оборудование, используемое при проведении лабораторных работ, представлено в таблице.

№ п/п	Наименование лабораторий, ауд.	Основное оборудование
1	Ауд. 207 - Зал высоковольтного оборудования	Стенды с изоляционными конструкциями: подвесные изоляторы, опорные изоляторы, проходные изоляторы
2	Ауд.107 – Зал высоких напряжений	Аппарат АИИ-70, аппарат АИД – 70, макет гирлянды изоляторов, гирлянда подвесных тарельчатых изоляторов, штанга измерительная ШИП - 220, маслonaполненный ввод ГТТБ-60-110/800, ввод масляного выключателя МВ – 35, мост переменного тока Р 5026, конденсатор Р 5023, измерительный трансформатор НОМ –10 кВ, ЛАТР

## 11. РЕЙТИНГОВАЯ ОЦЕНКА ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Рейтинговая оценка деятельности студентов осуществляется в соответствии с технологической картой дисциплины о рейтинговой системе обучения, принятой на заседании кафедры энергетики.

Текущий контроль качества освоения отдельных тем и разделов дисциплины осуществляется на основе рейтинговой системы. Этот контроль проводится ежемесячно в течение семестра и качество усвоения материала (выполнения задания) оценивается в баллах, в соответствии с рейтинг планом дисциплины.

Промежуточная аттестация (экзамен или зачет) проводится в конце семестра и оценивается по 5-ти балльной системе. Допуск к экзамену или зачету осуществляется по итоговому рейтингу текущего контроля, который определяется суммированием баллов по всем видам текущего контроля.

Для раздела дисциплины «Производство электроэнергии» максимальный балл составляет 100, в том числе: индивидуальные домашние задания – 80, другие виды текущего контроля – 20 баллов. Допуск к экзамену соответствует 56...100 баллам.

Для раздела дисциплины «Передача и распределение электроэнергии» максимальный балл составляет 100, в том числе: индивидуальные домашние задания – 60, коллоквиумы – 30, другие виды текущего контроля – 10 баллов. Допуск к экзамену соответствует 56...100 баллам.

Для раздела дисциплины «Изоляция» максимальный балл составляет 100, в том числе: выполнение и защита лабораторных работ – 70, контролирующие тесты – 20, другие виды текущего контроля – 10 баллов. Допуск к экзамену соответствует 56...100 баллам.

Для раздела дисциплины «Качество электроэнергии» максимальный балл составляет 100, в том числе: индивидуальные домашние задания – 80, другие виды текущего контроля – 20 баллов. Допуск к экзамену соответствует 56...100 баллам.

## 2. Краткий конспект лекций

### Тема 1. Введение. Основные понятия и определения.

ТВН – это наука о характеристиках вещества и процессах происходящих в нем при экстремальных электромагнитных воздействиях (высоких напряжений и сильных токах), а также о технологическом использовании этих процессов. В развитии электроэнергетики важное место занимает применение ВН при передаче электроэнергии на большие расстояния. Учитывая возросшую мощность ТЭЦ, ГРЭС, ГЭС и АЭС, а также большую протяженность электрических сетей необходимо повышать надежность передачи электроэнергии. Например при передаче электроэнергии по линии напряжением 35кВ можно передать мощность 8-10 МВт на расстояние 30-40 км, для передачи 200-250 МВт на расстояние 200-250 км потребуется линия 220 кВ. Благодаря тому, что пропускная способность пропорциональна квадрату напряжения, а стоимость линий пропорциональна повышению напряжения, то это приводит снижению стоимости одного кВт/час. Повышение напряжения требует более высокой электрической прочности изоляции электрооборудования.

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).

Под влиянием больших напряжений электрического поля, которые могут возникать в процессе эксплуатации, возможна частичная или полная потеря изоляцией ее диэлектрических свойств – пробой изоляции.

В эксплуатации изоляция подвергается воздействию не только рабочего напряжения но и перенапряжений, возникающих в результате грозовых поражений воздушных линий электропередачи (атмосферные перенапряжения) и при изменениях режимов работы электроустановок (внутренние перенапряжения). Перенапряжения связаны с появлением в электроустановках потенциалов и разностей потенциалов, значительно превышающих их номинальные значения. Перенапряжение - всякое повышение напряжения в электрической сети больше максимального рабочего  $U_{p.макс} = U_n + (0,2 \div 0,05) U_n$  в зависимости от класса напряжения.

При перенапряжениях создаются тяжелые условия для работы изоляции, т.к. они могут во много раз превышать  $U_{p.макс}$ . Перенапряжения подразделяются на:

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

На схеме приведена классификация перенапряжений. Необходимо знать следующие характеристики перенапряжений

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

$$K_{\gamma} = \frac{U_{i\alpha\epsilon\eta}}{U_{\delta.i\alpha\epsilon\eta}}$$

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 ( $U < 220$  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.

## Тема 2. Общая характеристика внешней изоляции

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). 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  $U_{пр}$  и длительное  $U_{раб}$  - На изоляцию воздействуют грозовые и коммутационные импульсы, испытательные напряжения, а  $U_{раб}$  должно воздействовать длительное время (20-30 лет) без пробоев.

При длительном воздействии  $U_{раб}$  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.

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

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.

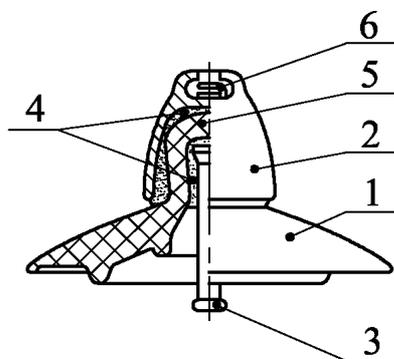


Рис. 2.1. Подвесной шарнирный изолятор с конусной головкой: 1 — тарелка изолятора; 2 — чугунная шапка; 3 — стальной стержень; 4 — цементная замазка; 5 — головка изолятора; б — замок

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, грязестойкий. 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 ПOkВ. 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 ПOkВ, минимальная разрушающая нагрузка 2,25 тонн-сила.

Опорные изоляторы предназначены для крепления шинпроводов, 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 чугунами 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 маслостойкой изоляцией (до 150 кВ) или с бумажно-масляной 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.

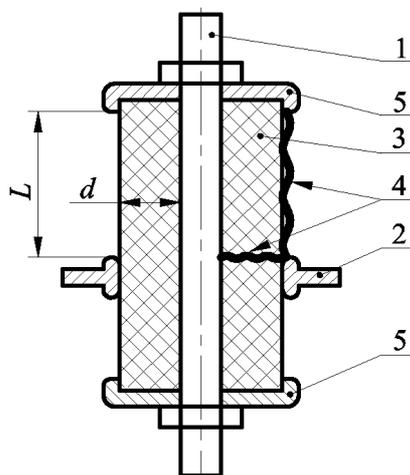


Рис. 2.2. Конструктивная схема проходного изолятора: 1 — ток-ведущий стержень (труба); 2 — заземленный фланец; 3 — твердая изоляция; 4 — пути пробы ( $U_{пр} > U_{пер}$ ); 5 — высоковольтные фланцы

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,  $U_n = 10$  кВ,  $I_n = 400$  А,  $P_{изг} = 750$  кГс.

### Тема 3. Разряды в воздушных промежутках

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  $E_{\max}$  к средней напряженности  $E_{cp}$  между электродами, т. е.

$$K_f = \frac{\dot{A}_{\dot{a}e\dot{n}}}{\dot{A}_{\dot{n}d}}$$

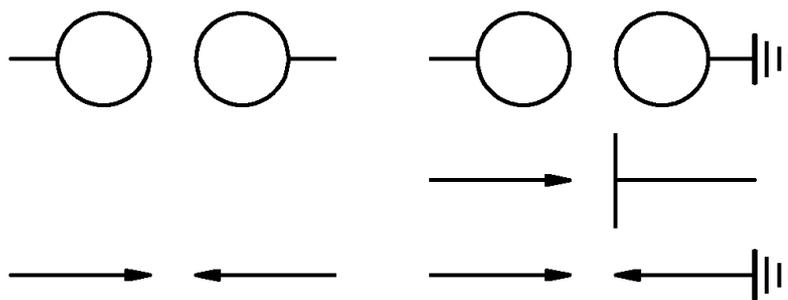


Рис. 1.1. Формы электрических полей: а — симметричная система электродов; б — несимметричная система электродов

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

$$\dot{A}_{\dot{n}d} = \frac{U}{S}$$

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

$$\dot{A}_{\dot{n}d} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (13)$$

а средняя напряженность

$$\dot{A}_{\dot{n}d} = \frac{U}{R - r} \quad (1-4)$$

где

$U$  — приложенное напряжение, кВ;

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

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

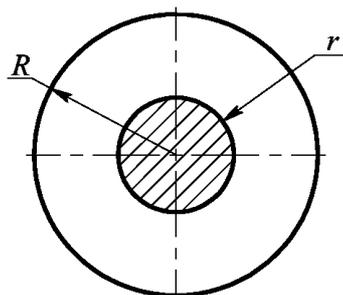


Рис. 1.2. Схема коаксиальных электродов

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

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

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

Для однородного поля коэффициент неоднородности  $K_H = 1$ , для слабонеоднородного —  $K_H < 3$ , 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.

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 ( $N_{\Sigma} \sim 10^{22}$  атомов на см<sup>3</sup>).

Газ, в котором значительная часть атомов и молекул ионизирована, называется плазмой ( $n_{\text{ион}} > 10^{12}$ - $10^{14}$  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.

Различают поверхностную и объемную ионизацию. Объемная ионизация – образование заряженных частиц в объеме газа между электродами. Поверхностная ионизация – излучение (эмисия) частиц с поверхности электрода.

Объемная ионизация разделяется на:

1. ударная ионизация
2. ступенчатая ионизация
3. фотоионизация
4. термоионизация

Ударная ионизация – соударение электрона с нейтральным атомом или молекулой.

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:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} \geq W_E$$

где

$m_1$  — масса электрона;

$V_1$  — скорость электрона;

$W_{\dot{E}}$  — 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:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_1 V_3^2}{2} \geq W_{\dot{E}}$$

где

$m_1$  — масса электрона;

$V_1, V_3$  — скорости электронов;

$W_{\dot{E}}$  — 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

$$h\nu \geq W_{\dot{E}}$$

$h$  — постоянная Планка,

$\nu$  — собственная частота фотона.

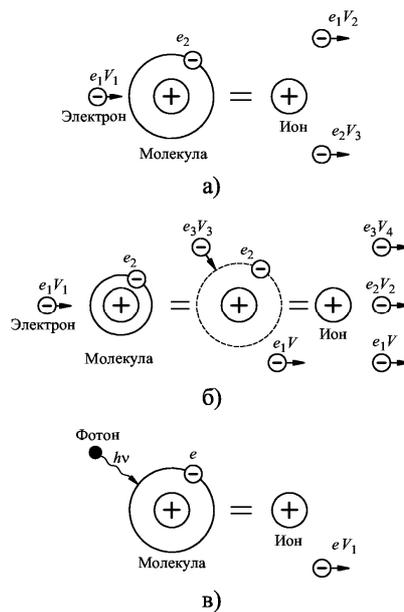


Рис. 1.3. Схемы объемной ионизации газа: а) ударная ионизация, б) ступенчатая ионизация, в) фотоионизация;  $e$  — элементарный заряд электрона ( $e=1,6 \cdot 10^{19}$  Кл),  $m$  — масса заряженной частицы

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:

$$\frac{m_{\text{и}} V_{\text{и}}^2}{2} \geq W_{\text{аио}}$$

где

$m_{\text{и}}$  — масса иона;

$V_{\text{и}}$  — скорость иона;

$W_{\text{аио}}$  — 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:

$$h\nu \geq W_{\text{э}}$$

где

$h$  — постоянная Планка;

$\nu$  — частота излучения фотона;

$W_{\text{э}}$  — 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  $W_{\text{аио}}$ . Энергия  $W_{\text{аио}}$  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  $W_{\text{аио}} = 4,5$  эВ.

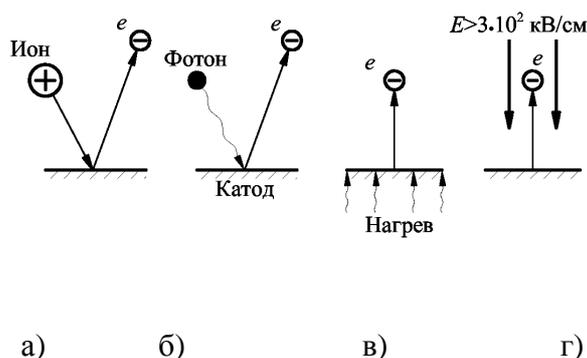


Рис. 1.4. Схемы поверхностной ионизации: а) ионизация ионом, б) ионизация квантом света, в) термоионизация, г) автоэлектронная ионизация

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  $a$ , равным числу ионизации 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.

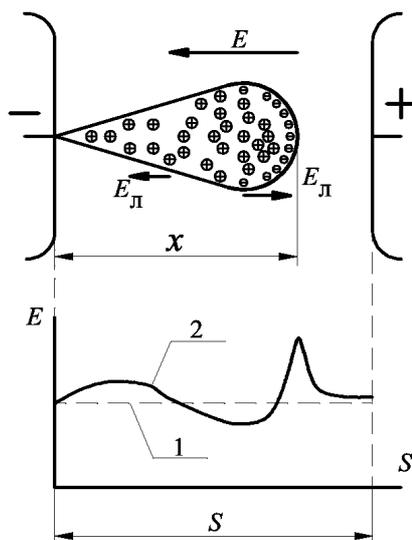


Рис. 1.5. Искажение электрического поля в промежутке, создаваемое лавиной: 1 — средняя напряженность без лавины; 2 — результирующая напряженность

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:

$$dn = n \cdot a \cdot dx, \quad (1-11)$$

или

$$\frac{dn}{n} = a dx \quad (1.12)$$

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

$$\int_0^n \frac{dn}{n} = \int_0^x a dx \quad (1.13)$$

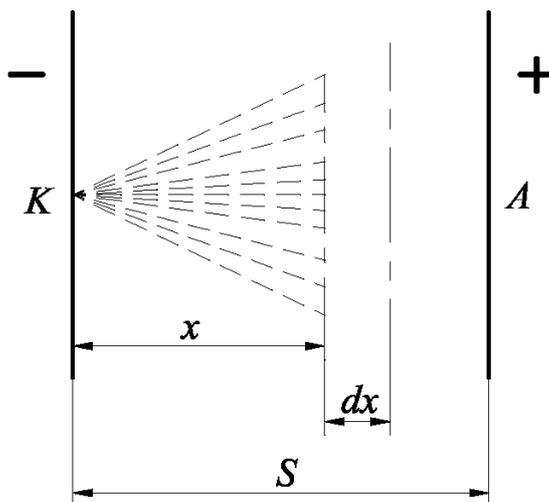


Рис. 1.6. Схема определения числа электронов в лавине

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

$$\ln n = a \cdot x \quad (1.14)$$

или

$$n = e^{ax}. \quad (1.14a)$$

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:

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

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

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

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

#### 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, образуемые наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к

фотоэмиссии электронов из катода. Образующиеся таким образом вторичные электроны приводят снова к образованию лавин в разрядном промежутке.

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  $\gamma \ll 1$ .

$$\gamma(e^{(a-\eta)S} - 1) \geq 1$$

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

### 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 (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  $n_{кр} \gg 10^7 - 10^9$  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.

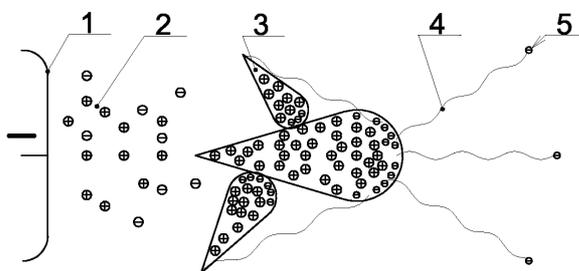


Рис. 1.7. Механизм развития катодного стримера: 1 — электрод-катод, 2 — канал стримера, 3 — лавины, 4 — движение фотонов, 5 — электрон за счет фотоионизации

### Закон Пашена

Выполнение условия самостоятельности разряда (1.18) в однородном поле означает пробой всего промежутка, приняв  $\eta = 0$ . Поскольку нас интересует напряжение, при котором произойдет пробой, приравняем  $U = U_{пр}$ . Тогда из:

$$U_{\text{пр}} = \frac{B_0 PS}{\ln \frac{A_0 PS}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}$$

Из (1.26) видно, что при неизменной температуре разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления  $P$  на расстояние между электродами  $S$ . Эту закономерность впервые экспериментально обнаружил Пашен. И выражение (1.26) называется законом Пашена. Графически эта закономерность представлена на рис. 1.8.

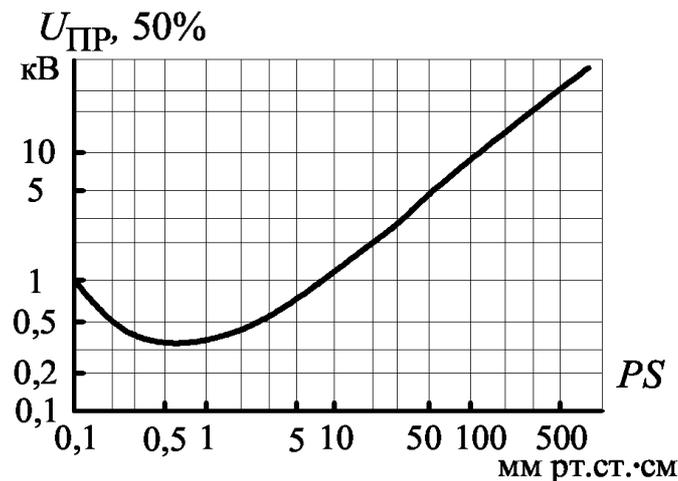


Рис. 1.8. Графическое отображение закона Пашена для воздуха

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.

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.

#### 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  $K_H$  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.

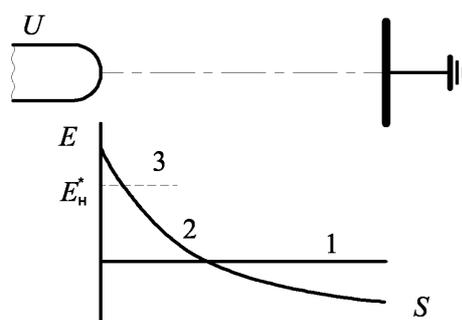


Рис. 1.9. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами типа стержень-плоскость: 1 —  $E_{cp} = f(S)$ ; 2 —  $E_{макс} = f(S)$ , 3 —  $E_H^*$  — напряженность возникновения самостоятельной формы разряда

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 резконеодном поле в зависимости от величины напряжения стример, пройдя некоторое расстояние, может остановиться. При этом плазма его распадается, 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.

### 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 сильнонеравномерном 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.

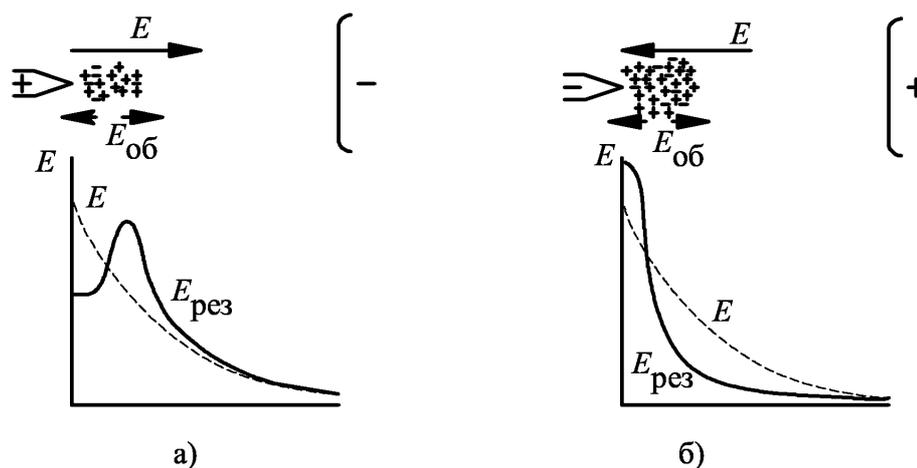


Рис. 1.10. Образование анодного а) и катодного б) стримера:  $E$  — напряженность внешнего поля;  $E_{об}$  — напряженность поля объемного положительного заряда;  $E_{рез}$  — результирующая напряженность в промежутке после ионизации

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, благодаря 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.

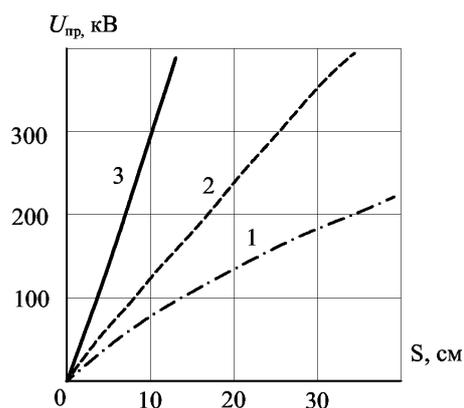


Рис. 1.11. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами стержень-плоскость на импульсном напряжении: 1 — положительная полярность острия; 2 — отрицательная полярность острия; 3 — однородное поле

### Барьерный эффект

Существенное влияние объемного заряда на развитие разряда в промежутке с резконечным 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 положительным 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.

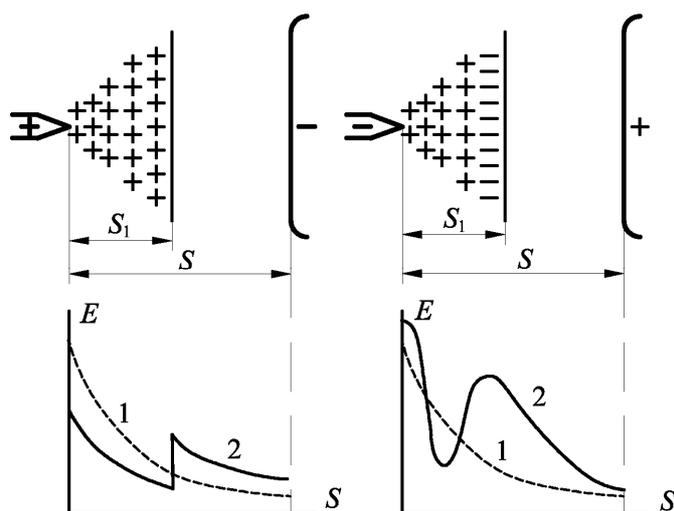


Рис. 1.12. Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера: а) — положительная полярность стержня; б) — отрицательная полярность стержня; 1 — распределение напряженности поля без барьера; 2 — распределение напряженности поля с барьером

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

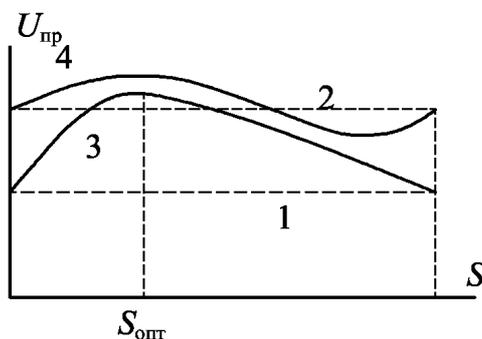


Рис. 1.13. Влияние барьера на пробивное напряжение газового промежутка при положительной (1, 3) и отрицательной (2, 4) полярностях напряжения: 1, 2 — пробивное напряжение промежутка без барьера; 3, 4 — пробивное напряжение промежутка с барьером

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.

### 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  $\Gamma_p$  называемое временем разряда (см. рис. 1.14).

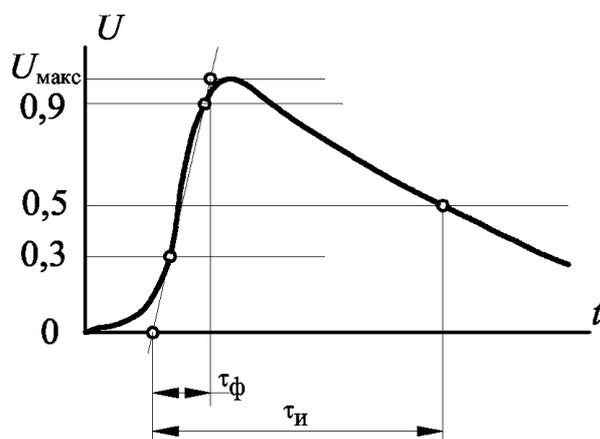


Рис. 1.14. Временная структура развития разряда на импульсном напряжении

Развитие самостоятельного разряда начинается с появления в промежутке эффективного начального электрона, что является случайным событием. Время ожидания эффективного электрона  $t_c$  подвержено 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  $t_c + t_{\phi} = t_3$  называют временем запаздывания развития разряда. При достаточно большой длительности фронта импульса имеет значение также время  $t_0$ , представляющее собой время подъема напряжения до значения  $U_n$ . 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  $\tau_{\text{и}} = 50 \pm 10$  мкс и обозначается 1,2/50 мкс (рис. 1.15).

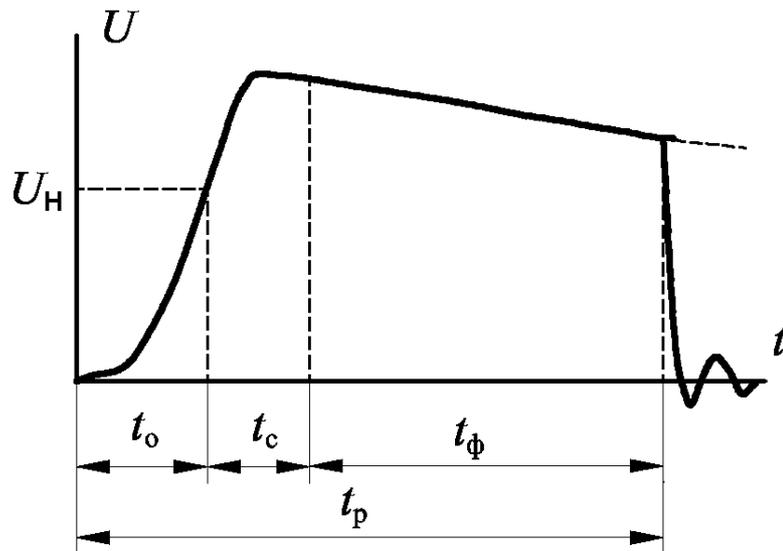


Рис. 1.15. Определение параметров импульса напряжения

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.

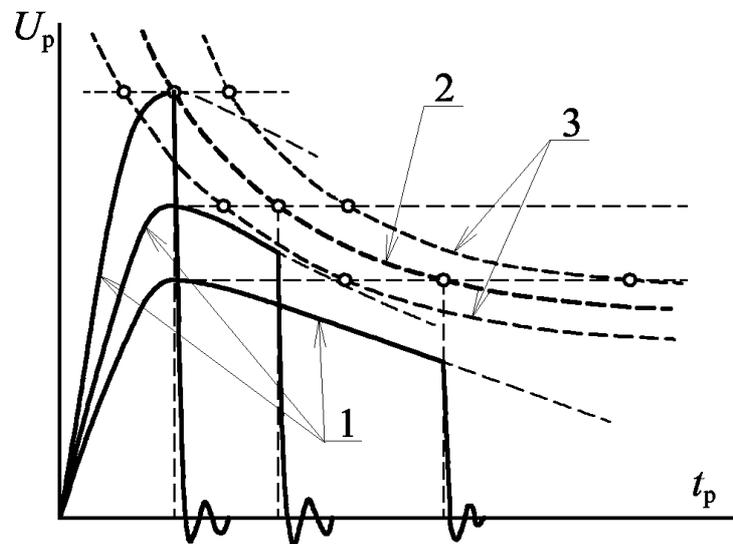


Рис. 1.16. Построение вольт-секундной характеристики изоляции по опытным данным (грозовые импульсы): 1 — импульс напряжения; 2 — кривая средних значений пробивного напряжения; 3 — границы разброса пробивных напряжений

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

$$K_{\dot{U}} = \frac{U_p}{U} \quad (1.28)$$

называется коэффициентом импульса.

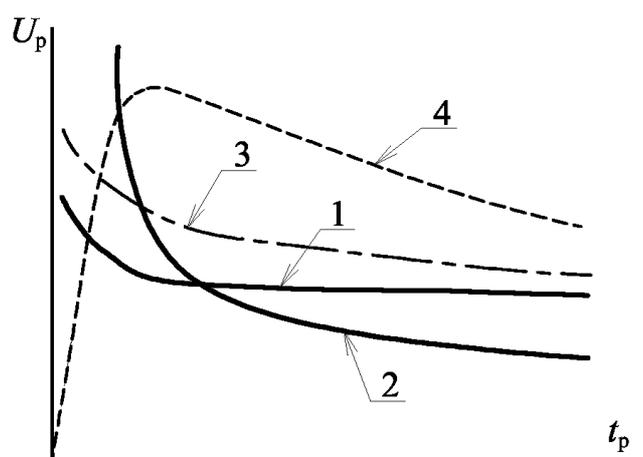


Рис. 1.17. ВСХ защитных разрядников и изоляции: 1 — ВСХ вентильного разрядника (однородное поле); 2 — ВСХ трубчатого разрядника (резконе-однородное поле); 3 — ВСХ защищаемого объекта; 4 — импульс напряжения

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

Вольт-секундные характеристики широко используются для координации изоляции высоковольтного оборудования, т. е. для защиты от воздействия грозовых 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.

#### Тема 4. Разряды в воздухе вдоль поверхности изоляторов (6 часа)

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 акустического 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  $t_2$ .

Несмотря на повышение напряжения до  $U_{\text{макс}}$ , 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 область, 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  $U_0$ .

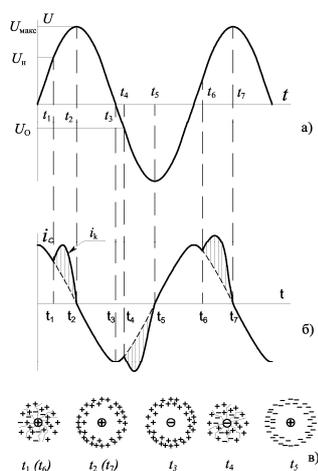


Рис. 1.18. Развитие короны при переменном напряжении

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 от  $t_4$  до  $t_5$ )

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 напряжения возникновения короны.

#### 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).

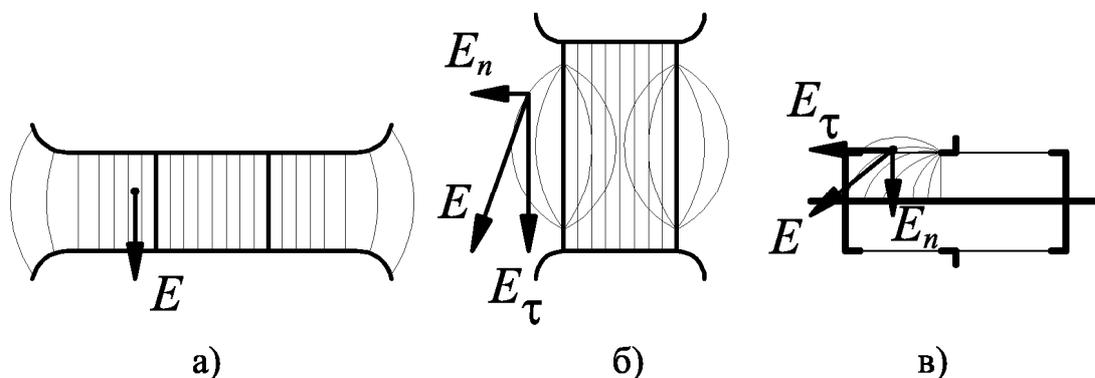


Рис. 1.19. Характерные конструкции воздушных промежутков с твердым диэлектриком

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 микрозазора 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 микрозазорам 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, 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. 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 напряжения оказывается близким к разрядному напряжению чисто воздушного промежутка.

#### **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.

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

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.

## **Тема 5. Общие свойства внутренней изоляции (4 часа)**

### **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 (хлор-дифенил, 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	$\delta$	$\text{tg}\delta$
Неполярные	$>10^{18}$	1,8...2,5	$\ll 0,001$
Слабополярные	$\ll 10^{11} \dots 10^{12}$	$>2,5$	$\ll 0,01$
Сильнополярные	$\ll 10^7 \dots 10^8$	$>5$	$\ll 0,1$

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  $U_{ПР}$  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

- 1) загрязнение и увлажнение (увеличение загрязненности масла снижает  $U_{ПР}$ , ничтожное количество влаги ( $< 0,03\%$ ) резко снижает  $U_{ПР}$ );
- 2) вязкость (уменьшение вязкости уменьшает  $U_{ПР}$ );
- 3) температура (с увеличением температуры  $U_{ПР}$  уменьшается; на импульсном напряжении это влияние незначительное; для технически чистого масла зависимость  $U_{ПР} = f(T^0 C)$  носит сложный характер);
- 4) давление (для технически чистого масла увеличение давления приводит к увеличению  $U_{ПР}$ , т.к. увеличивается давление в газовых пузырьках);
- 5) наличие барьеров (барьеры могут существенно повысить  $U_{ПР}$ , особенно в резконеоднородном поле;
- б) время действия напряжения (с увеличением времени воздействия напряжения  $U_{ПР} >$  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  $U_{ПР}$ , с увеличением площади электродов  $U_{ПР}$  уменьшается; увеличение расстояния увеличивает  $U_{ПР}$ );
- 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.

#### **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°C может растворяться ~ 40-10<sup>6</sup> воды по объему, а при 80°C ~ 400-10<sup>6</sup>.

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  $\epsilon = 80$ , для волокон целлюлозы  $\epsilon = 6,4$ ) 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  $\text{CH}_2\text{O}$  (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.

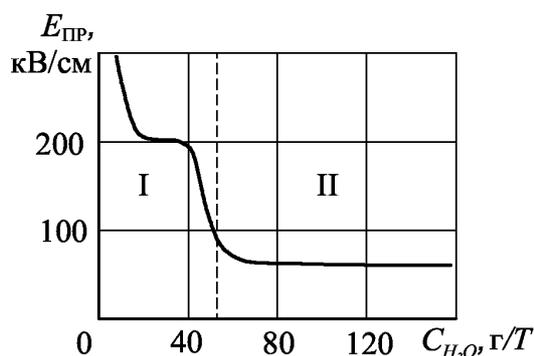


Рис. 1.20. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от содержания влаги,  $\text{CH}_2\text{O}$  (грамм тонна): I — зона растворимости влаги, II — эмульгированная влага

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.

#### 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).

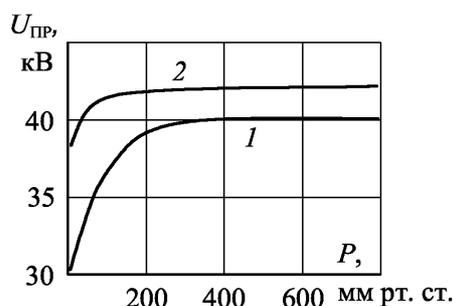


Рис. 1.21. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления: 1 — недегазированное масло; 2 — дегазированное масло

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.

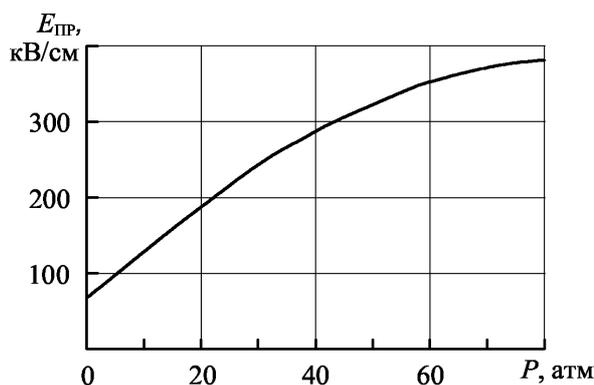


Рис. 1.22. Зависимость пробивного напряжения парафинового масла от давления (50 Гц)

#### 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).

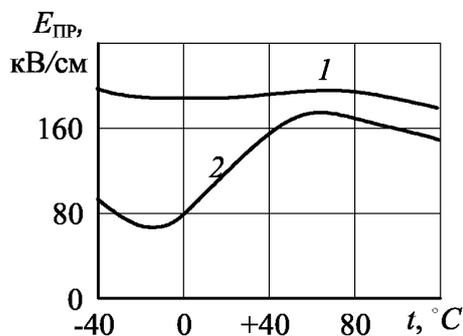


Рис. 1.23. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от температуры: 1 — сухое масло; 2 — техническое масло с примесью влаги

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  $\epsilon_{л}$  примерно равна диэлектрической постоянной масла  $\epsilon_{м}$  ( $\epsilon_{л} \approx \epsilon_{м}$ ), что уменьшает влияние влаги на электрическую прочность масла. Уменьшение электрической прочности для сухого и технического масел при температуре выше  $+80^{\circ}C$  (рис. 1.23) обусловлено интенсивным испарением и кипением жидкости.

### 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).

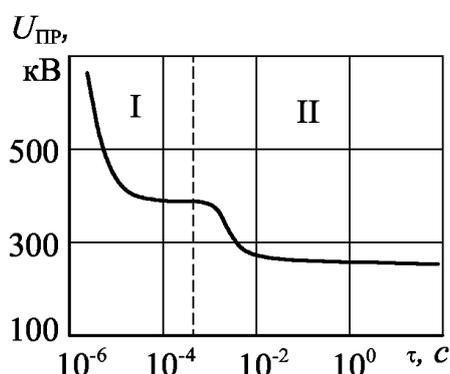


Рис. 1.24. Зависимость пробивного напряжения от времени воздействия для трансформаторного масла. Электроды: острие-плоскость; расстояние между электродами 20 см; положительная полярность напряжения

Экспериментальные результаты по пробое 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  $U_{пр}$  вследствие влияния влаги и волокон, а также образования газовых пузырьков. При дальнейшем увеличении времени воздействия напряжения решающее влияние на снижение  $U_{пр}$  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.

### 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  $E_{\text{ПР}}$  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.

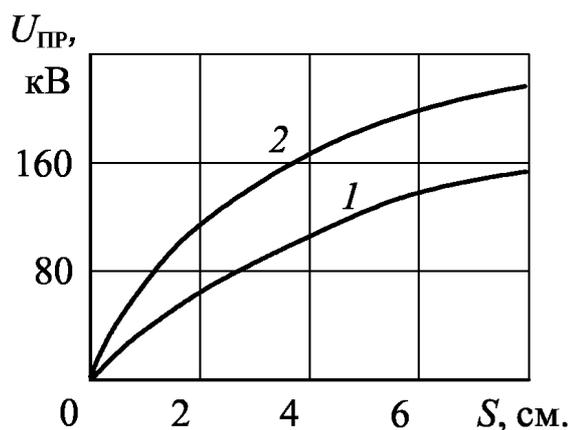


Рис. 1.25. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и полярности для трансформаторного масла, электроды острие-плоскость: 1 - положительная полярность острого; 2 — отрицательная полярность острого; напряжение постоянное

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 острого достигает 2,0-2,5 раз по сравнению с положительной полярностью.

### 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 обуславливается 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  $U_{\delta}/U_{\text{ПР}}$  ( $U_{\text{ПР}}$  - пробивное напряжение чисто масляного промежутка, а  $U_{\delta}$  - пробивное напряжение того же промежутка с барьером) в зависимости от положения барьера  $S_{\delta}/S$  ( $S$

— расстояние между электродами, постоянно, а  $S_{\bar{b}}$  - расстояние от острия до барьера) в масляном промежутке, образованном электродами острие-плоскость при воздействии переменного напряжения с частотой 50 Гц.

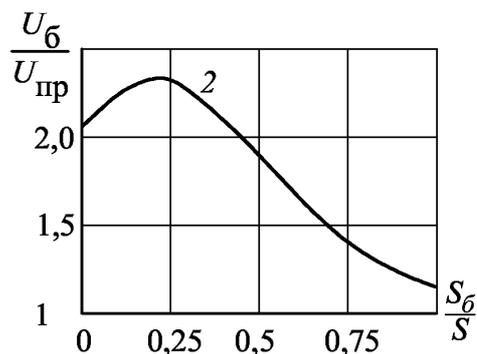


Рис. 1.26. Влияние барьера на пробивное напряжение масляного промежутка: электроды острие-плоскость; напряжение 50 Гц,  $S=75$  мм

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  $S_{\bar{b}} \approx 0,25 S$ , что хорошо коррелирует с аналогичным эффектом для газа.

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

#### Пробой твердой изоляции

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой. 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 —  $E \sim 10-10$  кВ/мм;
- 2) тепловой —  $E \sim 10-10$  кВ/мм;
- 3) старение —  $E \sim 10$  кВ/мм и менее.

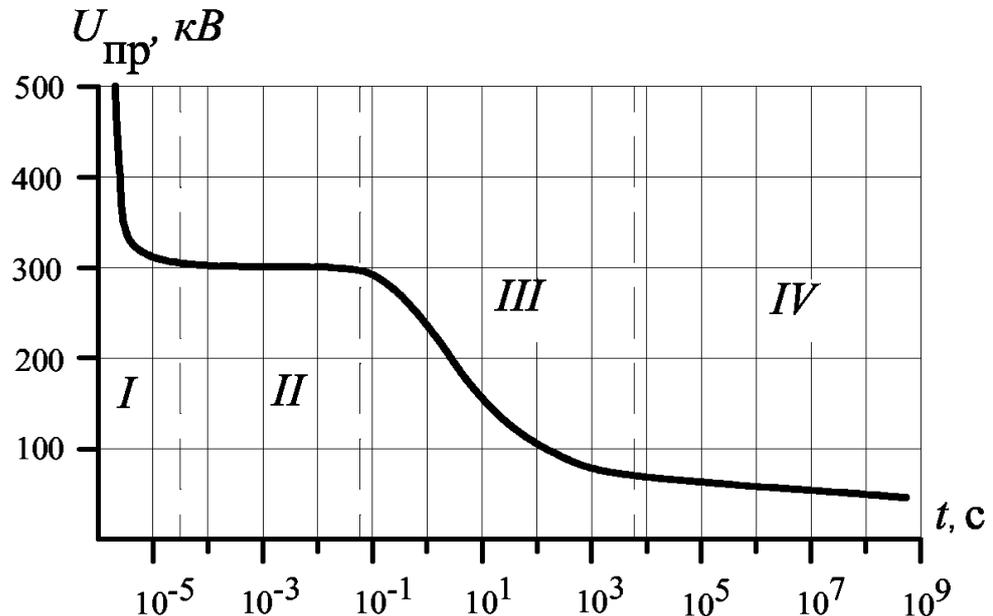
Твердая изоляция включает в себя все виды твердых диэлектриков от пленок до толстой монолитной.

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  $E_{\text{ПР}}$  практически не изменяется (область А). Дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому уменьшению  $E_{\text{ПР}}$  (область Б).



с. 7.27. 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  $U_{\text{ПР}}$  во времени; IV — старение,  $U_{\text{ПР}}$  мало изменяется, а время до пробоя возрастает значительно

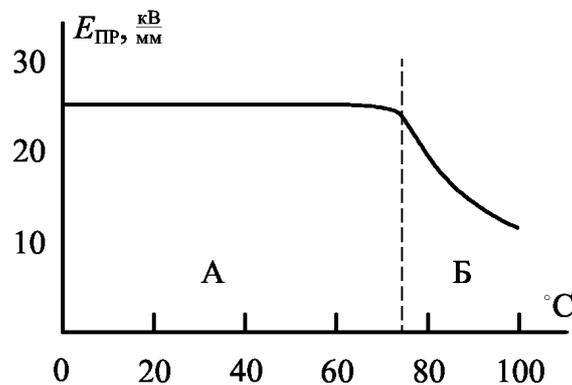


Рис. 1.28. Зависимость пробивного напряжения от температуры для фарфора (напряжение 50 Гц)

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.

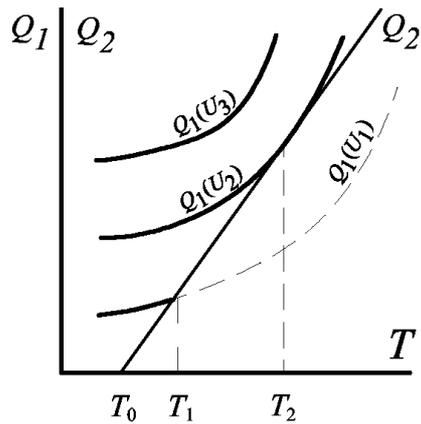


Рис. 1.29. Изменение выделенного  $Q$  и отводимого изоляции при разных  $U$

### 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 пробоею диэлектрика, однако приводят к местному разрушению изоляции, а при длительном существовании могут привести и к сквозному пробоею.

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  $C_э$  (рис. 1.30).

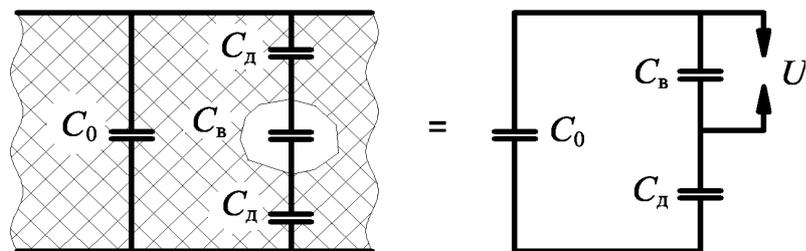


Рис. 1.30. Схема замещения твердого диэлектрика:  $C_0$  — емкость бездефектной изоляции;  $C_v$  — емкость воздушного включения;  $C_d$  — емкость диэлектрика последовательно с включением;  $U_e$  — напряжение пробоя воздушного включения

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

Исходя из (1.49), напряженность электрического поля в газовом включении (и в любом другом, где  $\epsilon_v < \epsilon_d$ ) 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.

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  $q_{чр}$ , измеряемого при ЧР, возможна классификация ЧР по  $q_{чр}$ :

1. При превышении некоторого порога напряжения в изоляции возникают ЧР с интенсивностью  $q_{чр} = 10^{-11} \dots 10^{-12}$  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  $q_{чр}$  до величины  $q_{чр} = 10^{-10} \dots 10^{-8}$  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.

## **Тема 6. Основные виды внутренней изоляции и повышение ее электрической прочности**

К диэлектрическим материалам, используемым для внутренней изоляции оборудования высокого напряжения, предъявляются высокие требования в отношении их электрических, тепловых, механических и других свойств.

Прежде всего материалы должны обеспечивать высокие—кратковременную и длительную — электрические прочности. Это означает, что они должны обладать определенным комплексом свойств: иметь высокие пробивные напряженности в области чисто электрического пробоя и малые диэлектрические потери (от них зависит напряжение теплового пробоя), иметь достаточную стойкость к воздействию частичных разрядов или обеспечивать отсутствие в изоляции газовых включений,

Тепловые свойства диэлектрических материалов (теплопроводность, стойкость к тепловому старению и др.) исключительно важны в связи с тем, что они ограничивают допустимые температуры активных частей оборудования и влияют на перепады температуры в изоляции. Следовательно, они определяют допустимые рабочие режимы оборудования в целом (допустимые рабочие токи, токи перегрузки и т.д.). Кроме того, от тепловых свойств материалов зависят степень пожаро- и взрывоопасности конструкции, объем и содержание защитных мероприятий.

Высокие требования к механической прочности диэлектрических материалов обусловлены не только значительными нагрузками на изоляцию в эксплуатации, но и нагрузками, возникающими в процессе изготовления самой изоляции и конструкции в целом. Особенность этих требований состоит в том, что необходимо не просто обеспечить механическую целостность изоляции и всей конструкции, но и исключить появление в изоляции трещин, расслоений и других небольших дефектов, снижающих электрическую прочность.

Весьма важными являются требования к технологичности диэлектрических материалов. Кратко эти требования сводятся к тому, что материалы должны быть пригодными для высокопроизводительных процессов изготовления изоляции и всего оборудования или аппарата в целом,

Материалы для внутренней изоляции должны удовлетворять экологическим требованиям: они не должны содержать или образовывать в процессе эксплуатации токсичные продукты; после отработки всего срока службы они должны легко поддаваться переработке или уничтожению без загрязнения окружающей среды.

Наконец, диэлектрические материалы должны быть недефицитными и иметь такую стоимость, при которой достигаются требуемые экономические показатели оборудования. В ряде случаев к указанным выше общим требованиям могут добавляться и другие, обусловленные спецификой того или иного вида оборудования. Например, материалы для силовых конденсаторов должны иметь повышенную диэлектрическую проницаемость; материалы для камер выключателей — высокую стойкость к термоударам и воздействию электрической дуги.

Следует подчеркнуть, что все отмеченные выше группы требований относятся к категории главных, т.е. пренебрежение любыми из них приведет к тому, что конструкция высокого напряжения окажется либо неработоспособной, либо экономически или экологически неприемлемой.

Многолетняя практика создания и эксплуатации оборудования высокого напряжения показала, что весь комплекс требований наилучшим образом удовлетворяется при использовании в составе внутренней изоляции комбинации из нескольких материалов, дополняющих друг друга и выполняющих несколько различные функции.

Целесообразность комбинирования материалов во внутренней изоляции строго может быть обоснована только путем анализа многих свойств различных вариантов изоляции и влияния этих свойств на показатели конкретных видов оборудования. Поэтому для краткости ограничимся некоторыми общими соображениями о преимуществах комбинированной изоляции.

Во всех случаях в состав внутренней изоляции должны входить твердые диэлектрические материалы, так как только они могут обеспечить необходимую механическую прочность изоляционной конструкции. Эти материалы имеют, как правило, и весьма высокую электрическую прочность. Однако твердые диэлектрические материалы обладают низкой теплопроводностью; в конструкциях со сложной конфигурацией электродов они требуют больших трудозатрат на механическую обработку. Главный же недостаток твердых материалов состоит в том, что трудно или даже невозможно обеспечить надежное сочленение деталей из таких материалов друг с другом или с электродами без воздушных зазоров, в которых под действием рабочего напряжения могут развиваться частичные разряды, вызывающие старение изоляции.

Указанные недостатки в значительной мере или полностью устраняются, если в комбинации с твердыми материалами использовать высокопрочные газы под давлением или жидкие диэлектрики. Газы и жидкости легко заполняют изоляционные промежутки любой конфигурации, могут заполнять тончайшие зазоры и щели, чем существенно повышают электрическую прочность, особенно длительную. Жидкие диэлектрики могут быть использованы в качестве теплоносителя в системе интенсивного охлаждения конструкции. Но для газов и жидких диэлектриков необходим корпус — резервуар (бак), а для жидких диэлектриков — еще и устройство для компенсации температурных изменений объема и специальные противопожарные мероприятия, так как большинство жидких диэлектриков являются горючими материалами. Поэтому иногда в составе внутренней изоляции применяют диэлектрические материалы, которые лишь в процессе изготовления изоляции находятся в жидком состоянии, а затем отверждаются.

Ниже рассматриваются наиболее распространенные виды внутренней изоляции оборудования высокого напряжения энергосистем, целесообразность комбинирования материалов в которых подтверждена многолетней практикой. Следует, однако, отметить, что в ряде случаев комплекс высоких свойств изоляции может быть достигнут и при использовании одного материала. Примером тому служат силовые кабели на напряжения 110 и 220 кВ с изоляцией из вулканизированного полиэтилена,

### **МАСЛО-БАРЬЕРНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ**

Основу масло-барьерной изоляции (МБИ) составляет минеральное (трансформаторное) масло, которое как маловязкая жидкость легко заполняет изоляционные промежутки с электродами любой конфигурации и обеспечивает хорошее охлаждение конструкции за счет самопроизвольной или принудительной циркуляции.

Масло-барьерная изоляция используется в качестве главной изоляции в силовых трансформаторах, автотрансформаторах и реакторах. В состав МБИ входят твердые диэлектрические материалы: электрокартон, кабельная бумага и др. Они используются для обеспечения механической прочности конструкции, а также для повышения электрической прочности МБИ. Необходимость в этом обусловлена тем, что в больших по объему изоляционных промежутках масло имеет относительно невысокую электрическую прочность (всего лишь в 2,5—3,0 раза большую, чем у воздуха при атмосферном давлении).

С целью повышения электрической прочности МБИ в масляных промежутках устанавливают барьеры из электрокартона толщиной 2,0—3,0 мм, покрывают электроды полимерными материалами или наносят на них слои бумажных лент.

Барьеры из электрокартона дают наибольший эффект, когда они расположены нормально к силовым линиям электрического поля. Поэтому в силовых трансформаторах они выполняются в виде цилиндров и угловых шайб.

Введение барьеров в масляный промежуток приводит к увеличению напряженности в масле на 5—7%, так как диэлектрическая проницаемость пропитанного маслом картона примерно в 1,5 раза выше, чем масла. Тем не менее барьеры повышают электрическую прочность МБИ на 30—50 %." Строгое объяснение барьерного эффекта для масляных промежутков пока отсутствует. Вероятнее всего роль барьера состоит в следующем. В технически чистом масле неизбежно присутствуют взвешенные твердые примесные частицы. Такие частицы в электрическом поле втягиваются в области повышенных напряженностей, которые образуются у поверхностей электродов (элементов обмотки) с наименьшими радиусами кривизны. Около частиц из-за различия диэлектрических проницаемостей происходит усиление электрического поля, что приводит к снижению электрической прочности масляного промежутка. Барьеры, разделяя промежуток на ряд узких каналов, ограничивают количество примесных частиц, которые могут приближаться к электродам и участвовать в иницировании разрядного процесса.

Средством повышения электрической прочности МБИ служит также покрытие электродов сложной формы тонким слоем полимерного материала (поливинилбутирала— «бутвара»); а в случае электродов простой формы — изолирование их слоями бумажной ленты.

Технология изготовления МБИ включает сборку конструкции, сушку ее под вакуумом при температуре 100—120 °С и заполнение (пропитку) под вакуумом дегазированным маслом.

К достоинствам МБИ относятся сравнительная простота конструкции и технологии ее изготовления, интенсивное охлаждение активных частей трансформаторов (обмоток, магнитопроводов), а также возможность восстановления качества изоляции в эксплуатации путем сушки конструкции и замены масла.

Масло имеет меньшую электрическую прочность, чем твердая изоляция, поэтому при увеличении напряжения вначале происходит пробой наиболее нагруженного масляного промежутка (масляного канала). При этом ток в месте пробоя ограничивается сопротивлением последовательно включенной твердой изоляции и других масляных каналов и поэтому полной потери изоляционных свойств не происходит. Однако в месте разрядов в масле создаются необратимые повреждения твердой изоляции, снижающие ее длительную электрическую прочность. Поэтому кратковременную электрическую прочность масло-барьерной изоляции принято характеризовать пробивным напряжением первого масляного канала.

Напряжение пробоя первого масляного канала в масло-барьерной изоляции отличается от пробивного напряжения чисто масляных промежутков, поскольку условия формирования разряда зависят от емкости, через которую замыкается разрядный ток. Однако экспериментальные данные по пробивным напряжениям чисто масляных промежутков могут быть использованы для приближенного определения напряжения пробоя первого масляного канала. Для этого нужно рассчитать долю напряжения, приходящегося на масляный канал, с учетом различия диэлектрических про-ницаемостей масла и твердой изоляции. Более точное определение пробивных напряжений производится экспериментально на полномасштабных макетах изоляции.

Недостатками МБИ являются меньшая, чем у бумажно-масляной изоляции, электрическая прочность, пожаро- и взрывоопасность конструкции, необходимость специальной защиты от увлажнения в процессе эксплуатации.

Масло-барьерная изоляция, как уже отмечалось, используется в качестве главной изоляции, т. е. изоляции между обмотками разного напряжения, а также между обмотками и заземленными элементами конструкции, в силовых трансформаторах с номинальными напряжениями от 10 до 1150 кВ, в автотрансформаторах и реакторах высших классов напряжения. Ранее она применялась и во вводах напряжения 110—220 кВ, однако теперь в них используется бумажно-масляная изоляция,

### **ТВЕРДАЯ ИЗОЛЯЦИЯ**

Для создания изоляционных конструкций применяется широкий круг твердых диэлектрических материалов, отличающихся своим происхождением, структурой, физико-механическими свойствами и электрическими характеристиками. В изоляционных конструкциях твердый диэлектрик может использоваться отдельно, а также входить в состав комбинированной изоляции как одна из ее важнейших частей, поскольку твердая часть изоляции несет механическую нагрузку.

Таблица 1. Электрические характеристики твердых изоляционных материалов

Изоляционные материалы	*ПР' кВ/см	ε при 50 Гц	tg δ при 50 Гц
Неорганические материалы:			
электрофарфор	280—350	6,0—7,2	0,02—0,04
стеатит	380—	6,5—7,0	0,0005—

	500		0,003
стекло и	100—	6,0—8,0	0,003—0,05
стеклотекстолит	480		
слюдаые изделия	120—	5,8—7,5	0,008—0,07
	500		
асбест	30—60	7,0-8,0	0,2—0,5
Органические материалы:			
на основе целлюлозы:			
бумаги и картоны фибра	100—	2,2-2,7	0,001—0,03
гетинакс и текстолит	500		
	эк_70		
	160—	5,0—8,0	0,02—0,18
	200		
пропитанная древесина	40—80	7,0—8,0	0,06—0,3
синтетические материалы:			
термопластичные (полиэтилен, полистирол, фторопласт и др.),	250-600	2,2-4,0	0,0001-0,0008
терморезактивные	250—	—	0,01—0,05
	500		
(эпоксидные компаунды)			

Одной из особенностей твердой изоляции является возможность ее теплового пробоя вследствие затрудненного теплоотвода. Поэтому твердые диэлектрики должны обладать малыми диэлектрическими потерями, высокой нагревостойкостью и хорошей теплопроводностью.

Твердая изоляция в отличие от газообразной и жидкой после пробоя не самовосстанавливается. Это свойство твердые диэлектрики придают также комбинированной изоляции, в состав которой они входят.

В табл. 1 приведены электрические характеристики некоторых твердых изоляционных материалов, при этом указанная в ней электрическая прочность относится к тонким образцам.

Неорганическая изоляция устойчива к внешним воздействиям, долговечна и имеет невысокую стоимость. Из керамических материалов отметим стеатит, изготавливаемый из талька, каолина и углекислого бария по технологии, аналогичной производству фарфора. Стеатит обладает механической прочностью, превышающей фарфор в 2—3 раза, малыми диэлектрическими потерями и высокой теплостойкостью. Особенно низкий tg б стеатит имеет при высоких частотах, поэтому он используется в основном для изоляции радиоустройств.

Стеклооткань, спрессованная в несколько слоев и пропитанная изоляционными смолами, называется стеклотекстолитом. Этот материал имеет высокую нагревостойкость и может надежно работать при температурах до 180 °С.

Слюда как диэлектрический материал обладает рядом ценных качеств, к числу которых относятся очень высокая электрическая прочность (при определенной ориентации электрического поля относительно кристаллической структуры), стойкость к воздействию частичных разрядов, высокая нагревостойкость. Эти качества делают слюду незаменимым

материалом для изоляции статорных обмоток вращающихся машин с номинальными напряжениями до 36кВ.

Однако основные виды слюдяной продукции: слюда щипаная и слюдинитовая бумага сами по себе непригодны для выполнения крупных изоляционных конструкций. Щипаная слюда — это пластинки небольших размеров толщиной от 0,005 до 0,045 мм; слюдинитовая бумага, получаемая из отходов слюдяного производства, имеет крайне низкую механическую прочность. Поэтому оба этих продукта используются в составе композиционных материалов: микаленты и слюдинитовой ленты.

Микалента представляет собой слой пластинок слюды, скрепленных лаком между собой и с подложкой из специальной бумаги или стеклоленты. Микалента используется для изготовления так называемой компаундированной изоляции. Технология изготовления такой изоляции включает следующие операции: намотку нескольких слоев микаленты на проводники обмотки, пропитку при нагреве под вакуумом битумным компаундом и опрессовку. Этот процесс повторяется после наложения каждых пяти-шести слоев до получения изоляции необходимой толщины.

Компаундированная изоляция используется до настоящего времени в машинах малой и средней мощности. Ее недостатки: недостаточная механическая прочность при нагреве из-за размягчения термопластичного компаунда, а также дефицитность и высокая стоимость основного компонента— щипаной слюды.

Более совершенной является изоляция, выполняемая из слюдинитовых лент и терморезистивных пропиточных составов. Слюдинитовая лента состоит из одного слоя слюдинитовой бумаги толщиной 0,04 мм и одного или двух слоев подложки из стеклоленты толщиной 0,04 мм. Такая композиция обладает достаточно высокой механической прочностью (за счет подложек) и отмеченными выше качествами, характерными для слюды.

Из слюдинитовых лент и пропитывающих составов на основе эпоксидных и полиэфирных смол изготавливают терморезистивную изоляцию, которая при нагреве не размягчается, сохраняет высокую механическую и электрическую прочность.

Возможны два способа изготовления такой изоляции. В первом варианте намотка осуществляется лентами, заранее пропитанными под вакуумом терморезистивным составом. После наложения необходимого количества слоев изоляция под вакуумом разогревается и опрессовывается до отверждения пропиточного состава. Во втором варианте намотка осуществляется сухой (непропитанной) лентой. Затем проводится сушка под вакуумом, пропитка горячим составом, нагнетаемым с избыточным давлением, и опрессовка до отверждения пропиточного состава. В обоих случаях режимы основных технологических операций выбираются так, что обеспечивается плотное прилегание слоев друг к другу и к проводникам обмотки, надежное заполнение терморезистивным составом всех зазоров между слоями и пор в самих лентах. Соответствующие виды терморезистивной изоляции у нас в стране называют «слюдотерм» и «монолит».

Терморезистивная изоляция значительно превосходит компаундированную по электрическим и механическим, свойствам; входящая в ее состав слюдинитовая бумага Н0 является дефицитной и значительно дешевле щипаной слюды. Терморезистивная изоляция используется в настоящее время в статорных обмотках всех крупных турбо- и гидрогенераторов, двигателей и синхронных компенсаторов с номинальными напряжениями до 36 кВ.

Асбест—негорючий и теплостойкий минерал. Благодаря волокнистой структуре из него изготавливаются ткани, листы, плиты и пр. Используется для нагревостойкой изоляции, предохранения от действия электрической дуги. и поэтому используется также в качестве полупроводящих покрытий и прокладок. Органическая изоляция создается на основе целлюлозы, синтетических материалов или каучука. Основным недостатком изоляции на основе целлюлозы являются ее высокая гигроскопичность и низкая нагревостойкость. Для уменьшения гигроскопичности бумагу пропитывают лаками и смолами. Пропитанные

термореактивной бакелитовой смолой и спрессованные листы бумаги после термообработки образуют монолитный материал с высокими механическими свойствами, называемый гетинаксом. Если же такой обработке подвергается хлопчатобумажная ткань, то получаемый материал называют текстолитом.

Бумага, обработанная хлористым цинком и спрессованная в виде листов или труб, называется фиброй. Этот материал поддается всем видам механической обработки и используется для изготовления крепежных деталей. При термическом разложении фибра выделяет большое количество газов, поэтому она используется для обеспечения дугогашения в трубчатых разрядниках.

Высушенная и пропитанная древесина твердых пород используется для изготовления крепежных деталей и прокладок. Из тонких листов древесного шпона после пропитки изоляционными смолами, прессования и термообработки получают дельта-древесину — листовой материал с высокими механическими свойствами и хорошими электрическими характеристиками.

Большой класс твердых изоляционных материалов составляют синтетические полимерные диэлектрики. Термопластичные материалы, размягчающиеся и плавящиеся при нагреве до нескольких сотен градусов, применяются для изготовления спрессованных изделий и тонких пленок, полиэтилен нашел применение в качестве изоляции силовых кабелей напряжением до 35 кВ.

Компаунды на основе эпоксидной смолы являются термореактивными материалами: после нагрева они теряют пластичность, затвердевают и становятся нерастворимыми. Они используются для изготовления литой изоляции трансформаторов, аппаратов и герметизированных распределительных устройств.

Кратковременная электрическая прочность твердой изоляции, как следует из табл. 1, зависит от вида диэлектрика и изменяется в широких пределах.

Пробивное значение напряженности поля для тонких слоев (пленок) значительно выше, чем для больших толщин изоляции. Поэтому во многих случаях создается многослойная изоляция, например посредством намотки бумаги или синтетической пленки. В реальной изоляции слои твердого диэлектрика, конечно, не склеиваются, а изоляция вакуумируется, сушится и пропитывается жидким или газообразным диэлектриком (минеральное масло, элегаз), чтобы исключить воздушные включения между слоями диэлектрика и связанные с ними частичные разряды.

### **БУМАЖНО-МАСЛЯНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ**

Исходными материалами для изготовления бумажно-масляной изоляции (БМИ) служат кабельная или конденг саторная бумага и минеральное масло (трансформаторное, кабельное, конденсаторное). В ряде случаев используются минеральное (кабельное) масло с добавками канифоли, касторовое масло, синтетические жидкости.

Основу БМИ составляют слои бумаги. В зависимости от размеров и особенностей конструкции электродов (токоведущих частей) каждый слой бумаги может быть сплошным или состоять из отдельных лент. В первом случае используются рулоны бумаги достаточно большой ширины (до 3,5 м), во втором — ролики бумажной ленты шириной от 20 до 400 мм. Рулонная БМИ применяется в силовых конденсаторах и вводах (проходных изоляторах), ленточная — для изолирования электродов относительно сложной конфигурации или большой длины, например во вводах высших классов напряжения, в кабелях, обмоточных проводах для трансформаторов и т. д.

Слои ленточной изоляции образуются путем плотной намотки на электрод бумажной ленты внахлест (положительное перекрытие) или с зазором между соседними витками (отрицательное перекрытие). Первый вариант обычно используется при ручной намотке изоляции на изогнутые электроды, например на электроды тороидальной формы; второй — при наложении изоляции с помощью специальных намоточных станков, обеспечивающих такое взаимное расположение лент в соседних слоях, при котором зазоры между витками в одном слое надежно перекрываются лентами следующего слоя.

Ленточная изоляция с отрицательным перекрытием используется в кабелях, так как наличие небольших зазоров (1—2 мм) между витками в слое дает изоляции большую гибкость.

После плотной намотки необходимого числа слоев бумаги изоляция подвергается сушке под вакуумом при температуре 100—120 °С до остаточного давления 0,1—10 Па. Затем под вакуумом производится пропитка тщательно дегазированным маслом.

Бумажно-масляная изоляция многослойная. В такой изоляции случайный дефект твердого диэлектрика (бумаги) заведомо ограничен пределами одного слоя и многократно перекрывается другими слоями; вероятность совпадения дефектов в нескольких слоях оказывается ничтожно малой.

Бумажно-масляная изоляция имеет сложную структуру. При плотной намотке между слоями остаются тонкие (менее 0,01 мм) зазоры, обусловленные микронеровностями поверхностей бумаги. В самой бумаге имеется большое количество микропор между волокнами. В ленточной ленте, кроме того, образуются небольшие зазоры, соседними витками ленты. В любом случае в БМИ создается система распределенных по всему объему и связанных зазоров и микропор, которые в целом занимают около 50 %; объема изоляции. Благодаря этой системе при вакуумной,; сушке обеспечивается удаление из изоляции воздуха и сорбированной влаги, а при пропитке — надежное заполнение всех зазоров и микропор маслом.

В силу отмеченных выше особенностей структуры БМИ имеет высокую кратковременную и длительную электрические прочности при больших толщинах и объемах изоляционной конструкции. По этому показателю она превосходит все другие виды внутренней изоляции, используемые в широких промышленных масштабах.

В настоящее время разновидности БМИ широко используются во многих видах оборудования высокого напряжения энергосистем: в силовых конденсаторах различного назначения, во вводах на напряжений от 110 до 1150 кВ, в силовых кабелях с номинальными напряжениями от 35 до 500 кВ, в силовых трансформаторах, автотрансформаторах и реакторах (в качестве витковой изоляции), в измерительных трансформаторах тока высших классов напряжения.

#### ГАЗОВАЯ И ВАКУУМНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Применение газовой изоляции дает ряд преимуществ по сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками. В частности, газовая изоляция отличается очень малыми диэлектрическими потерями и практически не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации. Применение ее приводит к резкому снижению массы конструкции. В ряде случаев конструкция устройства упрощается и становится пожаробезопасной.

При увеличении давления электрическая прочность элегаза ( $SF_6$ ) и воздуха становится выше электрической прочности твердых и жидких диэлектриков, например минерального масла

Газы, используемые для изоляции установок высокого напряжения, должны быть химически стойкими в электрическом разряде и не должны выделять химически активных веществ; быть инертными и не вступать в реакции с материалами, в сочетании с которыми они применяются; обладать низкой температурой сжижения, допускающей их применение при повышенных давлениях, и высокой теплопроводностью. Помимо этого они должны быть негорючими и нетоксичными, и иметь невысокую стоимость.

В настоящее время в качестве изоляции применяются воздух, азот и шестифтористая сера (элегаз). Из них наибольшей электрической прочностью, превышающей прочность азота и воздуха примерно в 2,5 раза, обладает элегаз. Причина этого заключается в том, что элегаз является электроотрицательным газом, в состав его молекулы  $SF_6$  входит фтор - галоген, легко присоединяющий к себе электрон и образующий устойчивые ионы при увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может, быть выше электрической прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков. Наибольшее рабочее давление, следовательно, наибольший уровень

электрической прочности элегаза в изоляционной конструкции ограничиваясь с возможностью сжижения элегаза при низких температурах. Так, температура сжижения элегаза при давлении 0,3 МПа составляет  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при 0,5 МПа повышается до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такие температуры у отключенного оборудования наружной установки вполне возможны зимой во многих районах; страны. В связи с этим большой интерес представляют смеси элегаза с азотом, у которых электрическая прочность лишь на 10—15 % ниже прочности чистого элегаза, а допустимое давление резко возрастает. Так, например, у смеси из 30 % элегаза и 70 % азота сжижение при температуре  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  наступает при давлении 8 МПа.

Для крепления токоведущих частей в комбинации с элегазом используются опорные изоляционные конструкции из литой эпоксидной изоляции. Основным материалом в ней является эпоксидная или эпоксидно-диановая смола. Качество таких опорных изоляторов и особенно их длительная электрическая прочность в сильной степени зависят от технологии подготовки материалов и заливки. Обязательными считаются сушка исходных материалов, тщательное перемешивание компаунда, вакуумирование объема формы, заливка и выдержка до отверждения при избыточном давлении. Эти мероприятия позволяют исключить в литой изоляции газовые включения и тем самым обеспечить высокий уровень ее длительной электрической прочности.

Элегазовая изоляция может быть использована только в герметичных конструкциях. Практика показала, что надежная герметизация конструкций с элегазом является сложной задачей, требующей пристального внимания. В современных элегазовых аппаратах утечка элегаза не превышает 1 % общей массы в год.

Высокая надежность элегазовой изоляции, как показывает опыт эксплуатации, обеспечивается при условии очень тщательной очистки от загрязнений всех элементов конструкции, соприкасающихся с элегазом. Небольшие количества пыли, мелкой металлической стружки, волокон пряжи или бумаги могут снизить кратковременную электрическую прочность конструкции или вызвать появление в ней частичных разрядов. Последние опасны тем, что разлагают элегаз с образованием химически очень активных, а иногда и токсичных продуктов.

В настоящее время основной областью применения элегазовой изоляции являются комплектные распределительные устройства (КРУЭ) на напряжение ПО—220 кВ, наибольшее рабочее давление элегаза в которых 0,3 МПа. Сейчас разрабатываются КРУЭ на напряжение 1150 кВ, ведутся работы по созданию силовых кабелей с элегазовой изоляцией.

Элегаз является не только хорошей изолирующей, но и хорошей дугогасящей средой. Ток отключения в элегазе примерно в 10 раз больше, чем в воздухе. Если же учесть, что в элегазе скорость восстановления электрической прочности после погасания дуги почти на порядок выше, чем в воздухе, то из этого следует, что мощность отключения в элегазе может быть почти в 100 раз больше, чем в воздухе. По этой причине элегазовые выключатели успешно конкурируют с воздушными выключателями:

Воздух под избыточным давлением в несколько атмосфер используется в основном в образцовых конденсаторах на напряжение до 35 кВ. Ограниченное применение воздуха связано с тем, что при частичных разрядах в воздухе образуется озон, вызывающий коррозию металлов и разрушение твердых диэлектриков.

Азот и элегаз применяются для изоляции конденсаторов, трансформаторов, кабелей и герметизированных распределительных устройств.

Характерной особенностью электроотрицательных газов (элегаза, воздуха) под давлением является наличие максимума в зависимости пробивного напряжения промежутков с резконеоднородным полем от давления (рис. 12.6). Такое явление наблюдается при переменном напряжении, а также при постоянном напряжении и положительной полярности электрода с высокой кривизной поверхности. При импульсных напряжениях максимум выражен слабо. Объясняется это возникновением вблизи электрода с большой кривизной в результате ионизации положительного объемного заряда. Диффузия этого

заряда затруднена из-за, повышения давления, и он как бы увеличивает радиус кривизны электрода, выравнивая электрическое поле, вследствие чего пробивное напряжение повышается. При дальнейшем росте давления после значения, соответствующего максимуму  $U_{пр}$ , вследствие увеличивающегося поглощения фотонов и усиления фотоионизации изменяется механизм разряда: из лавинного он становится стримерным, и пробивное напряжение достаточно резко снижается. Под нарушением электрической прочности вакуумной изоляции понимают те явления, которые ограничивают подъем напряжения на электродах в данной конкретной установке. В одном случае это пробой при быстром подъеме напряжения, в других — возникновение изредка импульсов тока при длительном приложении напряжения или появление темновых токов. Таким образом, в зависимости от требований, предъявляемых к вакуумной изоляции, в понятие электрической прочности может вкладываться разный смысл.

Отличительной чертой вакуумной изоляции являются очень большие разбросы пробивных напряжений и напряжений появления темновых и импульсных токов (измеренные значения могут отличаться друг от друга в 1,5—3 раза), что объясняется особенностями микроструктуры поверхности электродов в их чистотой (адсорбционные и окисные пленки). Характеристики поверхности зависят от материала и чистоты обработки электродов и могут изменяться при воздействии разрядов. Недостатком вакуумной изоляции являются конструктивные сложности получения высокого вакуума и сложная технологическая обработка токоведущих частей.

#### **ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРНЫХ ОБКЛАДОК**

Регулирование электрического поля в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией может осуществляться с помощью так называемых конденсаторных **обкладок** представляющих собой дополнительные электроды из таллической фольги, которые располагаются в толще изоляции между главными электродами. В результате образуется цепочка последовательно включенных конденсаторов, емкости которых при переменном напряжении (или сопротивления изоляции между обкладками при постоянном напряжении) определяют распределение напряженностей в изоляции.

Путем изменения размеров, числа и взаимного расположения конденсаторных обкладок можно изменять емкости последовательно включенных конденсаторов, регулируя тем самым характер распределения напряженностей.

Отметим, что с помощью конденсаторных обкладок можно также регулировать электрическое поле и во вводах с масло-барьерной изоляцией. В этом случае обкладки располагают на барьерах цилиндрической формы. Поскольку число барьеров во вводах невелико, регулирование получается более грубым, чем во вводах с бумажно-масляной изоляцией.

На краях тонких обкладок из фольги напряженности электрического поля велики, и в этих местах возникают частичные разряды. Для того чтобы исключить их или по крайней мере уменьшить размеры области, в которой они возникают, увеличивают радиус закругления края обкладки, например путем заворачивания его, а также располагают между краями обкладок дополнительные электроды, как показано на рис. 13.2, б. С помощью этих электродов удастся более равномерно распределить напряжение между краями соседних обкладок и уменьшить напряженность поля у краев основных обкладок.

#### **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

В тех случаях, когда электрод с острой кромкой находится в газе или жидкости или примыкает к поверхности твердой изоляции, скругление края электрода приводит к образованию узкой щели между электродом и твердой изоляцией. При этом эффект от скругления края электрода получается существенно меньше, так как напряженность в щели возрастает из-за различия диэлектрических проницаемостей газа (жидкости) и твердой изоляции.

## ДОПУСТИМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Внутренняя изоляция оборудования энергосистем должна надежно выдерживать грозовые и внутренние перенапряжения. Это означает, что перенапряжения не должны приводить к полному пробоя внутренней изоляции, а также к появлению в ней каких-либо местных повреждений, влекущих за собой сокращение срока службы изоляционной конструкции. Такие повреждения при перенапряжениях могут быть вызваны частичными разрядами (см. гл. 18). Например, опасные повреждения возможны в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией в резконеоднородном электрическом поле, а также в маслобарьерной изоляции силовых трансформаторов при частичных разрядах в виде пробоя первого масляного канала.

Таким образом, кратковременная электрическая прочность внутренней изоляции, или ее способность выдерживать воздействие перенапряжений, не всегда характеризуется напряжением полного (сквозного) пробоя, в ряде случаев она определяется напряжением появления частичных разрядов с опасной для данной изоляции интенсивностью.

Это обстоятельство имеет большое практическое значение. Например, при заводском контроле изоляционных конструкций отсутствие пробоя во время приложения испытательного напряжения отнюдь не означает, что испытания прошли успешно. Необходимо еще убедиться в том, что под действием испытательного напряжения в изоляции появились частичные повреждения. С этой целью до и после приложения испытательного напряжения состояние изоляции обязательно контролируется с использованием методов, позволяющих обнаружить местные дефекты (например, по характеристикам частичных разрядов).

В диапазоне времен воздействия, характерных для грозовых и внутренних перенапряжений, кратковременная электрическая прочность большинства видов внутренней изоляции сложным образом зависит от длительности приложенного напряжения. Для практических целей проектирования изоляционных конструкций обычно используют данные о кратковременной электрической прочности при стандартных грозовых импульсах напряжения и при плавном или ступенчатом подъеме напряжения частотой 50 Гц.

### ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КРАТКОВРЕМЕННУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Кратковременная электрическая прочность внутренней изоляции любого типа зависит от многих конструктивных и технологических факторов. Соответствующие зависимости, необходимые для разработки новых конструкций, технологии их изготовления и правил ведения эксплуатации оборудования, определяются экспериментальным путем. Из-за высокой стоимости высоковольтных изоляционных конструкций и больших разбросов значений  $U_n$  и  $U_{59}$  выявление и достоверное определение требуемых для практики зависимостей связано со значительными затратами средств и времени. Поэтому накопление экспериментальных данных о кратковременной электрической прочности любой несамовосстанавливающейся изоляции идет обычно очень медленно. Для наиболее распространенных видов внутренней изоляции накоплено уже сравнительно много опытных данных, выявлены важнейшие зависимости, в ряде случаев. Однако даже для этих видов изоляции влияние некоторых факторов оценено лишь качественно или весьма приближенно.

#### Тема 7. Изоляция устройств высокого напряжения (10 часов)

Вводы — это проходные изоляторы на 110кВ 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  $U_{\text{пр}}$  повышается в  $\sim 2,5$  раза.

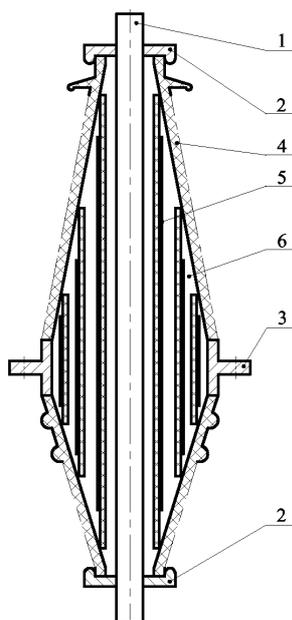


Рис. 2.3. Конструктивная схема маслобарьерного ввода: 1 — токопровод (стержень), 2 — высоковольтный фланец, 3 — заземленный фланец, 4 — фарфоровая рубашка, 5 — барьеры с обкладками, б—масло

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 масло-барьерного ввода.

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

2) Бумажномасляный ввод конденсаторного типа на класс напряжения  $U > 220$  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 обкладки из алюминиевой фольги для выравнивания поля в осевом и радиальном направлениях. После намотки тело пропитывается маслом в вакууме, а после сборки ввод герметизируется. 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 масло-барьерного ввода.

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

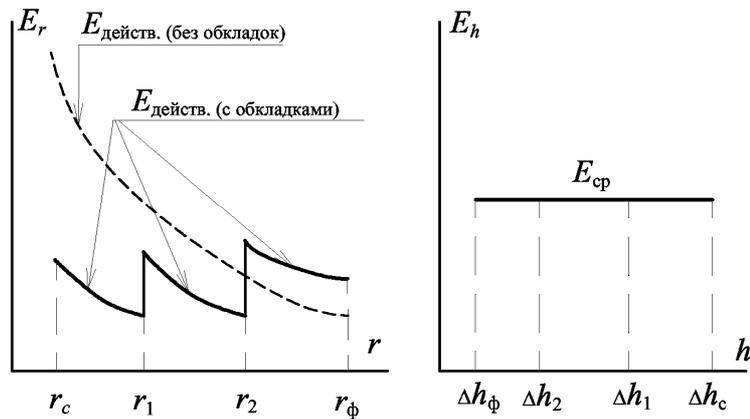


Рис. 2.4. Распределение напряженности электрического поля в радиальном (а) и аксиальном (б) направлениях ввода:  $r_c$  — радиус токопровода (стержня);  $r_1$  — радиус первой обкладки (фольги);  $r_2$  — радиус второй обкладки (фольги);  $r_\phi$  — радиус обкладки у фланца (заземлена);  $\Delta h_c$  — 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

### 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 выше 110 кВ — с заземленной нейтралью.

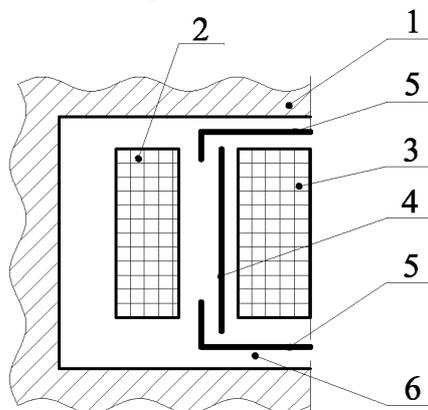


Рис. 2.6. Схема устройства изоляции высоковольтного трансформатора: 1— магнитопровод, 2 — низковольтная обмотка (НВ), 3 — высоковольтная обмотка (ВВ), 4 — барьер, 5 — щитки электроизоляции, 6—масло

## 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 — маслонаполненные 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 маслонаполненного 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 — маслонаполненный; С — среднего давления; С — свинцовый экран; К — броня круглой стальной проволокой.

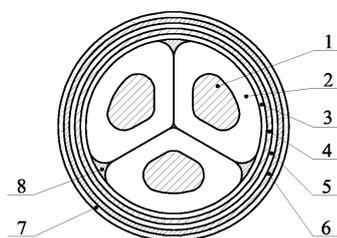


Рис. 2.7. Схема устройства изоляции кабелей до 35 кВ: 1 — жила, 2 — фазная изоляция, 3 — поясная изоляция, 4 — герметичное покрытие, 5 — подушка, 6 — броня, 7 — антикоррозионное покрытие, 8 — наполнитель (джут)

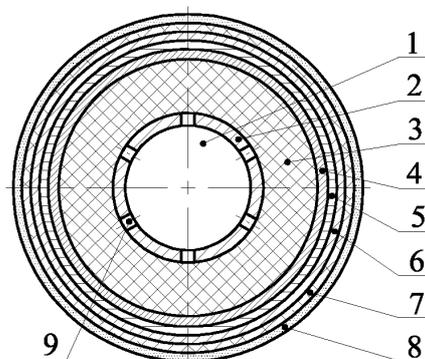


Рис. 2.8. Схема устройства изоляции кабеля 110 кВ: 1 — масляный канал, 2 — перфорированная токоведущая жила, 3 — бумажно-масляная изоляция, 4 — свинцовый экран, 5 — подушка, 6 — броня, 7 — антикоррозионное покрытие, 8 — наполнитель (джут), 9 — свинцовая оболочка

полупроводящий слой, 5— герметичное покрытие, 6— подушка, 7— броня, 8 — антикоррозийное покрытие, 9 — отверстия для прохода масла в изоляцию

### 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.

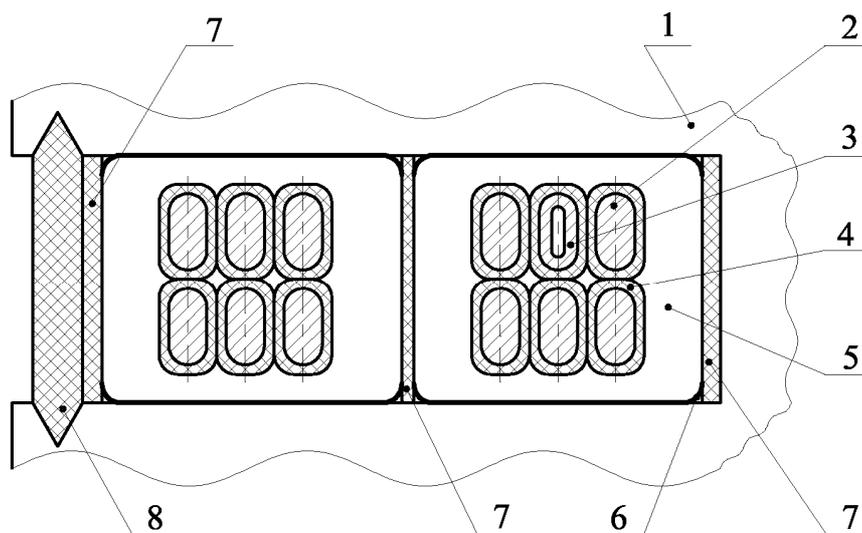


Рис. 2.9. Схема устройства высоковольтной изоляции электрической машины: 1 — статор, 2 — проводник сплошной, 3 — проводник полый, 4 — витковая (продольная) изоляция, 5 — главная корпусная изоляция, 6 — полупроводящее покрытие, 7 — прокладки, 8 — клин

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.

### Тема 8. Изоляция воздушных линий электропередачи.

Внешняя изоляция воздушных линий электропередачи и распределительных устройств (РУ), состоит из ряда чисто воздушных промежутков между проводами или шинами разных фаз и заземленными конструкциями, а также воздушных промежутков

вдоль поверхностей изоляторов, на которых крепятся провода или шины. Кроме того, в РУ к ней относится внешняя изоляция оборудования, присоединенного к шинам подстанции.

Воздушные линии и РУ имеют и внутреннюю изоляцию. На линиях ее составляет внутренняя изоляция линейных изоляторов а в РУ — внутренняя изоляция различных изоляторов и высоковольтного оборудования: силовых и измерительных трансформатор, коммутационных аппаратов и т. д.

При использовании стандартного оборудования и изоляторов проектирование изоляции воздушных линий и РУ сводится к определению необходимых изоляционных расстояний по воздуху и выбору изоляторов для крепления проводов или шин.

Изоляцию линий электропередачи в пролетах между опорами образуют воздушные промежутки провод — земля, провод — провод и провод — трос. Первый из них имеет минимальную длину в середине пролета и выбирается с учетом возможного сокращения изоляционного расстояния при проезде под линией транспорта. Расстояния между фазами определяются необходимой электрической прочностью изоляции и требованиями безопасности при подъеме монтера на стойку- опоры для проведения работ под напряжением. По условиям безопасности расстояния от проводов (или арматуры) до ближайших частей опоры должны быть, например, на линиях 330 кВ не менее 2,8 м, а на линиях 500 кВ — не менее 5,3 м. При этом должна быть еще учтена возможность отклонения гирлянд изоляторов под действием ветра.

Изоляция линий на опорах включает в себя, помимо изоляторов ряд воздушных промежутков, число которых зависит от конструкции опор и определяется возможными путями развития разряда. Так, на металлических и железобетонных опорах может происходить пробой воздушного промежутка между проводом и одним элементов конструкции опоры или перекрытие гирлянды. На линиях с деревянными опорами, кроме изоляторов, дополнительной изоляцией служат деревянные стойки и траверсы.

Пути, по которым может произойти развитие разряда во внешней изоляции РУ, определяются взаимным расположением шин и заземленных конструкций (порталов и т. д.), размещением и конструктивными особенностями высоковольтного оборудования.

На воздушных линиях и в РУ в настоящее время применяются фарфоровые и стеклянные изоляторы нескольких типов. В последние годы большое внимание уделяется разработке траверс из изоляционных материалов, применение которых позволит уменьшить габариты и стоимость опор воздушных линий электропередачи. Наиболее перспективными материалами для этих целей считаются эпоксидные компаунды, армированные для повышения механической прочности стекловолокном. Основная трудность состоит в создании компаундов с достаточно высокой трекинговостойкостью. У нас в стране ведутся также разработки элементов опор из изоляционного бетона.

Некоторые конструкции изоляционных траверс проходят уже проверку в условиях эксплуатации. При проектировании воздушных линий 330 кВ и более высоких классов напряжения считается допустимым 0,1—0,2 отключения на<sup>5</sup> 100 км линии в год; для линий . более низкого напряжения допускается большее число отключений.

К внешней изоляции РУ предъявляются более высокие требования в отношении надежности, так как при аварийном отключении шин подстанции ущерб значительно больше, чем при отключении линии. Вместе с тем внешняя изоляция РУ работает в условиях более благоприятных, нежели изоляция линий: относительно небольшая площадь РУ надежно защищается

от прямых ударов молнии, амплитуды волн грозových перенапряжений, приходящих с воздушных линий, ограничиваются вентильными разрядниками. Последние устанавливаются для защиты внутренней изоляции наиболее дорогостоящего оборудования — силовых трансформаторов, реакторов и т. д., но защищают и внешнюю изоляцию РУ. В случае закрытых РУ, когда ошиновка и высоковольтное оборудование

размещаются в специальных помещениях, исключается возможность сильного загрязнения и увлажнения поверхностей изоляторов.

## **РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ И АППАРАТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ**

Электрическая прочность внешней изоляции линейных и аппаратных изоляторов, существенно зависит от состояния их поверхностей и от вида воздействующего напряжения.

Перекрытие изолятора наружной установки может произойти и при рабочем напряжении, если его поверхности достаточно сильно загрязнены и увлажнены. В таких условиях на линиях 330 кВ и более высоких классов напряжения на ближайших к проводам изоляторах гирлянд рабочее напряжение будет достаточным для появления короны. Однако на таких линиях применяются расщепленные провода, емкость изоляторов относительно которых значительно больше. Поэтому распределение напряжения вдоль гирлянды получается более равномерным, и корона при «хорошей» погоде на изоляторах отсутствует.

В случае необходимости дополнительной мерой регулирования распределения напряжения по изоляторам гирлянды может служить специальная арматура в виде колец, восьмерок или овалов, укрепляемая на конце гирлянды со стороны провода. Такая арматура увеличивает емкость изоляторов по отношению к проводу, благодаря чему падение напряжения на ближайших к проводу изоляторах уменьшается.

Приведенные выше рассуждения относятся к гирляндам, изоляторы которых имеют сухие и чистые поверхности. При смачивании изоляторов дождем, а также при загрязнении их проводящими осадками распределение напряжения определяется главным образом проводимостями по поверхностям изоляторов и чаще всего имеет более равномерный характер.

Для линейных и аппаратных изоляторов всех типов и классов напряжения достаточно полной характеристикой электрической прочности их внешней изоляции при воздействии кратковременных перенапряжений являются значения испытательных напряжений — импульсных и промышленной частоты, прикладываемых при сухом состоянии поверхностей и под дождем

Число аварийных отключений из-за перекрытия изоляторов всех видах воздействующих напряжений и всех возможных изменениях метеорологических условий должно быть достаточно мало. В связи со случайным характером процессов, приводящих к перекрытиям и аварийным отключениям, задача выбора изоляторов для линий и РУ в полном объеме должна решаться, очевидно, статистическими методами с использованием функции распределения максимальных значений перенапряжений, параметров, характеризующих метеорологические условия, и т.д. Однако опыт проектирования и эксплуатации линий и РУ показывает, что определяющим является условие выбора изоляторов по рабочему напряжению. Число же отключений при перенапряжениях либо оказывается незначительным, либо его целесообразнее ограничивать до приемлемых значений с помощью средств грозозащиты, дугогасящих аппаратов, АПВ и др.

Методика определения степени загрязненности атмосферы, учитывающая все возможные источники загрязнения — промышленные предприятия, засоленные почвы и засоленные водоемы, подробно изложена в «Руководящих указаниях по выбору и эксплуатации изоляции в районах с загрязненной атмосферой». Первая, наименьшая степень загрязненности атмосферы соответствует районам с обычными полевыми загрязнениями: леса, тундра, лесотундра, луга, болота; вторая степень — земледельческим районам, в которых применяются химические удобрения, гербициды и другие; химические вещества. Степень загрязненности атмосферы вблизи промышленных предприятий устанавливается в зависимости от вида производства.

расстояния между источником загрязнений и воздушной линией или открытым РУ. По опасности уносов для внешней изоляции промышленные предприятия подразделяются на

группы А, Б, В, Г и Д в порядке возрастания опасности. Для отдельных видов предприятий и производств установлены так называемые минимальные защитные интервалы М, т. е. размеры зоны, окружающей предприятие, за пределами которой степень загрязненности атмосферы не превышает I и II. Величина М в зависимости от вида и объема производства лежит в пределах от 300 до 9000 м.

Рекомендуемые ПУЭ числа изоляторов в гирляндах для линий и РУ разных классов напряжения с изоляцией нормального исполнения приведены в табл. 6-3. Для районов с другими условиями загрязнения числа изоляторов в гирляндах определяются по (6-8) и нормам на Я<sub>3</sub>.

Следует отметить, что принятая в настоящее время методика выбора числа изоляторов в гирляндах по условию (6-8) не исключает проверку электрической прочности гирлянд при перенапряжениях и разных метеорологических условиях. Такая проверка может быть проведена, например, по (6-9) с учетом (6-5), а также соотношений между мокроразрядным напряжением гирлянды и ее разрядным напряжением при коммутационных импульсах. Она необходима при проектировании линий и РУ, расположенных в районах с чистой атмосферой, для которых число изоляторов в гирляндах, выбранное по рабочему напряжению; может быть уменьшено по сравнению с данными табл. 6-3.

При грозовых перенапряжениях характер распределения приложенного напряжения изменяется: на первый план выступает соотношение емкостей гирлянды и траверсы. В этом случае траверса воспринимает значительно большую долю напряжения, и импульсная прочность линейной изоляции существенно повышается. Для ориентировочных расчетов дополнительную импульсную прочность, создаваемую деревянной траверсой, принимают равной 100 кВ на 1 м пути разряда по этой траверсе.

Сравнение показывает, что 50%-ное импульсное разрядное напряжение изоляции на деревянных опорах выше, чем на металлических или железобетонных. В рассматриваемом примере эта разница составляет около 130 кВ (50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянд из семи изоляторов ПФ6-А, которые применяются на линиях 110 кВ с металлическими опорами, равно 570 кВ). В связи с этим линии на деревянных опорах обладают лучшими грозозащитными характеристиками, чем линии на металлических и железобетонных опорах.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА ОПОРАХ МИНИМАЛЬНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАССТОЯНИЙ**

Воздушные промежутки между проводами и заземленными частями опор должны иметь электрическую прочность не меньше, чем гирлянды изоляторов. Если воздушная линия проходит в местности с очень низкой грозовой деятельностью и редко подвергается грозовым перенапряжениям, то импульсная прочность ее изоляции, не имеет значения. В таких случаях минимальные изоляционные расстояния на опорах выбираются так, чтобы их прочность не была ниже мокроразрядных напряжений гирлянд, т. е. выбираются по значению внутренних перенапряжений. На линиях электропередачи, подверженных грозовым перенапряжениям, воздушные промежутки должны иметь и импульсные разрядные напряжения не ниже, чем у гирлянд изоляторов. В последнем случае для линий напряжением до 500 кВ импульсная прочность оказывает влияние на величину изоляционных расстояний.

Разумеется, минимальные изоляционные расстояния определяются с учетом отклонения гирлянд от вертикального положения под действием ветра

При выборе длины воздушного промежутка по грозовым перенапряжениям расчетное значение разрядного напряжения принимается равным 50%-ному импульсному, разрядному напряжению гирлянды изоляторов. Поправка на метеорологические условия не вносится, поскольку импульсные прочности воздушных промежутков и гирлянд изоляторов в зависимости от этих условий изменяются примерно одинаково.

## **. ИЗОЛЯЦИОННЫЕ РАССТОЯНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

При определении изоляционных расстояний по воздуху между токоведущими частями, а также от токоведущих до заземленных элементов распределительного устройства необходимо руководствоваться, испытательными напряжениями, установленными для электрооборудования; при этом для РУ напряжением до 220 кВ за основу нужно принимать импульсные испытательные напряжения, а для РУ 330 и 500 кВ — испытательные напряжения промышленной частоты. Определение необходимой длины воздушных промежутков производится по экспериментальным кривым разрядных напряжений.

Поскольку ошиновка РУ весьма протяженна и вероятность пробоя воздушных промежутков при такой протяженности ошиновки повышается, вводится коэффициент запаса. Изоляционные расстояния между фазами принимаются на 10% больше, чем между фазой и землей. Если ошиновка гибкая, то изоляционные расстояния должны быть увеличены с учетом возможных сближений проводов в пролете под действием ветра или изменений температуры.

### **ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Своевременное выявление дефектных изоляторов и замена их новыми имеют большое значение для надежной эксплуатации линий электропередачи. Один из методов обнаружения состоит в измерении распределения напряжения по гирлянде изоляторов, которое может производиться при рабочем напряжении. Затем полученное опытным путем распределение напряжения сравнивается с нормированным распределением для исправных гирлянд. Если на каком-либо изоляторе падение напряжения оказывается ниже нормы, то это указывает на неисправность изолятора.

Для определения падений- напряжения на изоляторах гирлянды применяются штанги с измерительным искровым промежутком. При измерениях расстояние между электродами промежутка может изменяться с помощью шнура из изоляционного материала. На конце штанги имеется указатель расстояния, отградуированный в киловольтах. Включенный последовательно с искровым промежутком конденсатор должен выдерживать напряжение наиболее нагруженного изолятора и предназначен для предотвращения перекрытия гирлянды в случаях, когда штанга наложена на хороший изолятор, а в гирлянде имеются один или несколько поврежденных.

В последнее время для контроле линейных изоляторов разрабатываются методы, основанные на индикации частичных разрядов которые возникают в головке поврежденных фарфоровых изоляторов.

### **3 Методические указания по выполнению лабораторных работ**

Лабораторные занятия предусмотрены в рабочей программе в объеме 18 часов.

Тематика лабораторных занятий представлена в таблице.

№ п/п	Наименование лабораторных работ	К-во час.
1	Изучение конструкции, условий применения аппарата АИИ-70 и правил безопасности в зале ТВН	2
2	Исследование электрической прочности воздушных промежутков в переменном и постоянном магнитном поле	2
3	Исследование электрических разрядов по поверхности твердых диэлектриков	2
4	Исследование вольт-секундных характеристик изоляционных конструкций. Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции.	2
5	Изучение конструкций изоляторов	2
6	Распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов	2

7	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	2
8	Определение электрической прочности жидких диэлектриков	2
Итого		16

При проведении лабораторных работ необходимо придерживаться следующего плана:

- 1) При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать технику безопасности, предусмотренную правилами поведения в зале Высоких напряжений
- 2) Перед выполнением работы студенты сдают краткую теорию по выполняемой лабораторной работе.
- 3) Выполнение экспериментальной части лабораторной работы.
- 4) Обработка полученных результатов
- 5) Выводы по проделанной работе.
- 6) Защита полученных результатов.
- 7) Окончательное оформление отчетов.

#### **4. Перечень программных продуктов**

При изучении дисциплины предусматривается использование пакетов прикладных программ Mathcad.

#### **5. Методические указания по применению современных информационных технологий.**

При подготовке к занятиям студенты используют информацию с сайтов отечественных и зарубежных производителей высоковольтных изоляционных конструкций

#### **6. Методические указания профессорско-преподавательскому составу**

Одной из задач преподавателей, ведущих занятия по дисциплине является выработка у студентов осознания важности, необходимости и полезности знания дисциплины для дальнейшей работы их инженерами, специалистами. Методическая модель преподавания дисциплины основана на применении активных методов обучения. Принципами организации учебного процесса являются: активное участие студентов в учебном процессе; проведение практических занятий, определяющих приобретение навыков решения проблемы; приведение примеров применения изучаемого теоретического материала к реальным практическим ситуациям.

Используемые методы преподавания: лекционные занятия с использованием мультимедиа технологий; индивидуальные и групповые задания при проведении лабораторных занятий.

Для более глубокого изучения предмета преподаватель предоставляет студентам информацию о возможности использования по разделам дисциплины Интернет-ресурсов, кафедральной библиотеки.

Содержание занятий определяется календарным планом.

При наличии академических задолженностей по практическим занятиям, связанных с их пропусками преподаватель должен выдать задание студенту в виде задач по пропущенной теме занятия.

Для контроля знаний студентов по данной дисциплине необходимо проводить текущий и промежуточный контроль.

Текущий контроль проводится с целью определения качества усвоения лекционного материала. Наиболее эффективным является его проведение в письменной форме – по контрольным вопросам, тестам и т.п. Контроль проводится в виде сдачи всеми без исключения студентами контрольных заданий – задач во время проведения лабораторных занятий. В материалы письменных опросов студентов включаются и темы, предложенные им для самостоятельной подготовки.

## 7. Комплекты заданий для лабораторных работ

### 1.1 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ, УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА АИИ – 70

(лабораторная работа № 1)

**Цель работы:** изучить устройство аппарат АИИ-70

**Оборудование:**

Аппарат АИИ-70

**Краткая характеристика и область применения аппарата АИИ - 70**

Аппарат АИИ-70 предназначен для испытания повышенным напряжением переменного и выпрямленного тока изоляции электрооборудования с номинальным напряжением до 10 кВ включительно, в том числе силовых кабелей и жидких диэлектриков, а также отдельных элементов опорной и подвесной изоляции в электроустановках 35 - 220 кВ.

Аппарат АИИ - 70 позволяет выполнять следующие испытания и измерения

1) Испытание повышенным напряжением промышленной частоты изоляторов, вводов, измерительных трансформаторов, коммутационной аппаратуры номинальным напряжением до 10 кВ.

2) Испытание повышенным напряжением промышленной частоты 50Гц отдельных элементов подвесной и опорной изоляции номинальным напряжением 35 -220 кВ.

3) Испытание повышенным напряжением промышленной частоты 50Гц изолирующих защитных средств.

4) Измерение токов проводимости разрядников серии РВС и РВМГ и тока утечки разрядников серии РВП, РВО. Измерение пробивного напряжения разрядников серии РВП и РВО.

5) Определение пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков.

**Конструктивное исполнение и комплектность**

Аппарат АИИ - 70 состоит из пульта и выпрямительной приставки. Внутри пульта установлены: пускорегулирующая и сигнальная аппаратура, высоковольтный трансформатор.

На верхнем щите расположена дверца, открывающая доступ к предохранителям. С внутренней стороны дверцы закреплены ключ и щуп для установки стандартного зазора в измерительной ячейке для испытания жидкого диэлектрика. В качестве выпрямляющего устройства в установке применяют полупроводниковые выпрямители. Выпрямитель выполнен из десяти последовательно соединенных кремниевых диодов Д 1007 и допускают пятикратную перегрузку по току в течении 50 мс. Рукоятка регулировки напряжения находится на передней стенке аппарата АИ-70. Контроль напряжения осуществляется при помощи вольтметра установленного на верхней части высоковольтного трансформатора, у которого шкала проградуирована в киловольтах.

Таблица 1.1. Технические данные кремниевых диодов Д1007.

Среднее значение прямого тока, А	Допустимая амплитуда обратного напряжения, В	Прямое падение напряжения при номинальном токе, В	Среднее значение обратного тока при максимальном

			напряжении, мА
0,075	8000	6	0,1

Заземляющая штанга служит для снятия ёмкостного заряда с испытуемого объекта и его заземления.

Технические характеристики

Номинальное напряжение питающей сети однофазного тока частотой 50 Гц, В	220
Наибольшее переменное напряжение, кВ	50
Наибольшее выпрямленное напряжение, кВ	70
Выпрямленный ток со стороны высокого напряжения, мА	5
Выходная минутная мощность высоковольтного трансформатора, кВА	2
Вес аппарата, кг	175
Комплектность:	
1. Пульт управления	1 шт.
2. Выпрямитель	1 шт.
3. Заземляющая штанга	1 комплект.

### Принципиальная, электрическая схема аппарата АИИ-70

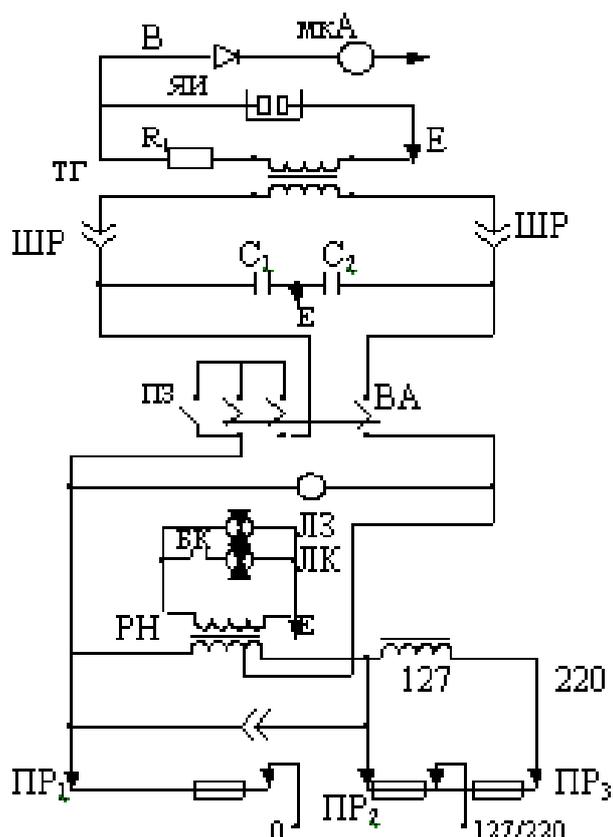


Рис.1.1 Принципиальная схема аппарата АИИ – 70

Инструкция по работе с аппаратом АИИ - 70

1) Прежде чем приступить к испытанию необходимо убедиться что, аппарат и измерительная штанга заземлены.

2) Сборку схем испытания оборудования производит персонал бригады проводящей испытания. Место испытаний, а так же соединительные провода, которые при испытание окажутся под испытательным напряжением, должны быть ограждены от посторонних лиц или у места испытания должен быть выставлен наблюдающий. В

качестве ограждения могут применяться щиты, барьеры, канаты с вывешенными на них плакатами «СТОЙ! ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ»

а) если соединительные провода, находящиеся под испытательным напряжением расположены вне помещения электроустановок напряжением выше 1000 необходимо независимо от ограждения, выставить охрану из одного или нескольких проинструктированных и введенных в наряд лиц с квалификационной группой не ниже 2 для предупреждения об опасности приближения или проникновения за ограждение;

Таблица 1.2.-Условные обозначения и краткая характеристика элементов прической схемы аппарата АИИ - 70.

Обозначение на схеме	Наименование	Характеристика
БК	Блок-контакт	
ВА	Выключатель автоматический	АП-25-3Т; 10А
Е	Заземление	
В	Выпрямитель	Д1007
КВ	Киловольтметр	Переделывается из Э-80
ЛЗ	Лампа сигнальная (зеленая)	А-17, 6В, 3 св.
ЛК	Лампа сигнальная (красная)	А-17, 6В, 3 св.
мкА	Микроамперметр	
ПЗ	Переключатель защиты	ПВ-2-10; 10А; 220В
ПР	Предохранитель	ПР-2; 15А; 220В
РН	Регулятор напряжения	0-100 В
С <sub>1</sub>	Конденсатор	МБГП-1; 200 В; 10 мкф
С <sub>2</sub>	Конденсатор	КЗ; ; 220/500В
ТГ	Трансформатор главный	0,5/50 кВ
R <sub>1</sub>	Сопротивление	ПЭ-150; 30 кОм; 150 Вт
ШР	Штепсельный разъем	
ЯИ	Ячейка измерительная	

б) лицам, назначенным для охраны испытываемого оборудования производителем работ, должны быть даны указания, с какого времени это оборудование рассматриваться как находящееся под напряжением.

3) Включить вилку шнура питания в сеть и стоя на диэлектрическом ковре, включить аппарат. При этом загорается зеленый сигнал, а после нажатия кнопки автомата "ВКЛ" - красный.

4) Плавно вращая рукоятку регулятора напряжения повысить напряжение до испытательного.

Перед подачей испытательного напряжения необходимо:

проверить, что все члены бригады находятся на рабочих местах, посторонние лица удалены, и на оборудование можно подавать испытательные напряжения;

5) Делать предупреждение бригаде фразой «ПОДАЮ НАПРЯЖЕНИЕ» и, только получив подтверждение об услышанной команде, можно снять заземление с высоковольтного вывода испытательной установки и подать напряжение 220 В. С момента снятия заземляющей штанги вся испытательная установка, включая испытываемое оборудование и соединительные провода, считаются под напряжением. производить какие — либо пересоединения в испытательной схеме и на испытательном оборудовании – ЗАПРЕЩАЕТСЯ.

6) После окончания испытания снизить испытательное напряжение до нуля и нажать кнопку "ОТКЛ".

7) Заземлить вывод испытательной установки.

8) После того, как выполнены все эти операции, подается команда словами «НАПРЯЖЕНИЕ СНЯТО». Только после этого можно производить пересоединение проводов от испытательной установки или в случае окончания испытания, отсоединения их и снятия ограждения. Наложение и снятие заземления заземляющей штангой на высоковольтный вывод испытательной установки, подсоединения отсоединения проводов от этой установки к испытываемому оборудованию должны производиться одним и тем же лицом, и выполняться в диэлектрических перчатках.

9) Независимо от заземления вывода испытательной установки лицо, производящее присоединение в испытательной схеме, должно наложить заземление на соединительный провод и изолированные от земли части испытываемого оборудования. Снимать эти заземления можно только после операции по пересоединения. Во время и при пересоединения незаземленные части испытываемого оборудования рассматриваются, как находящиеся под напряжением.

#### **Порядок проведения лабораторной работы**

1) Изучить принципиальную схему и конструкцию аппарата АИИ - 70.

2) Подготовить аппарат АИИ - 70 к работе:

а) рукоятку «Защита» установить в положение «Чувствительная»;

б) подключить при помощи соединительных проводников испытуемый объект, при этом соединительный провод между испытуемым объектом и аппаратом начала должен быть присоединен к заземленному выводу высокого напряжения аппарата АИИ - 70, а затем к объекту испытания.

3) Встав на диэлектрический коврик, включить аппарат, вставив вилку шнура питания в сеть. При этом загорается зелёный сигнал (рис. 2)

На рисунке 2 цифрами обозначены: 1 - ветка 220В; 2 - киловольтметр; 3 - лампочка «зеленый»; 4 - лампочка «красный»; 5 - рукоятка повышения испытательного напряжения; 6 - кнопка «вкл»; 7 - кнопка «выкл»; 8 - ячейка для испытания жидких диэлектриков.

4) Плавно вращая рукоятку регулятора напряжения по часовой стрелке, повысить напряжение до испытательного (отсчет вести по шкале киловольтметра, градуированной в киловольтах максимальных при испытании постоянным напряжением и по шкале в кил

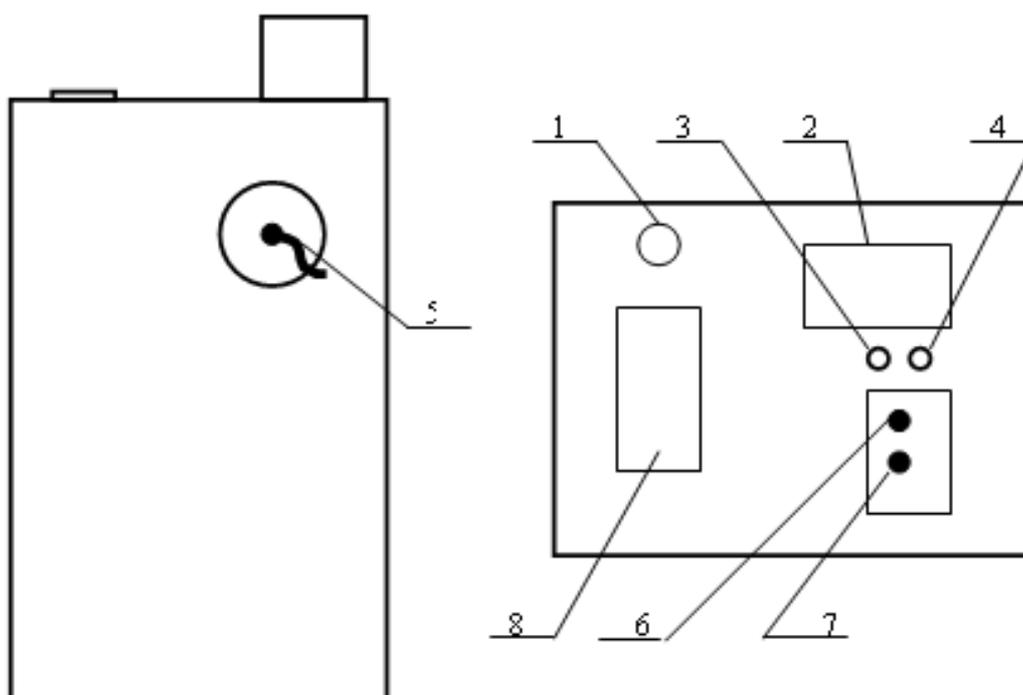


Рис. 1.2 Общий вид аппарат АИИ - 70  
а) вид спереди аппарата АИИ - 70; б) вид сверху аппарата АИИ - 70.

5) После испытания снизить испытательное напряжение до нуля и нажать кнопку «Откл».

6) Поднести стержень заземляющей штанги к выводу высокого напряжения аппарата и снять ёмкостный заряд, а затем заземлить аппарат, повесив заземляющую штангу на ручку выпрямителя или токопровод высокого напряжения.

7) Отключить аппарат, вынуть вилку шнура питания из розетки.

#### ***Правила техники безопасности***

Настоящие Правила ТБ являются обязательными для выполнения

## **1.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ В ПЕРЕМЕННОМ И ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

(лабораторная работа № 2)

***Цель работы:*** экспериментальное исследование разрядных напряжений в воздухе с различной конфигурации электрического поля (однородное, неоднородное).

#### ***Оборудование:***

Аппарат АИИ-70 с выпрямительной приставкой, физическая модель воздушного промежутка.

Характеристика и паспортные данные испытательного оборудования:

1. Аппарат АИИ-70.
2. Высоковольтный-диодный выпрямитель
3. Физическая модель воздушных промежутков.

Физическая модель состоит из электродов разной формы, изолирующего основания и шунтирующего сопротивления. Шунтирующее сопротивление ограничивает ток разряда, защищая трансформатор и выпрямитель от токовых перегрузок возникающих при пробое испытуемого объекта. Выбирается из расчета 1 Ом на 1В, т.е. в нашем случае 70 кОм.

#### ***Краткие теоретические положения***

Работа посвящена изучению основных характеристик электрического разряда при переменном и постоянном напряжении в воздухе при температурах и давлениях воздуха близких к нормальным.

В качестве изоляции между проводами, проводами и опорами воздушных линий электропередачи, внешней изоляции трансформаторов и электрических аппаратов широко используются воздушные промежутки. Знание основных закономерностей возникновения электрических разрядов в воздухе, учёт влияния различных факторов на электрическую прочность воздушных промежутков позволяют получить представления о конструктивном исполнении распределительных устройств.

Явление электрического пробоя в газах объясняется на основе физических представлений об образовании и развитии электронных лавин в процессе ионизации атомов или молекул газа электронами в электрическом поле. Интенсивность процесса ионизации характеризуется коэффициентом ударной ионизации  $a$ , который определяется как число ионизации, совершаемых одним электроном на пути в  $l$  см вдоль силовых линий электрического поля.

В воздухе, как и в других электроотрицательных газах, основным процессом, препятствующим развитию ударной ионизации, является прилипание электронов к нейтральным частицам с образованием отрицательных ионов. Характеристикой этого процесса является коэффициент прилипания  $\eta$ , зависящий от соотношения напряженности поля к давлению  $E/p$  и вида газа и определяемый из экспериментальных данных.

С учётом процессов потерь электронов развитие ударной ионизации в электроотрицательных газах описывается с помощью эффективного коэффициента ударной ионизации

$$\alpha_{y\delta} = \alpha - \eta, \quad (1)$$

где  $\eta$  - коэффициент прилипания.

Для возникновения электрического разряда в газе необходимо, чтобы в межэлектродном промежутке появился хотя бы один электрон в результате действия естественных ионизаторов. В этом случае в сильных электрических полях соударение электрона с нейтральной частицей вызывает ударную ионизацию - образуются два свободных электрона, каждый из которых совершает новые акты ионизации, т.е. возникает лавина электронов. Количество электронов в лавине

$$n = n_0 \exp \left[ \int_0^x \alpha_{y\delta}(E) dx \right] \quad (2)$$

где  $n_0$  - число начальных электронов;  $x$  - путь, пройденный лавиной вдоль силовых линий электрического поля.

Возникновение электронной лавины сопровождается образованием положительных ионов и фотонов, которые, взаимодействуя с поверхностью катода, вызывают появление вторичных электронов, эмитируемых катодом. Такой разряд будет поддерживаться самостоятельно без участия внешних ионизаторов, если положительные ионы и развивающаяся в межэлектродном промежутке лавина своим излучением будут вызывать появление не менее одного нового электрона, который, в свою очередь, будет создавать новую лавину с наименьшим числом электронов.

При повышенном давлении газа разряд развивается в виде канала-стримера. Величина напряжения, при котором в межэлектродном промежутке выполняется условие самостоятельности разряда, называется начальным напряжением  $U_0$ .

Начальные напряжения могут измеряться или рассчитываться с помощью условия самостоятельности разряда. Для расчета начального напряжения необходимо знать закон изменения напряженности электрического поля по длине промежутка. В большинстве изоляционных конструкций высокого напряжения этот закон может быть выражен уравнением

$$E_r = E_{r_0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^m \quad (3)$$

где  $r_0$  - радиус кривизны поверхности электродов, напряженность на поверхности которого  $E_{r_0}$  максимальна;  $r$  - радиус эквипотенциальной поверхности с напряженностью  $E_r$ ;  $m$  - показатель скорости спада напряженности поля. Электрические поля такого типа называют радиальными.

Условие самостоятельности разряда для радиальных электрических полей имеет вид:

$$\int_{r_0}^{r_e} \alpha_{y\delta} dr \geq \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) = K \quad (4)$$

где  $r_e$  - радиус зоны изоляции, определяемый из условия  $\alpha_{y\delta} = 0$ ;

$\gamma$  - ионизационный коэффициент Таусенда.

Зависимость  $\alpha_{y\delta}/S = f(E/S)$  для большинства газов, в том числе и для воздуха при значениях  $\delta$ , близких к единице, можно аппроксимировать формулой

$$\frac{\alpha}{S} = a \left( \frac{E}{S} - b \right)^2 \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  - постоянные для данного газа и  $\delta = \frac{pT}{p_0T_0}$  — относительная плотность воздуха;  $p_0, T_0$  - соответственно давление и температура воздуха при нормальных условиях ( $p_0 = 101300 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 293 \text{ К}$ );  $p, T$  — соответственно давление и температура воздуха в условиях эксперимента;  $S$  - расстояние между электродами, см.  $E/\delta$ . Из (3) с учетом (4) и (5) следует, что

$$\int_{r_0}^{r_0} aS \left[ \frac{E_0}{\delta} \left( \frac{r_0}{r} \right)^m - b \right]^2 dr = K \quad (6)$$

где  $E_0$  - начальная напряженность промежутка, определяемая как наименьшее значение  $E$ , при котором выполняется условие самостоятельности.

Электрические поля в разрядных промежутках делятся на однородные и неоднородные. В однородном электрическом поле напряженность постоянна по всей длине промежутка, при выполнении условия самостоятельности разряда ионизация охватывает весь промежуток ( $a$  - по всей длине промежутка), что приводит к его пробую.

Неоднородные электрические поля принято разделять на квазиоднородные, слабонеоднородные и резконеоднородные в зависимости от того, в каких пределах разрядного промежутка  $a_{эф} > 0$  и в какой форме реализуется разряд при выполнении условия самостоятельности разряда. В квазиоднородном поле  $a_{эф} > 0$  по всей длине промежутка, что приводит к его пробую. В слабонеоднородных полях  $a_{эф} > 0$  в значительной части промежутка, что приводит так же к его пробую. В резконеоднородных полях  $a_{эф} > 0$  в узкой зоне около электрода с радиусом  $r_0$  при выполнении условия самостоятельности пробоя промежутка не происходит, возникает так называемый коронный разряд.

В промежутках с квазиоднородным полем  $r_u = r_0 + S$ , где  $S$  — длина промежутка, и решение уравнения (6) приводит к следующему выражению для начального напряжения:

$$U_0 = \frac{b\delta S}{f} + \sqrt{\frac{K}{a}} \sqrt{\frac{\delta S}{f}} \quad (7)$$

где  $f$  - геометрический фактор, значение которого зависит от  $m$  и  $S/r_0$  см табл. 1. В однородном поле  $f=1$  и

$$U_0 = b\delta S + \sqrt{\frac{K}{a}} \sqrt{\delta S} \quad (8)$$

Для воздуха  $a=0,2 \text{ см/кВ}$ ,  $b=24,5 \text{ кВ/см}$ ,  $K=8,2$ ; тогда  $U_0$ , кВ, для квазиоднородного поля

$$U_0 = 24,5 \frac{\delta S}{f} + 6,4 \sqrt{\frac{\delta S}{f}} \quad (9)$$

и для неоднородного поля (параллельные плоские электроды)

$$U_0 = 24,5\delta S + 6,4\sqrt{\delta S} \quad (10)$$

Сфера-сфера:

$$U_0 = \frac{1}{f} \delta \left( 1 + \frac{0,54}{\sqrt{rS}} \right) d \quad (11)$$

где  $r$  - радиус сферы

При симметрично включенном напряжении

$$f = 0,25 \left[ \frac{d}{r} + 1 + \sqrt{\left( \frac{d}{r} + 1 \right)^2 + 8} \right] \quad (12)$$

При условии  $d/r \ll 2$  формула (12) даёт величину пробивного напряжения промежутка, при  $d/r > 2$  — напряжения начала короны.

Таблица 1.3. Значения геометрического фактора  $f$  от  $S/r_0$ 

$S/r_0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0
$f$	1,03	1,07	1,1	1,15	1,2	1,25	1,31	1,38	1,45	1,52	2,01	2,34

Коаксиальные цилиндры:

$$U_0 = 24,5\delta \left[ 1 + 0,65(\delta R_1)^{-0,38} \right] R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (13)$$

где  $R_1, R_2$  - соответственно радиусы внутреннего и наружного цилиндров.

Формула (13) даёт значение пробивного напряжения промежутка при  $R_2/R_1 < 2,718$  и начального напряжения - при  $R_2/R_1 > 2,718$ . Из анализа выражения (13) следует, что величина  $U_0$  имеет экстремум при  $R_2/R_1 = 2,718$ .

В резко неоднородных несимметричных электрических полях (стержень — плоскость, коаксиальные цилиндры при  $R_2 \gg R_1$ ) при воздействии выпрямленного напряжения величина пробивного напряжения воздушного промежутка зависит от полярности электрода с меньшим радиусом кривизны (эффект полярности). При этом напряжение возникновения короны меньше при отрицательной полярности, а пробивное напряжение - при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны. Объяснение этого эффекта связывается с существенным влиянием поля объёмного положительного заряда ионов у катода на распределение напряженности электрического поля в промежутке.

При отрицательной полярности электрода величина напряженности электрического поля у его поверхности увеличивается за счёт влияния положительного объёмного заряда ионов и уменьшается в глубине промежутка. Это облегчает появление короны у поверхности электрода, но затрудняет процесс прорастания разряда в глубь промежутка (в область слабого поля). При положительной полярности наблюдается обратная картина: поле у поверхности электрода ослабляется, что затрудняет появление короны, а в глубине промежутка усиливается - пробивное напряжение понижается.

Располагая в межэлектродном промежутке диэлектрический барьер, можно повысить электрическую прочность воздушного промежутка при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны. При этом существует оптимальное положение барьера в межэлектродном промежутке, при котором достигается наибольшая электрическая прочность. Барьерный эффект объясняется выравниванием электрического поля между барьером, на котором оседают положительные ионы,двигающиеся вдоль силовых линий электрического поля, и электродом с большим радиусом кривизны. При этом повышение пробивного напряжения промежутка может происходить при незначительной собственной электрической прочности диэлектрического барьера. На величину пробивного напряжения воздушного промежутка оказывает влияние влажность воздуха. Повышение абсолютной влажности приводит к некоторому повышению электрической прочности воздушных промежутков за счёт уменьшения коэффициента ударной ионизации электронами в результате их прилипания к электроотрицательным молекулам водяного пара.[28,29]

### ***Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы.***

См. общие правила по ТБ для зала ВН

### ***Порядок проведения лабораторной работы***

Ознакомиться со схемой установки, расположением её элементов, правилами безопасности при работе на установке. Проводить работу придерживаясь следующих пунктов:

1. Осмотреть аппарат АИИ-70 на предмет целостности заземления.
2. Установить необходимые испытательные образцы на физическую модель или изменить расстояние между образцами.
3. Проверить правильность сборки схемы.

4. Включить вводный автоматический выключатель питающий цепь 380/220 В высоковольтного отсека и магнитный пускатель блокировки.
5. Подсоединить аппарат АИИ-70 к сети через штепсельный разъем.
6. Включить автоматический выключатель аппарата АИИ-70.
7. Плавно со скоростью  $1 \text{ кВ/с}$ . поднять напряжение установки до момента пробоя испытуемых образцов.
8. В момент пробоя произвести отсчет показания вольтметра.
9. Снизить напряжение установки до нуля.
10. Отключить установку от сети и создать видимый разрыв при помощи штепсельного разъема.

11. Отключить вводный автоматический выключатель.

Только после выполнения этих операций можно проводить замену электродов или изменять расстояния между ними. Новый эксперимент выполняется в той же последовательности.

### **Обработка результатов и анализ эксперимента**

1. Рассчитать значения пробивных напряжений  $U_{расч}$  по формулам (10), (11) и (13).
2. Провести пять опытов при переменном напряжении промышленной частоты и экспериментально получить значения пробивного напряжения для промежутков: а) плоскость - плоскость; б) сфера - сфера; в) стержень - стержень; г) стержень - плоскость; д) коаксиальные цилиндры.
3. Результаты занести в табл. 1.4.
4. По данным табл. 1.4 построить графические зависимости  $U_w = f(S)$
5. Сопоставить результаты с расчётными.
6. Экспериментально получить значения пробивного напряжения для промежутка стержень - плоскость при положительной полярности стержня и при отрицательной полярности.
7. Результаты занести в табл. 1.4.
8. По данным табл. 1.4 построить графические зависимости  $U_{np} = f(S)$
9. Сопоставить результаты с расчётными.
10. При положительной полярности стержня установить расстояние  $3 \text{ см}$  между стержнем и плоскостью и ввести в промежуток диэлектрический барьер ( $h$  -расстояние от стержня до барьера) при значениях:  $h = 1 \text{ см}$ ;  $2 \text{ см}$ ;  $3 \text{ см}$ ,  $4 \text{ см}$ . экспериментально получить значения пробивного напряжения
11. Результаты занести в табл. 1.5.

Таблица 1.4 Значения пробивного напряжения для промежутка стержень - плоскость

Форма электродов	$U_{пр.и}$ , кВ при расстоянии между электродами, см				$U_{пр. ср.}$ , кВ	$E_{np.cр.} = \frac{U_{np.cр.}}{S}$ , кВ/мм
	1	2	3	4		

12. По данным табл. 1.4 построить графические зависимости  $U_{np} = f(h)$ .

Таблица 1.5 значения пробивного напряжения для промежутка стержень – плоскость при наличии барьера

Форма электродов	$U_{пр.и}$ , кВ при расстоянии между барьером и плоским электродами, см					$U_{пр. ср.}$ , кВ	$E_{np.cр.} = \frac{U_{np.cр.}}{S}$ , кВ/мм
	0	1	2	3	4		

13. Сопоставить результаты с расчётными.

#### **План составления отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.

2. Цель работы.

3. Краткую информацию о развитии разряда в воздушном промежутке.

Определение начального напряжения и напряжения пробоя.

4. Краткое описание установки, используемой в работе, ее электрической схемы.

5. Таблицы и графики измерений и результаты вычислений.

6. Выводы по работе.

#### **Перед началом выполнения работы студенты должны:**

1. Сдать преподавателю для проверки отчет по предыдущей лабораторной работе

2. Получить допуск по теоретической части ТБ у преподавателя.

#### **Контрольные вопросы**

1. Какой разряд называется самостоятельным?

2. Что означают понятия начального напряжения и напряжения полного разряда?

3. Что такое лавина электронов?

4. Что такое стример?

5. Какой разряд называют коронным?

6. Какое электрическое поле называют квазиоднородным, слабонеоднородным и резконеоднородным?

7. При какой полярности стержня промежутка стержень - плоскость пробивное напряжение выше? Почему?

8. При каком положении диэлектрического барьера пробивное напряжение промежутка стержень - плоскость наибольшее?

9. Что такое коэффициент ударной ионизации?

10. Приведите примеры электроотрицательных газов.

### **1.5 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗОЛЯТОРОВ**

(лабораторная работа № 5)

**Цель работы:** Изучить конструкционные особенности высоковольтной изоляции линейных, опорных и проходных изоляторов.

#### **Оборудование:**

Стенд и демонстрационный лист с изоляторами.

#### **Краткие теоретические положения**

В зависимости от назначения и конструктивного исполнения, изоляторы разделяются на: линейные, опорные и проходные. Кроме того, изоляторы различаются также по роду установки (внутренней и наружной) и условиям эксплуатации (для районов с нормальным или с повышенным уровнем загрязнения).

Исходя из этого, изоляторы должны иметь определенные электрические и механические характеристики, причем, наиболее высокие требования предъявляются к линейным высоковольтным изоляторам, устанавливаемым на открытом воздухе в районах с повышенной загрязненностью атмосферы (уносами промышленных предприятий и котельных, отложениями морских солей и др.).

Необходимые механические характеристики изоляторов обеспечиваются за счет применения материалов с соответствующей механической прочностью - электротехнического фарфора, электроизоляционного стекла, ковкого и высокопрочного чугуна, а также за счет создания надежных конструкций силового узла.

Высокие электрические характеристики изоляторов обеспечиваются путем видоизменения и совершенствования классических форм изолирующих элементов (тарелки, юбки и др.) в направлении увеличения расстояния утечки за счет развития поверхности и придания изоляторам оптимальной геометрической формы, способствующей самоочистке от загрязнений.

Изоляторы как самостоятельные конструкции имеют свою внутреннюю и внешнюю изоляцию. Внутренняя изоляция, которая при пробое разрушается необратимо, выполняется более прочной, чем изоляция внешняя, поэтому разрядные характеристики изоляторов определяются электрической прочностью их внешней изоляции. В наиболее сложных условиях находится внешняя изоляция изоляторов наружных установок, поверхность которых может загрязняться, увлажняться дождем или другими видами осадков. Обеспечить высокие разрядные напряжения изоляторов могут сильно развитые поверхности, т.е. ребра, вылеты или наплывы, которые резко снижают напряженность электрического поля в области провода или шины и поэтому увеличивают разность потенциала перекрытия по изоляции. Число, форма и размеры ребер или вылетов основные конструктивные параметры изоляторов, от которых зависят их эксплуатационные характеристики. При правильно выбранных размерах и форме вылетов развивающийся вдоль поверхности канал разряда отрывается от нее и не оказывает теплового воздействия на изоляцию.

*Опорные изоляторы* в зависимости от назначения и класса напряжения могут быть сплошными (опорно-стержневые изоляторы), с внутренней полостью (изоляторы серии ОФ для внутренней установки), составными (штыревые изоляторы) и иметь квадратный, круглый или овальный фланцы или арматуру, армируемую в теле фарфора. Опорные изоляторы серии ОФ для внутренней установки выпускаются на номинальные напряжения 1, 6, 10, 20 и 35 кВ, имеют форму усеченного конуса с внутренней полостью и снабжены одним или несколькими короткими ребрами.

Металлический фланец (круглый, овальный или прямоугольный) и колпачок армированы цементом с применением компенсирующих промазок и прокладок. Необходимость установки в комплектных экранированных токопроводах опорных изоляторов, имеющих уменьшенные размеры и массу, а так же обеспечивающих надежную работу в условиях выпадения росы, привела к созданию ребристых опорных изоляторов серии ОФР на номинальные напряжения 10, 20, 110 кВ. У этих изоляторов металлические элементы для крепления токоведущих частей армированы в теле фарфора. Опорно-стержневые изоляторы выпускаются на номинальные напряжения 10, 20, 110 кВ и предназначены для установки на открытом воздухе.

Изоляторы должны выдерживать испытательное напряжение частоты 50 Гц в условиях выпадения росы, а также наибольшее рабочее напряжение при выпадении инея с последующим его оттаиванием. К изоляторам предъявляется требование выдерживать в течение 15 с, испытательное усилие на изгиб, равное  $70 \pm 1$  % номинального разрушающего усилия.

Арматура (фланцы) изоляторов изготавливаются из чугуна или стали. Компенсация в местах армировки достигается покрытием поверхности фарфора и арматуры, соприкасающихся с армирующим составом, слоем битумного лака и установкой прокладок из картона или паронита между торцами фарфорового стержня и днищем арматуры (фланца). Для придания влагостойкости армировка покрывается слоем лака. Опорно-штыревые изоляторы выпускаются на номинальные напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ и устанавливаются, как правило, в открытых распределительных устройствах с нормальной и загрязненной атмосферой: категории А, Б и В. Армирование фарфоровых элементов между собой и с металлической арматурой производится цементом с толщиной армированного шва не менее 2 мм. Между металлическим колпаком, фарфоровыми элементами и штырем устанавливаются эластичные прокладки толщиной не менее 1 мм. Соприкасающиеся с цементной связкой поверхности фарфора и арматуры покрываются слоем компенсирующей промазки из раствора битума. Между краями металлического колпака и фарфоровых элементов должен быть обеспечен зазор не менее 2 мм. Внешнее покрытие армировочного шва осуществляется раствором битума в бензине

*Опорные стержневые изоляторы.* Наиболее простую форму имеют изоляторы стержневого типа для закрытых распределительных устройств. Изолятор (рис. 1.8, а)

представляет собой полое фарфоровое тело почти цилиндрической формы. Верхняя часть изолятора выполнена сплошной, для предотвращения разрядов во внутренней полости. Фарфор с помощью цемента армирован вниз) чугунным фланцем, а наверху чугунной шапкой.

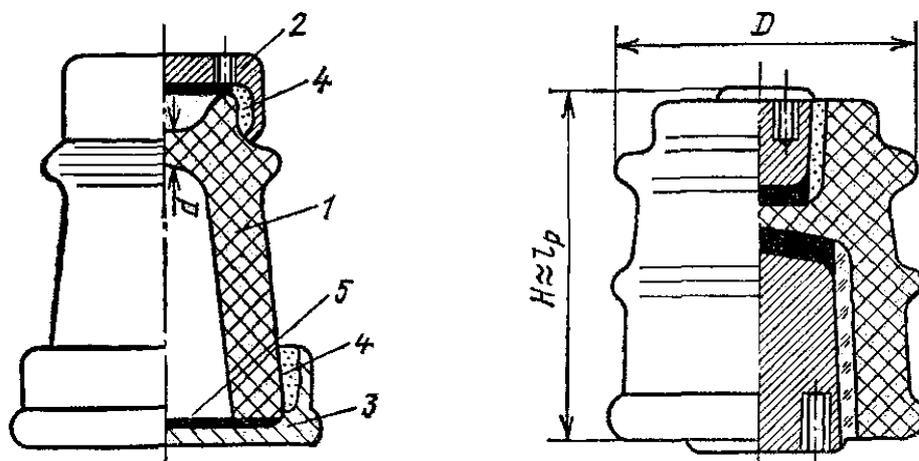


Рис 1.8 Опорные стержневые изоляторы типа ОФ для внутренней установки на напряжение 6 кВ. Разрушающая нагрузка на изгиб 3750 Н.

а — без внутреннего экрана; б — с внутренней заделкой арматуры.

Улучшение разрядных характеристик опорного изолятора может быть достигнуто с помощью внутреннего экрана, уменьшающего напряженность электрического поля у шапки. На рис. 1.9 показана зависимость разрядного напряжения от длины внутреннего экрана при импульсных напряжениях обеих полярностей. При положительной полярности напряжение, наоборот, растет по мере увеличения длины экрана, так как при этом уменьшается напряженность поля у шапки. При отрицательной полярности разрядное напряжение, напротив, снижается. Продвижение разряда от отрицательного электрода в резконеоднородном поле сильно затруднено, поэтому разряд развивается от положительного электрода, т. е. от заземленного фланца, даже если напряженность около него значительно меньше, чем у шапки. По мере удлинения внутреннего экрана напряженность у фланца возрастает и в связи с этим разрядное напряжение уменьшается.

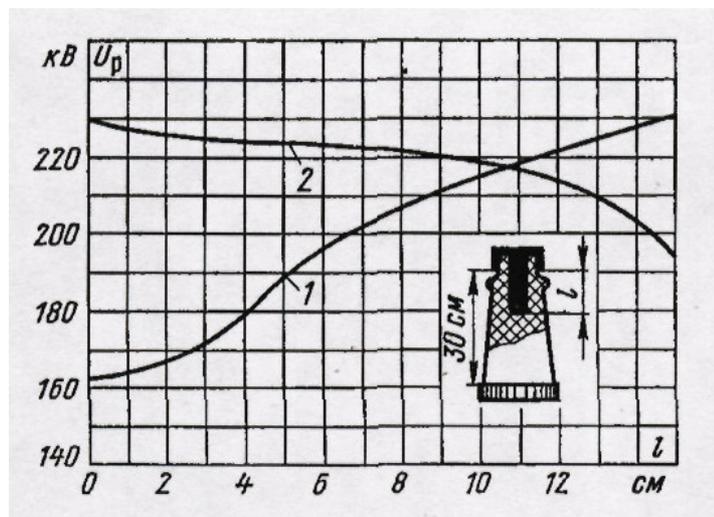


Рис. 1.9 Зависимость 50%-ного импульсного разрядного напряжения по поверхности опорного изолятора от длины внутреннего электрода (данные Г. А. Лебедева — ВЭИ) 1— импульс +1,2/50 мкс; 2 — импульс -1,2/40 мкс.

Целесообразная длина внутреннего экрана соответствует равенству разрядных напряжений при обеих полярностях. Роль внутреннего экрана в опорных изоляторах выполняют металлические элементы внутренней заделки арматуры. Изолятор такой конструкции имеет меньшие размеры и массу. Для повышения разрядного напряжения на теле изолятора делается ребро, которое заставляет разряд развиваться под углом к силовым линиям поля, т. е. по пути с меньшей напряженностью. Наибольшее повышение разрядного напряжения наблюдается в том случае, когда ребро находится у электрода, с которого развивается разряд. При положительной полярности таким электродом является шапка, при отрицательной - фланец. Поскольку у опорных изоляторов разрядное напряжение при положительной полярности шапки значительно меньше, чем при отрицательной полярности, ребро необходимо располагать вблизи шапки.

Стержневые опорные изоляторы внутренней установки выпускаются на номинальные напряжения до 35 кВ и имеют механическую прочность (минимальную разрушающую нагрузку) на изгиб от 3750 до 42500 Н. Изоляторы с более высокой механической прочностью имеют больший диаметр. В обозначении этих изоляторов указываются их тип и материал, номинальное напряжение и механическая прочность в килограмм-силах. Например, ОФ-3 5-750 — опорный фарфоровый на 35 кВ, механическая прочность 7,5 кН.

Стержневые опорные изоляторы для наружной установки отличаются сильно развитой поверхностью. На напряжения 35—110 кВ такие изоляторы изготавливаются в виде сплошного фарфорового стержня с равномерно расположенными ребрами. Обозначение, например, ОНС-110-1000 расшифровывается следующим образом опорный, наружной установки, стержневой на 110 кВ с механической прочностью 10 кН.

*Опорные штыревые изоляторы.* С увеличением номинального напряжения и высоты изолятора растут изгибающие моменты, и прочность изоляторов стержневого типа оказывается недостаточной. Не обеспечивают они необходимую прочность и в установках с относительно низкими напряжениями, но с большими токами к з.

Лучшими механическими характеристиками обладают изоляторы штыревого типа. Их отличительной особенностью является использование тонкостенного фарфора, электрическая и механическая прочность которого растет с уменьшением толщины и применением стального штыря, воспринимающего на себя основную часть изгибающего усилия

На рис. 1.10 показан опорный штыревой изолятор типа ОНС-10-500 наружной установки на напряжение 10 кВ с минимальной разрушающей нагрузкой на изгиб 5 кН.

Механическая прочность изолятора такого типа определяется прочностью его штыря, а не изоляционного тела, так как изгибающий момент, действующий на фарфоровую часть, из-за малого плеча, оказывается много меньше изгибающего момента, приложенного к штырю. Достаточно большая длина утечки и высокое мокроразрядное напряжение изолятора обеспечиваются за счет ребер. Изоляторы такого типа на напряжение 35 кВ (рис. 1.11) имеют две фарфоровые части, соединенные между собой цементом.

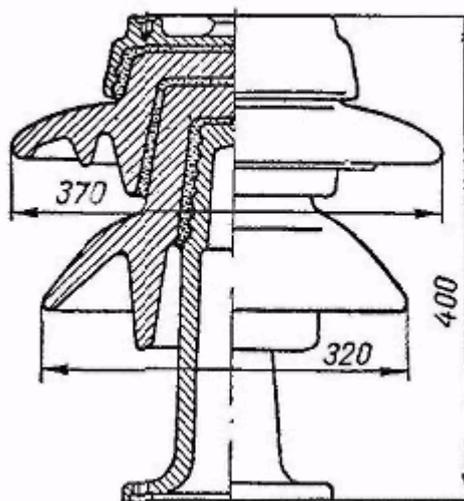


Рис 1.10. Штыревой опорный изолятор типа ОНШ на напряжение 10 кВ. 1 — штырь, 2 — фарфор, 3 — шапка, 4 — цемент

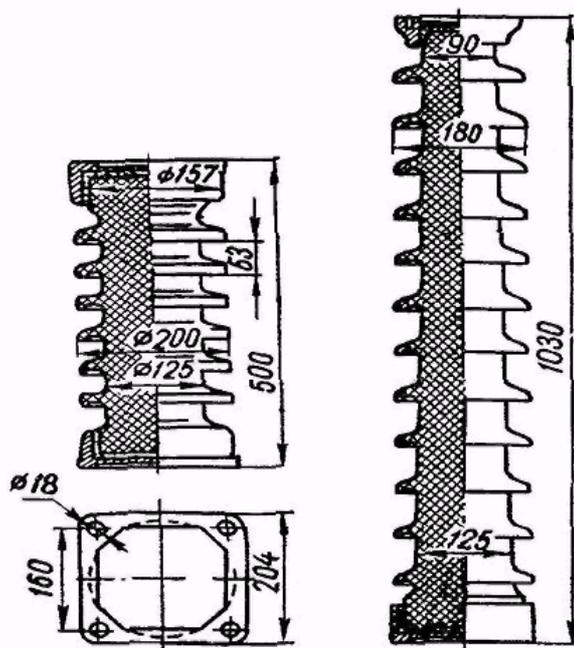


Рис. 1.11. Опорные стержневые изоляторы типа ОНС для наружной установки а) - на 35 кВ, б)-на110 кВ.

У изоляторов для районов с повышенной загрязненностью атмосферы ребра выполняются с более развитой поверхностью для увеличения пути утечки.

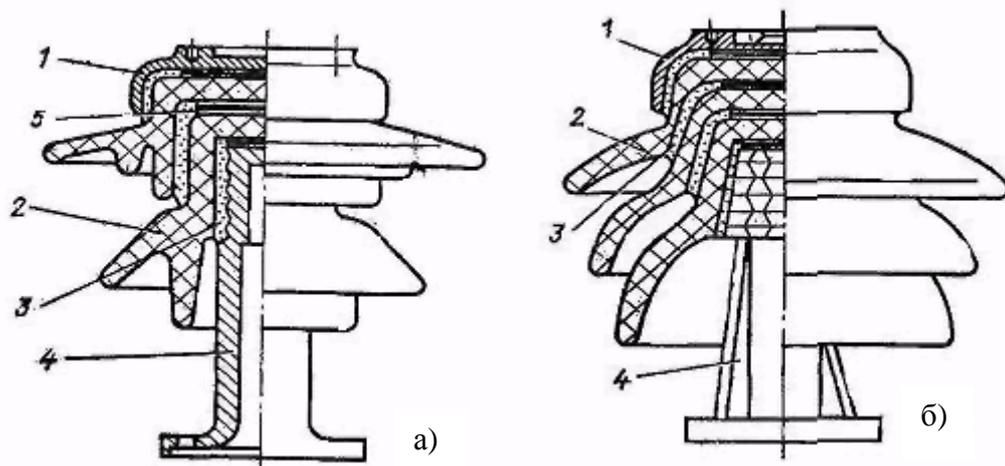


Рис. 1.12. Опорно штыревые изоляторы для районов с повышенной загрязненностью атмосферы а)-ОШНЗ-10, б) ОШНЗ-35

В установках на напряжение 110 кВ и выше используются колонки, состоящие из нескольких, установленных друг на друга опорно штыревых изоляторов на напряжение 35 кВ. При большой высоте колонки на фарфоровую часть нижнего изолятора действует почти такой же изгибающий момент, как и на штырь. Поэтому слабым местом здесь является фарфоровое тело нижнего изолятора. Чтобы увеличить допустимые нагрузки на изгиб для всей колонки, фарфоровое тело изолятора выполняют не из двух, а из трех более тонких и, значит, более прочных частей (рис. 1.12, б).

Одиночные колонки из трех - пяти изоляторов применяются в установках с напряжением до 220 кВ. При более высоких напряжениях используются в основном опорные конструкции в виде треноги, состоящей из нескольких колонок. Изоляторы в таких конструкциях работают не только на изгиб, но и на растяжение и сжатие

*Проходные изоляторы.* Типичные конструкции проходных изоляторов на напряжения 6 и 35 кВ для внутренней и наружной установки показанной на рисунке 1.13.

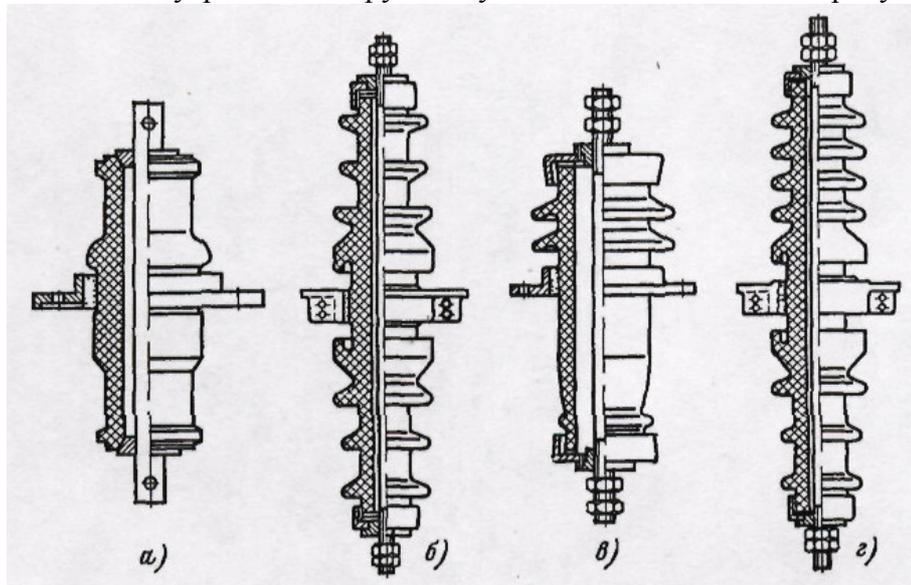


Рис. 1.13. Проходные изоляторы, а, б- типа П для внутренней установки; (а, в- на 6 кВ), в, г- типа ПН для наружной установки (б, г - на 35 кВ).

Они состоят из изоляционного фарфорового тела, токоведущего стержня и фланца, с помощью которого изолятор укрепляется на стене, перекрытии или ограждении.

Проходные изоляторы, как и изоляторы других типов, конструируют так, чтобы пробивное напряжение их внутренней изоляции превышало разрядное напряжение по

поверхности. Для изоляторов на номинальные напряжения до 35 кВ требуемую величину пробивного напряжения можно получить при относительно малой толщине фарфора. Однако при этом получается большая удельная поверхностная емкость и облегчается развитие разряда по поверхности. Учитывая слабую зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами по поверхности, в этих условиях пришлось бы неоправданно увеличить длину изолятора, чтобы обеспечить требуемое напряжение перекрытия.

Сокращение длины изолятора без снижения его разрядного напряжения достигается путем уменьшения удельной поверхностной емкости за счет увеличения толщины изоляции или диаметра фланца. Поскольку развитие разряда начинается от фланца, то достаточно увеличить диаметр только в этой части изолятора.

Между токоведущим стержнем и изоляционным телом в фарфоровых изоляторах остается воздушная полость. При напряжении, близком к разрядному, в полости происходит ионизация воздуха, что приводит к увеличению поверхностной емкости и некоторому снижению напряжения перекрытия. Это обстоятельство хотя и вызывает необходимость дополнительного увеличения толщины фарфора, однако мало влияет на размеры проходных изоляторов на напряжения до 20 кВ

В проходных изоляторах на напряжение 35 кВ токоведущий стержень покрывают слоем бакелизированной бумаги толщиной 3—6 мм. Это увеличивает напряжение возникновения короны примерно в 2 раза и способствует повышению разрядного напряжения. Существенное увеличение разрядного напряжения изоляторов на 35 кВ дают ребра, особенно расположенные вблизи фланца, которые затрудняют развитие разряда, уменьшая удельную поверхностную емкость и направляя разряд по пути с меньшей напряженностью электрического поля

Проходные изоляторы для наружной установки отличаются более развитой поверхностью той части изолятора, которая располагается вне помещения (рис. 1.13, в, г).

В обозначении проходных изоляторов, кроме номинального напряжения и минимальной разрушающей нагрузки на изгиб, оказывается номинальный ток. Например, изолятор внутренней установки на 10 кВ, 400 А и 7,5 кН обозначается следующим образом Л-10/400-750.

Проходные изоляторы на более высокие напряжения (вводы) имеют значительно более сложную конструкцию и будут рассмотрены отдельно.

*Линейные изоляторы*, применяемые для крепления проводов воздушных линий электропередачи, делятся по своей конструкции на штыревые, подобные опорным штыревым, и подвесные. Последние, в свою очередь, подразделяются на изоляторы тарельчатого типа и стержневые.

Линейные изоляторы испытывают механические нагрузки, которые создаются натяжением проводов и зависят от сечения проводов и длин пролетов между опорами, от температуры проводов, силы ветра и других факторов. Для штыревых линейных изоляторов эти нагрузки являются главным образом изгибающими. Подвесные изоляторы благодаря шарнирному креплению подвергаются только растягивающим усилиям.

1. Штыревые изоляторы. Наиболее широко применяемый на линиях с напряжением 6 кВ фарфоровый изолятор типа ШФб показан на рис. 1.14 а.

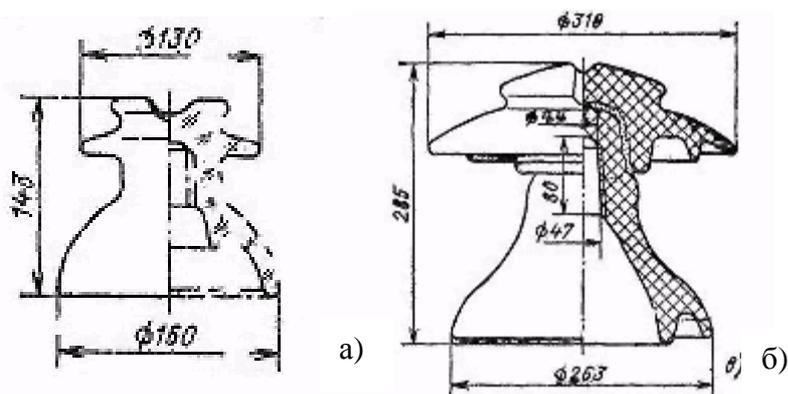


Рис. 1.14. Штыревые линейные изоляторы типа ШФ а – на 6 кВ, б – на 35 кВ

Аналогичную конструкцию имеют фарфоровый (ШФ10) и стеклянный (ШС10) изоляторы на 10 кВ. Провод крепится на верхней или боковой бороздке изолятора с помощью проволоочной вязки или специальных зажимов. Сам изолятор навертывается на металлический штырь или крюк, закрепленный на опоре. Чтобы крюк не поворачивался в опоре при натяжении провода, ему придается такая форма, что ось провода и ось ввертываемой в опору части крюка лежат в одной плоскости. При этом натяжение провода не создает вращающего момента относительно оси крюка.

Гнездо с резьбой для ввертывания штыря или крюка углублено в тело изолятора настолько, что верхняя часть штыря или крюка оказывается на уровне шейки изолятора. Этим достигается уменьшение изгибающего момента, действующего на тело изолятора. Механическая прочность штыревых изоляторов характеризуется минимальной разрушающей нагрузкой на изгиб.

При дожде внешняя часть поверхности изолятора оказывается полностью смоченной водой. Сухой остается лишь его нижняя поверхность, поэтому почти все напряжение оказывается приложенным между концом внешнего ребра и штырем. Изоляторы типа ШФ20 на напряжение 20 кВ и ШФ35 на напряжение 35 кВ (рис. 1.14, б) в целях получения необходимых электрической и механической прочностей выполняются из двух фарфоровых частей, склеиваемых цементным раствором.

2. Подвесные изоляторы тарельчатого типа. На линиях 35 кВ и более высокого напряжения применяются преимущественно подвесные изоляторы тарельчатого типа. Путем последовательного соединения таких изоляторов можно получить гирлянды на любое номинальное напряжение. Применение на линиях разного класса напряжения гирлянд из изоляторов одного и того же типа значительно упрощает организацию их массового производства и эксплуатацию. Как уже отмечалось, из-за шарнирного соединения изоляторы в гирлянде работают только на растяжение. Однако сами изоляторы сконструированы так, что внешнее растягивающее усилие вызывает в изоляционном теле в основном напряжения сжатия и среза. Тем самым используется весьма высокая прочность фарфора и стекла на сжатие.

Основу изолятора составляет фарфоровое или стеклянное тело — тарелка (рис. 1.15), средняя часть которой, вытянутая кверху, называется головкой. На головке крепится шапка из ковкого чугуна, а в гнездо, расположенное внутри головки, заделывается стальной стержень. Армирование изолятора, т. е. механическое соединение изоляционного тела с металлической арматурой, выполняется при помощи цемента.

Соединение изоляторов в гирлянду осуществляется путем введения утолщенной головки стержня в специальное ушко на шапке другого изолятора и закрепления его замком. Длина стержня делается минимальной но достаточной для удобной сборки гирлянды.

Механическую нагрузку несут в основном головка изолятора и прежде всего ее боковые опорные части. Поэтому конструкции тарельчатых изоляторов различаются в первую очередь формой головки.

На рис. 1.15, а показан изолятор с конической головкой. При приложении к такому изолятору растягивающей нагрузки, направленной вдоль оси изолятора, цементное тело конической формы, расположенное в гнезде головки, работает как клин, стремящийся расширить головку изолятора. Внешняя поверхность головки, имеющая форму конуса, также образует клин, который сжимается при вдавливании в цементную прослойку между шапкой и головкой. В результате фарфор в боковых стенках головки испытывает в основном напряжение сжатия.

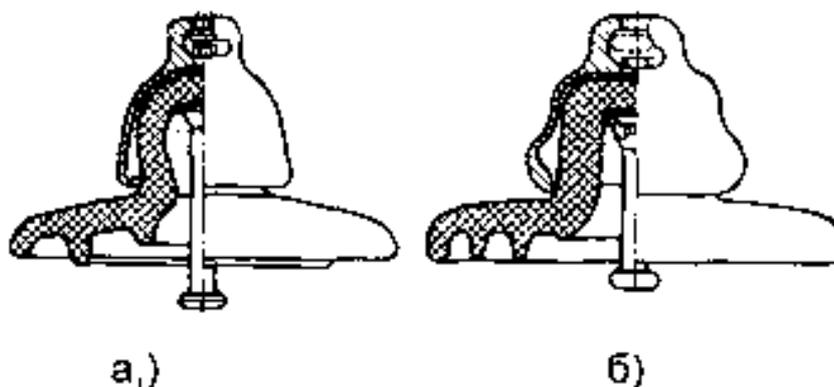


Рис. 1.15. Подвесные изоляторы тарельчатого типа, а — с конической головкой, б — с цилиндрической головкой

Коэффициент температурного расширения у цемента выше, чем у фарфора. Поэтому, чтобы при изменениях температуры в головке не возникали опасные механические напряжения, предусмотрена возможность некоторого перемещения фарфора относительно цемента. С этой целью наружные и внутренние поверхности головки выполняются гладкими, глазурованными и с ними цемент не схватывается. Кроме того, для уменьшения силы трения между соприкасающимися поверхностями угол конусности головки делается достаточно большим (не менее  $10\text{--}13^\circ$ ).

Недостатком изоляторов с конической головкой являются относительно большие размеры шапки, что неблагоприятно сказывается на разрядных характеристиках гирлянд. Помимо этого, так называемая обратная конусность головки не позволяет изготавливать изоляторы высокопроизводительным методом штамповки.

Несколько меньше размеры шапки у изоляторов с цилиндрической головкой. Точнее, головка у этих изоляторов имеет небольшую прямую конусность, облегчающую процесс штамповки изоляционного тела. Для прочного закрепления шапки боковые поверхности головки покрывают фарфоровой крошкой, которая при обжиге прочно спекается с фарфором. Компенсация температурных деформаций и устранение механических напряжений, обусловленных различием коэффициентов температурного расширения фарфора и цемента, достигаются путем покрытия поверхности головки битумным составом.

Размеры и форма фарфоровой тарелки у изоляторов с конической и цилиндрической головками одинаковы. Верхняя, гладкая поверхность тарелки наклонена под углом  $5\text{--}10^\circ$  к горизонтали для того, чтобы обеспечить стекание дождевой воды. Край тарелки изогнут вниз и образует так называемую капельницу, не допускающую возникновения непрерывного потока воды с верхней поверхности изолятора на нижнюю. Нижняя поверхность тарелки сделана ребристой для увеличения длины утечки по поверхности и повышения мокро разрядного напряжения. Изоляторы, предназначенные для работы в загрязненных районах, имеют существенно более сложную форму (рис. 1.16).

Конструкция стеклянных изоляторов аналогична рассмотренным. В связи с тем, что коэффициенты температурного расширения стекла, цемента и арматуры приблизительно одинаковы, в стеклянных изоляторах отсутствует битумная промазка.

Важное достоинство изоляторов тарельчатого типа состоит в том, что при повреждении изоляционного тела, например в случае пробоя под шапкой, механическая прочность изолятора и, следовательно, всей гирлянды не нарушается. Благодаря этому пробой изолятора в гирлянде не приводит к падению провода на землю.

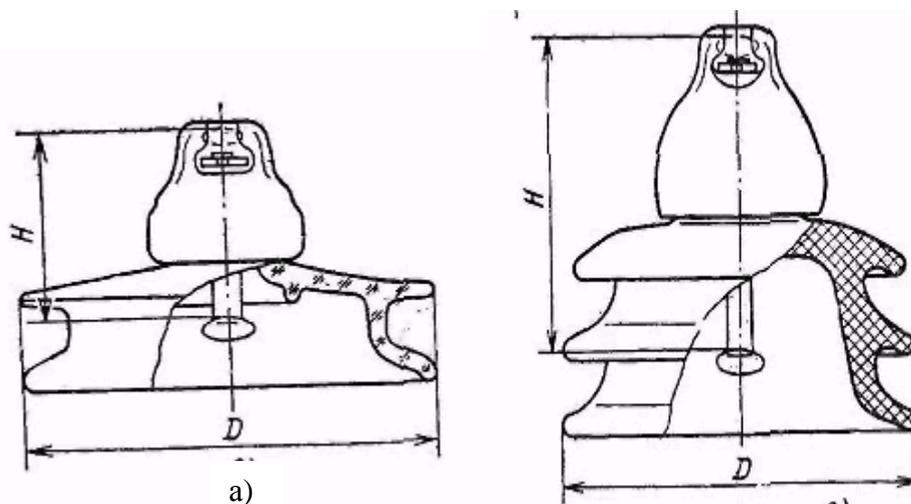


Рис. 1.16. Подвесные изоляторы тарельчатого типа для рай <sup>б)</sup> ; с загрязненной атмосферой, а — типа ПФГ 6 для натяжных гирлянд, б типа ПФГ-5А для поддерживающих гирлянд

Проверка механической прочности тарельчатых изоляторов проводится при плавном увеличении механической нагрузки и одновременном воздействии напряжения, составляющего 75—80% сухо разрядного. При этом механические повреждения изоляционного тела под шапкой обнаруживаются по электрическому пробое. Величина механической нагрузки, повреждающей изолятор при таком испытании, называется электромеханической прочностью изолятора. Эта характеристика указывается в обозначении изолятора. Например, ПФ6 — подвесной фарфоровый с электромеханической прочностью 60 кН; ПС 16 — подвесной стеклянный на 160 кН; ПСГ-22 — подвесной стеклянный для районов с загрязненной атмосферой на 220 кН. Подвесные изоляторы тарельчатого типа выпускаются с электромеханической прочностью от 60 до 400 кН. 2. Подвесные стержневые изоляторы представляют собой фарфоровый стержень с ребрами, армированный на концах двумя металлическими шапками при помощи цементного раствора (рис. 1.17). Для прочного соединения шапок с фарфором концы стержня, а также внутренние опорные поверхности шапок имеют коническую форму.

Диаметр фарфорового стержня выбирается в зависимости от требуемой механической прочности с учетом того, что фарфор при такой толщине имеет прочность на растяжение 1300—1400 Н/см<sup>2</sup>.

Применение стержневых изоляторов дает значительную экономию металла за счет уменьшения числа шапок, уменьшение массы и главное, длины изоляционной конструкции, на которой крепится провод. Недостатками изоляторов этого типа являются возможность их полного разрушения и падения провода на землю или заземленные конструкции. Ограничивает их применение также сравнительно невысокая механическая прочность.

Из-за большой длины пути утечки, а также относительно простой формы, обеспечивающей хорошую очистку поверхности дождем и ветром, стержневые изоляторы весьма перспективны для районов с загрязненной атмосферой. [36]

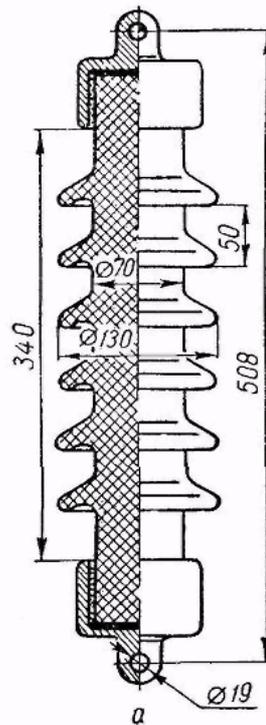


Рис. 1.17. Стержневой подвесной изолятор СТ-110 на 110 кВ.

*Полимерные изоляторы*, обладая всеми преимуществами стержневых изоляторов, приобрели дополнительно чрезвычайно важную характеристику: механическую неразрушаемость под воздействием рабочих и аварийных нагрузок и даже в случае обстрела изоляторов дробью или пулями.

В качестве основного несущего элемента, воспринимающего механические нагрузки используется однонаправленный стеклопластиковый стержень, состоящий из десятков тысяч тончайших стеклянных волокон, обладающая высокой механической прочностью.

В качестве связующего элемента используются обычно эпоксидные и полиэфирные смолы. Для увеличения разрядных характеристик изолятора и защиты поверхности стеклопластикового стержня от электрического трека на стержне армируются ребра. Ребра могут формироваться на стержне путем отливки в пресс-формах, и в процессе формовки обеспечивается механическая связь ребер со стержнем. При другом варианте ребра формируются отдельно и армируются на стержне методом сварки, спекания или склеивания.

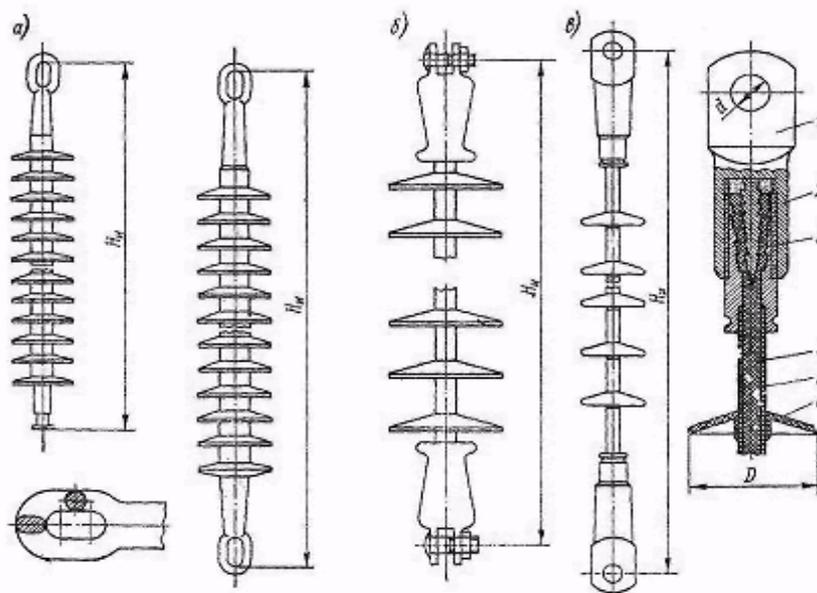


Рис. 1.18. Конструкция полимерных изоляторов а) - с тарелками из этиленпропиленовых мономеров, б) - с развитой поверхностью из кремнийорганической резины, в) - конструкции ЛПИ им. М.И. Калинина с фторопластовым защитным покрытием стержня и фторопластовыми ребрами.

Конструкция:

1. - стальной наконечник изолятора с пружиной;  
 2. - стальная гильза с наружной резьбой и внутренним ступенчатым коническим отверстием;

3. - стальной клин со ступенчатыми скосами;

4. - стеклопластиковый стержень;

5. - защитное покрытие из фторопласта;

6. - тарелка из фторопласта, приваренная к покрытию.

Ребра обычно изготавливают из фторопласта, кремнийорганических эластомеров, этиленпропиленовых полимеров или циклоалифатических смол.

Перед созданием разветвленной ребристой поверхности несущий стержень может быть предварительно защищен трубчатой оболочкой из фторопласта, защищающей поверхность стержня от химического и электрического разрушения.

Концы несущего стержня армируются металлическими оконцевателями для присоединения изоляторов к опорам или комплектования гирлянд. Оконцеватели армируются либо методом опрессовки, либо насаживанием их на стержень с последующим расклиниванием.

Граничный слой между стержнем и оболочкой или ребрами является наиболее слабым местом конструкции с точки зрения воздействия высокого напряжения. С целью повышения электрической прочности, пространство между стержнем и ребрами или оболочкой заполняется специальными герметиками.

Используя описанный принцип создания стержневых полимерных конструкций, можно изготовить изолятор практически любой длины, рассчитанный на любой класс напряжения и нагрузки. С учетом существенного сокращения массы полимерных изоляторов по сравнению с эквивалентными по длине гирляндами тарельчатых изоляторов их использование имеет особое значение при проектировании и сооружении линий СВН.

Однако полимерные изолирующие конструкции имеют свои недостатки: до сих пор не вполне изучена возможность долговременной надежной эксплуатации под воздействием атмосферных условий и электрического поля. [30]

**Порядок проведения лабораторной работы**

1. Зарисовать эскизы предложенных изоляторов, дать основные размеры и тип, затем найти их на стенде.

2. При помощи справочной литературы дать расшифровки букв и цифр предложенных изоляторов. Нарисовать эпюру механических нагрузок на тело изоляции тарельчатого изолятора с конической головкой.

3. Для указанных преподавателем изоляторов написать область применения, достоинства и недостатки.

4. Произвести краткий сравнительный анализ стеклянных, фарфоровых и полимерных изоляторов.

#### ***План составления отчета***

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.

2. Цель работы.

3. Выполнить пункты 1-4 (*Порядок проведения лабораторной работы*)

4. Сделать выводы по работе.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Как увеличить разрядное напряжение проходного, опорного и подвешного изоляторов, не изменяя их строительных размеров?

2. С какой целью выполняется глазуровка изоляции?

3. Опишите основные электрические и механические характеристики подстанционной и линейной изоляции.

4. Каким профилактическим испытаниям подвергается изоляция для внешнего и внутреннего исполнения?

5. Как исключить коронное явление в области изолятора у провода или шины?

6. Какие материалы используются для подвесных изоляторов ?

7. Какими особенностями обладают полимерные изоляторы по сравнению с фарфоровыми и стеклянными?

8. Каким происходит сборка гирлянды подвесных изоляторов ?

9. Особенности конструкции подвесных изоляторов

10. Устройство проходного изолятора

### **1.6 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ ГИРЛЯНДЫ ИЗОЛЯТОРОВ**

(лабораторная работа № 6)

***Цель работы:*** Изучение экспериментальной методики определения распределения переменного напряжения по гирлянде изоляторов с помощью искрового промежутка с неизменным расстоянием между шарами и способов выравнивания распределения напряжения.

***Оборудование:*** Аппарат АИИ-70, универсальная измерительная штанга с переменным искровым промежутком типа ШИП - 220, физическая модель гирлянды изоляторов.

***Характеристика и паспортные данные испытательного оборудования:***

1. Аппарат АИИ-70.

2. ШИП-220. Комплект штанги состоит из двух частей: изолирующей части и измерительной головки.

*Изолирующая часть* выполнена из пяти легких бакелитовых трубок 2 — 5 (звеньев) длиной по 1 м. Изолирующая часть штанги может быть собрана из двух звеньев и захвата для работы в устройствах с напряжением до 110 кВ, из трех звеньев до 220 кВ. Соединение звеньев производится при помощи закрепленных в них на клеящем лаке стальных втулок. Резьба во втулках имеет крупный шаг, что облегчает и ускоряет сборку отдельных звеньев. Поворот (при измерениях) изолирующей части производится в сторону закручивания резьбы соединяющих втулок, а обратный ход осуществляется при помощи пружины измерительной головки.

*Измерительная головка* для контроля изоляторов включает градуированный искровой промежуток из двух электродов: экранированной иглы и плоскости. Конструкция электродов выбрана таким образом, что она обеспечивает достаточную точность и растянутость шкалы в наиболее важном диапазоне напряжений от 0 до 25 кВ.

3. Физическая модель гирлянды изоляторов (рис. 1.1) состоит из групп конденсаторов  $C$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , резистора  $R$  и двух тумблеров. Предусмотрена возможность включения и отключения переключки тумблером  $K_1$ ; для имитации полного пробоя изолятора, а тумблером  $K_2$  для имитации уменьшения сопротивления изолятора. Питание стенда производится от понижающего автотрансформатора.

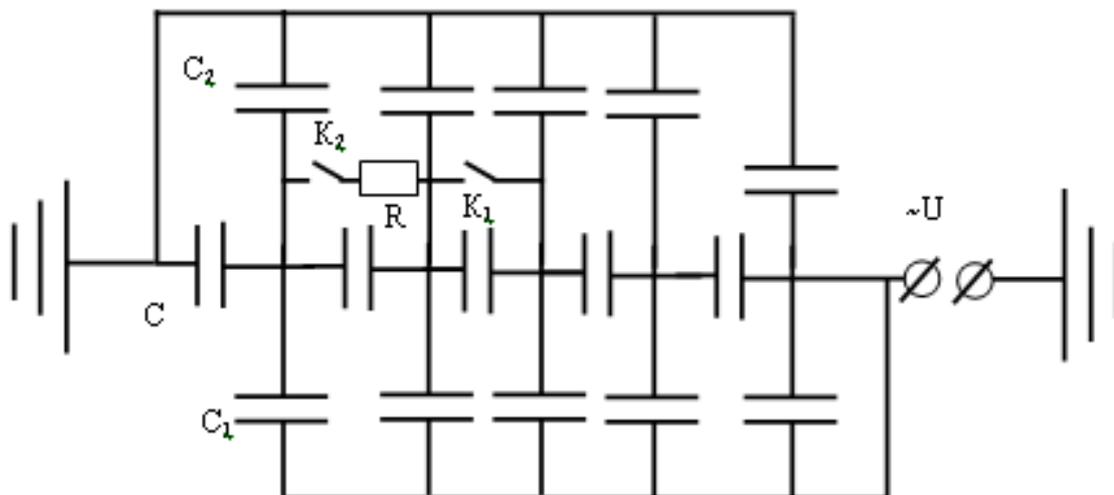


Рис. 1.18. Электрическая схема модели

### ***Краткие теоретические положения***

Для обеспечения требуемого уровня линейной и подстанционной изоляции подвесные и опорные изоляторы соединяются по несколько штук в гирлянды и колонки. Распределение напряжения по изоляторам гирлянды не равномерное. Если не принять специальных мер по выравниванию распределения напряжения, то ближайšie к проводу изоляторы окажутся под воздействием напряжения, превышающего напряжение начала короны, возрастут потери энергии и радиопомехи.

Правила устройства электроустановок предусматривают при отсутствии повышенных загрязнений следующее количество элементов в гирлянде при различном номинальном напряжении:

Таблица 1.9. Количество изоляторов в гирлянде в зависимости от напряжения ЛЭП

Номинальное напряжение ЛЭП, кВ	35	110	150	220	330	500
Количество изоляторов ПФ-6А	3	7	9	13	19	-
Количество изоляторов ПФ-16А	-	6	8	11	17	23
Количество изоляторов ПФ-20А	-	-	-	10	14	20

Гирлянды подвесных и колонки опорных изоляторов могут рассматриваться как цепочка последовательно включенных емкостей  $C$  (собственная емкость изоляторов) и параллельно соединенных с ними емкостей относительно земли –  $C_1$ ; и относительно провода –  $C_2$  находящегося под высоким напряжением. Обычно они равны:  $C=50\div70$  нФ;  $C_1=4\div5$  нФ;  $C_2=0,5\div1$  нФ.

Емкостной цепочкой можно представить ряд изоляционных конструкций, работающих на переменном напряжении. На (рис. 2.) приводится гирлянда изоляторов и ее схема замещения.

Схема содержит последовательное включение емкости  $C$ , емкости  $C_1$  между промежуточными электродами и землей, а также емкости  $C_2$  между промежуточными электродами и электродом, находящимся под полным напряжением сети  $U$ .

Рассмотрим распределение напряжения по такой цепочке при различных значениях ее параметров. При  $n$  - одинаковых продольных емкостей  $C$  и отсутствии поперечных емкостей  $C_1$  и  $C_2$  напряжения на емкостях  $C$  будут одинаковыми и равными  $U/n$ .

При  $C_1 \neq 0$  и  $C_2 \neq 0$  от каждого электрода оттекает ток  $i_1$  на землю. В результате этого токи через емкости  $C$  уменьшаются по мере их удаления от линейного электрода.

Чем больше значение емкостей  $C_1$ , тем меньше их сопротивления  $X_{C1}$  и, следовательно, тем больше оттекание тока и тем больше отличаются друг от друга напряжения на конденсаторах  $C$ . При  $C_2 \neq 0$  происходит подтекание токов  $i_1$  к промежуточным электродам  $\Delta U_6 > \Delta U_5 \dots > \Delta U_1$ .

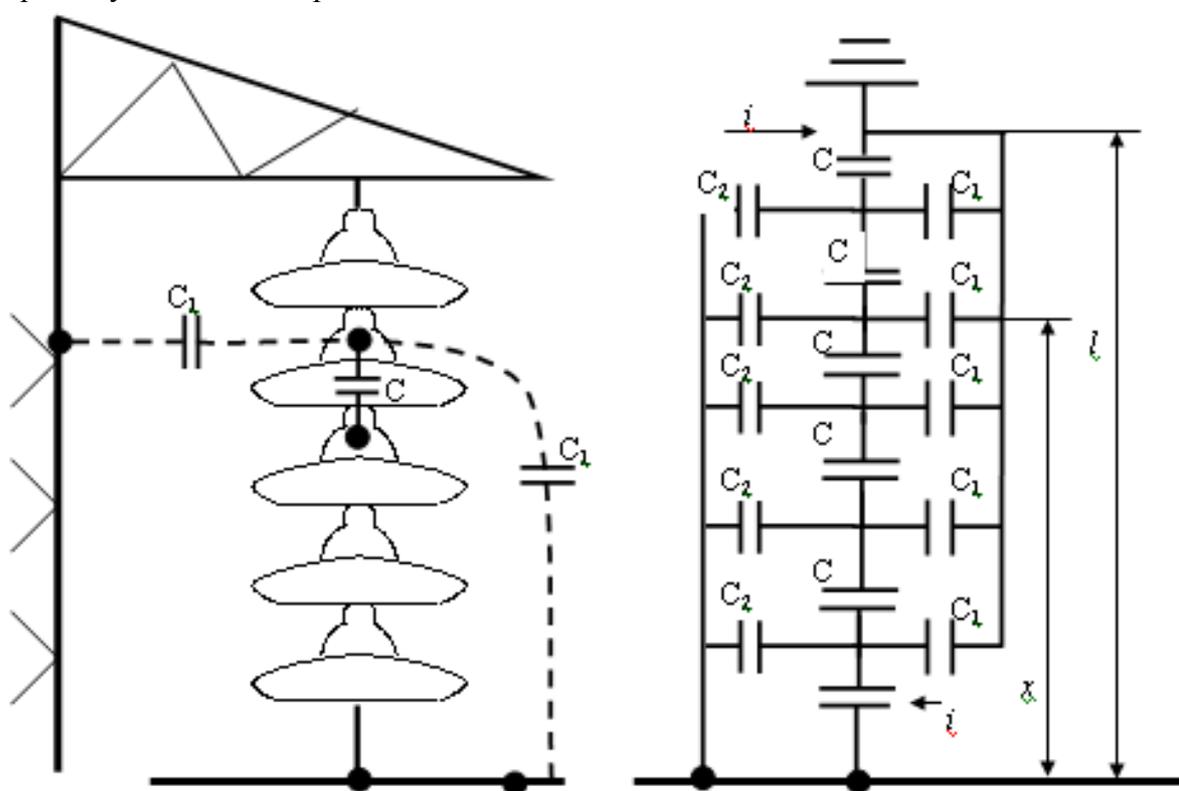


Рис. 1.19. Гирлянда изоляторов (а) и схема замещения (б) гирлянды.

Совместное влияние емкостей  $C_1$  и  $C_2$  сказывается таким образом, что наибольшие напряжения приходятся на первые и последние емкости  $C$ .

Если  $C_1 \neq C_2$ , то распределение напряжения имеет несимметричный характер: при  $C_1 > C_2$  большее падение напряжения происходит на конденсаторе, ближайшем к линейному электроду  $C$ .

Заметим, что в реальных изоляционных конструкциях обычно  $C_1 > C_2$ . Неравномерное распределение напряжения по элементам изоляционной конструкции приводит к возникновению коронного разряда и способствует снижению ее электрической прочности.

Величина емкостей для гирлянды изоляторов составляют  $C = (50 \pm 70) n \Phi, C_1 = (4 \pm 5) n \Phi, C_2 = (0,5 \pm 1) n \Phi$ . Так как  $C_1 > C_2$ , то преобладает влияние емкостей на землю, вследствие чего наибольшее напряжение будет на изоляторе, ближайшем к проводу линии. Предельно допустимое падение напряжения на изоляторе зависит от его

конструкции и составляет 30-60 кВ по условиям коронирования арматуры изолятора. Корона является источником радиопомех, а образующиеся при короне озон и окислы азота вызывают коррозию арматуры изолятора.

В гирляндах, состоящих из одинакового числа однотипных элементов, распределение фазового напряжения между изоляторами имеет вполне определенный характер. При появлении в гирлянде дефектных изоляторов нормальное распределение напряжения изменяется. На дефектные изоляторы приходится малое напряжение (при полном пробое изолятора напряжение на нем равно нулю), а на целые - большее, чем обычно. На рис. 1.20 приведены кривые распределения напряжения по элементам гирлянды изоляторов при отсутствии (кривая 1) и при наличии (кривая 2) дефектных изоляторов. Из рис. 1.20 (кривая 2) видно, что дефектным является пятый изолятор гирлянды.

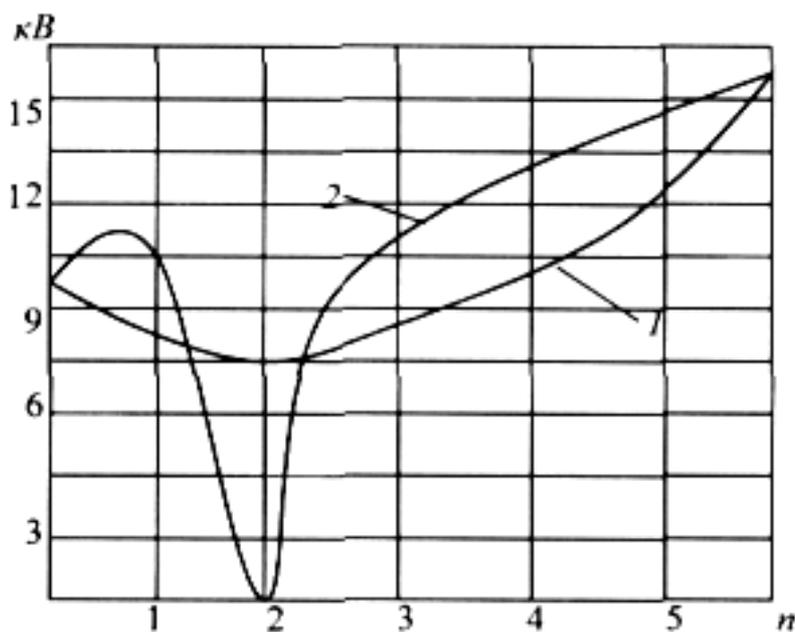


Рис. 1.20. Кривые распределения напряжения по элементам гирлянды изоляторов при отсутствии (1) и наличии (2) дефектных изоляторов.

В гирлянде напряжением 220 кВ и выше напряжение на ближайшем к проводу изоляторе может превышать допустимое значение. Применение расщепленных проводов увеличивает емкость  $C_2$  до 2-3  $n\Phi$ , что способствует выравниванию распределения напряжения. Дополнительным средством регулирования распределения напряжения по изоляторам гирлянды служит специальная арматура в виде колец, восьмерок или овалов. Арматура укрепляется в месте подвески проводов к гирлянде. При этом увеличивается емкость изоляторов, ближайших к проводу, и таким образом уменьшается доля напряжения, приходящегося на первый и некоторые ближайшие к проводу изолятора.

Применение изоляторов, имеющих различные значения продольных емкостей, позволяет значительно выровнять распределения напряжения по гирлянде изоляторов. Например, есть предложение в гирлянде ВЛ 1150 кВ из изоляторов ПСК-210 (гладкий конус) последние изоляторы заменить на ПС 210 Б (ребристый нормального наполнения), имеющие большую продольную емкость.

При увлажненном загрязнении поверхностей изоляторов, а также под дождем распределение напряжения вдоль гирлянды выравнивается, так как в этих случаях оно определяется главным образом сопротивлениями утечки изоляторов.

Электрооборудование подстанций имеет многочисленные элементы крепления (фланцы с острыми краями, выступающие болты и т.п.), находящиеся под высоким напряжением. Для того, чтобы исключить коронирование этих деталей оборудования,

вводы высокого напряжения трансформаторов и выключателей, опорные колонки аппаратов снабжаются экранами. Наряду с устранением короны экраны позволяют электрическую прочность разрядных промежутков увеличить за счет выравнивания электрического поля.

Для измерения напряжения на изоляторах применяются измерительные штанги.

Наибольшее распространение получила штанга ШИП - 220. Измерительным элементом этой штанги является переменный искровой промежуток между электродами игла—плоскость. После наложения на контролируемый изолятор щупов штанги, вращая ее, изменяют расстояние между электродами до пробоя искрового промежутка. Величина промежутка в момент пробоя характеризует напряжение на изоляторе. Чтобы при пробое искрового промежутка не был шунтирован изолятор, в цепь разрядника включается конденсатор, емкость которого приблизительно равна емкости одного изолятора. Конденсатор вмонтирован в штангу. На (рис. 1.21.) приведена схема контроля изолятора с помощью штанги.

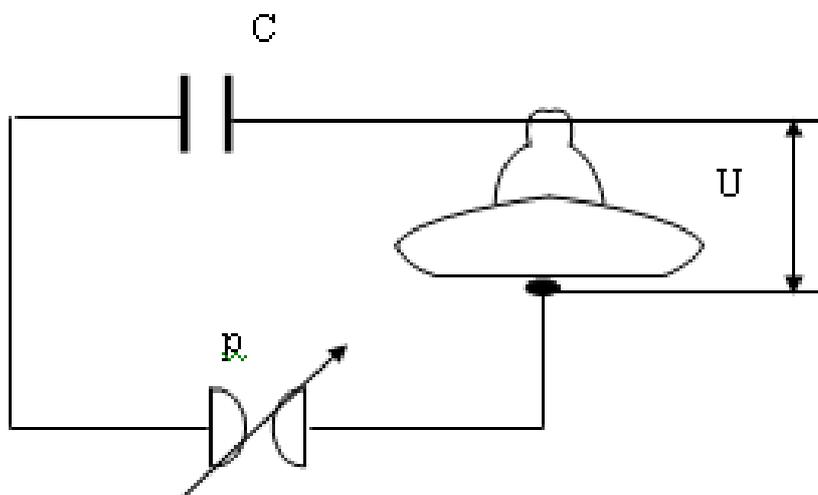


Рис. 1.21. Схема измерения напряжения на изоляторе с помощью штанги. С - защитная емкость в штанге;  $p$  - регулируемый искровой промежуток

Контроль изоляторов штангой целесообразно проводить после влажной погоды, когда влага, проникшая в трещины дефектных изоляторов, облегчает их выявление. Изоляторы бракуют, если приходящееся на них напряжение меньше 2кВ. [31, 17]

***Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы.***

См. общие правила по ТБ для лаборатории ВН

***Порядок проведения лабораторной работы***

Часть 1. Работа с физической моделью:

1. Подать на физическую модель требуемое напряжение.
2. Измерить напряжение на каждом отдельном элементе при помощи вольтметра.
3. Результаты измерений занести в табл. 1.10.
4. При помощи тумблера  $K_1$  смоделировать перекрытие изолятора, выполнить пункты 2-3.
5. Вернуть тумблер  $K_1$  в исходное положение.
6. При помощи тумблера  $K_2$  смоделировать частичное перекрытие изолятора, выполнить пункты 2-3.
7. Вернуть тумблер  $K_2$  в исходное положение.

Часть 2

Работа с повышенным напряжением:

Ознакомиться со схемой установки, расположением её элементов, правилами безопасности при работе на установке. Проводить работу, придерживаясь следующих пунктов:

1. Ознакомиться с инструкцией и назначением отдельных элементов измерительной штанги и снять с ее помощью распределение напряжения на гирлянде.
2. Осмотреть аппарат АИИ-70 на предмет целостности заземления.
3. Согласно рис.. переключить разъединитель QS.
4. Подсоединить гирлянду изоляторов к шине.
5. Проверить правильность сборки схемы.
6. Включить главный автомат.
7. Подсоединить аппарат АИИ-70 к сети через штепсельный разъем.
8. Включить автомат аппарата АИИ-70.
9. Подать на гирлянду изоляторов требуемое напряжение.
10. При помощи ШИП - 220 определить напряжение на каждом изоляторе гирлянды.
11. Результаты измерений занести в табл. 1.10.
12. Снизить напряжение установки до нуля.
13. Отключить установку от сети и создать видимый разрыв при помощи штепсельного разъема.
14. Отключить главный автомат.
15. Смоделировать перекрытие одного или нескольких изоляторов, т.е. установить перемычку из любого провода между головками изоляторов, при этом следует вспомнить табл.

Таблица 1.10. Значения напряжения на изоляторе в гирлянде

Напряжение на изоляторе, %	Номер изолятора				
	1	2	3	4	5

16. Выполнить пункты 6 — 14.
17. Установить защитный экран на гирлянду изоляторов.
18. Выполнить пункты 6 - 14.

**Обработка результатов и анализ эксперимента**

1. По данным табл. 1.10 построить графические зависимости  $\Delta U\% = f(n)$
2. Провести сравнительный анализ распределения напряжения по гирлянде (физ. модели) при частичном, полном перекрытии изоляции, без и при наличии защитного экрана.

3. Сделать вывод о проделанных экспериментах.

**План составления отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткую информацию о влиянии емкости изоляторов на распределение напряжения по гирлянде изоляторов.
4. Краткое описание установки и физической модели используемой в работе, их электрические схемы.

5. Таблицы и графики измерений.
6. Выводы по работе.

**Перед началом выполнения очередной работы студенты должны:**

1. Сдать преподавателю для проверки отчет по предыдущей лабораторной работе.
2. Получить допуск по теоретической части ТБ у преподавателя.

**Контрольные вопросы**

1. Почему распределение переменного напряжения по гирлянде однотипных изоляторов не равномерно?
2. Как и почему изменится распределение напряжения при увлажнении изоляторов гирлянды?
3. В гирлянду фарфоровых изоляторов предлагается установить однотипный стеклянный изолятор. В каком месте гирлянды установить его для более равномерного распределения напряжения?
4. Из каких соображений выбирается количество элементов в гирлянде ЛЭП переменного тока?
5. Какое влияние оказывает защитная арматура на распределение напряжения по гирлянде?
6. Почему изолятор рассматривается как конденсатор?
7. Как можно увеличить емкость изолятора относительно провода?
8. Что необходимо сделать для выравнивания напряжения?
9. Расскажите устройство и принцип действия штанги ШИП-220.
10. Какое явление сопровождают появление короны?

### **2.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ**

(лабораторная работа № 9)

**Цель работы:** изучить метод контроля внутренней изоляции по величине тангенса диэлектрических потерь на примере высоковольтных вводов.

**Оборудование:** два высоковольтных ввода: ввод ГТТБ-60-110/800; ввод масляного выключателя МВ-35, мост переменного тока Р 5026, конденсатор Р 5023, измерительный трансформатор НОМ –10 кВ, ЛАТр.

**Паспортные данные и характеристика оборудования:**

*Высоковольтные вводы*

Высоковольтные вводы предназначены для силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов и масляных выключателей, работающих в открытых распределительных устройствах переменного тока частотой 50 Гц.

Условное обозначение ГТТБ-60-110/800: герметичный, трансформаторный, с твердой изоляцией, Б – класс изоляции, 60 – угол наклона, 110 – класс напряжения, 800 – номинальный ток.

Условное обозначение МВ-35: ввод масляного выключателя, 35 – класс напряжения.

*Мост Р 5026*

Мост переменного тока предназначен для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции промышленных установок (изоляторов, вводов, конденсаторов, трансформаторов, генераторов, компенсаторов и т. п.) в эксплуатационных условиях непосредственно на месте установки оборудования

Пределы измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, пределы допустимой основной погрешности измерения емкости и тангенса угла потерь, пределы рабочего напряжения приведены в таблице 2.8.

Изменение погрешности моста при изменении температуры окружающего воздуха от нормальной 15 – 25 °С до любой температуры в пределах рабочего диапазона не превышает 0,5 предела допустимой основной погрешности, в диапазоне температур от 1 до 10 °С и от 35 до 40 °С не превышает предела допускаемой основной погрешности на каждые 10 °С изменение температуры.

Таблица 2.8. Основные технические данные моста Р 5026

Пределы измерения		Пределы допускаемой погрешности измерения		Пределы рабочего напряжения, кВ	Схема измерения	Диапазон рабочих температур, °С
$C_x, \text{ПФ}$	$\text{tg } \delta_x$	$C_x, \%$	$\text{tg } \delta_x$			
10 – 1000	$1,10^{-4}$ – 0,1	$\pm \left(0,5 + \frac{100}{C}\right)$	$\pm 0,01 \text{tg } \delta$ $+ 2 \cdot 10^{-4}$	5–10	Прямая	10–35 °С
100 – 10000	$1,10^{-4}$ – 1,0	$\pm \left(0,5 + \frac{50}{C}\right)$	$\pm 0,01 \text{tg } \delta$ $+ 1 \cdot 10^{-4}$	3–10	Прямая	10–35
$10^5$ – $10^6$	$5,10^{-4}$ – 1,0	$\pm \left(2,5 + \frac{50}{C}\right)$	$\pm 0,05 \text{tg } \delta$ $+ 3 \cdot 10^{-4}$	3–5	Прямая перевернутая	от –10 до +40

*Устройство моста P5026*

Мост состоит из панели У-1, нуль-индикатора У-2, магазина сопротивлений У-3, магазина емкостей У-4.

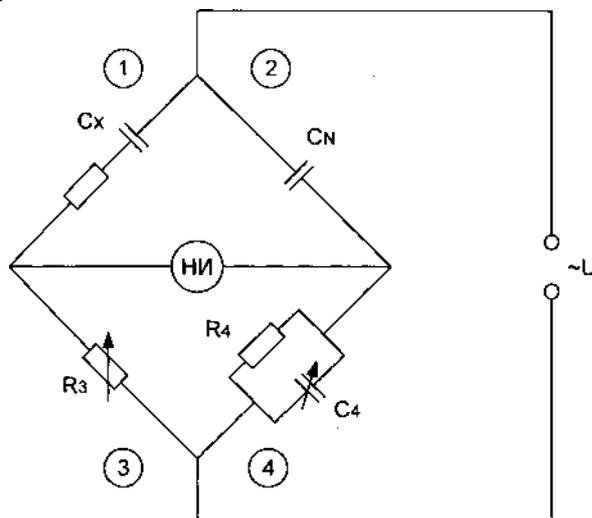


Рис.2.13. Электрическая схема моста P 5026

Магазин сопротивлений У-3 имеет три декады (20x100; 9x10; 9x1 Ом) и плавно регулируемый потенциометр со шкалой и ценой деления 0,02 Ом. Погрешность корректировки сопротивления до номинального значения первых трех декад не превышает 0,1%, погрешность градуировки последней декады не превышает 0,01% Ом.

Нуль-индикатор предназначен для индикации равновесия моста, представляет собой чувствительный, транзисторный, избирательный усилитель, на выходе которого включен стрелочный прибор. Чувствительность не менее 2 мкА/мкВ и изменяется степенями через 30 дБ. Входное сопротивление нуль-индикатора не менее 300 Ом.

Магазин емкостей У-4 состоит из трех декад: 9x0,1; 9x0,01; 9x0,001 мкФ и воздушного конденсатора переменной емкости. Погрешность корректировки емкости декад магазина 0,2%.

*Панель У-1.* На панели расположены переключатели пределов измерения на высоком и на низком напряжении, рисунок 1 - «А», блокировочная кнопка переключателя - «К», переключатель полярности нуль-индикатора и знака тангенса угла диэлектрических потерь - «Б», переключатель плеча R4, разрядники, гнездо для подключения шнура питания, зажимы подключения  $C_x$  и  $C_0$ , образцовые конденсаторы для низковольтной схемы измерения, элементы питания нуль-индикатора и шунтирующие сопротивления.

Корпус моста, его наружная и лицевая панель служат внешним электростатическим экраном и при работе моста заземляются.

Переключатель пределов «А» обеспечивает выбор схемы моста для работы на высоком (красная маркировка), и на низком (черная маркировка) напряжении. Для исключения ошибки от неправильных действий оператора перевод работы схемы с высокого напряжения на низкое и обратно возможен лишь при нажатой кнопки «К». Переключатель «Б» обеспечивает два включения для измерения положительного  $tg\delta$ . Каждое такое включение имеет два положения «1» и «2». При переходе из положения «1» в положение «2» изменяется полярность присоединения нуль-индикатора.

#### *Образцовый воздушный конденсатор Р 5023*

Образцовый конденсатор, применяемый при работе моста на высоком напряжении, конструктивно представляет собой воздушный конденсатор с коаксиальным расположением электродов. Наружный электрод является высокопотенциальным, внутренний – низкопотенциальным. Оба электрода укреплены через изоляторы на трубе, проходящей в осевой части цилиндров.

#### *Трансформатор напряжения НОМ –10*

Трансформатор напряжения однофазный двухобмоточный с естественным масляным охлаждением представляет собой преобразователь переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

*Технические данные:* номинальное напряжение вторичной обмотки 100 В; номинальное напряжение первичной обмотки 10000 В; максимальная мощность 640 ВА.

Трансформатор напряжения состоит из магнитопровода и двух обмоток, которые помещаются в бак, заполненный трансформаторным маслом. На крышке трансформатора смонтированы вводы первичного и вторичного напряжения, размещена пробка для доливки трансформаторного масла.

*ЛАТр (лабораторный автотрансформатор)* - предназначен для регулирования напряжения от 0 до 240 В.

#### ***Краткие теоретические сведения***

##### *Устройство высоковольтных вводов.*

Высоковольтные вводы состоят из внутренней изоляции выполненной из пропитанной трансформаторным маслом изоляционной бумаги, разделенной на слои уравнительными конденсаторными обкладками. От последней обкладки изоляции сделан изолированный вывод, который выведен через изолятор на соединительную втулку и служит для измерения тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) и емкости ввода рис. 2.14.

При эксплуатации вводов этот вывод должен быть надежно заземлен с помощью проводника. Изоляционный остов может быть выполнен в качестве делителя напряжения. С этой целью последний слой остова используется как измерительный конденсатор, который включается последовательно с основной емкостью ввода. Проводник от измерительной обкладки выводится через изолятор в корпус специального вывода на соединительной втулке и служит для измерения  $tg\delta$  и емкости  $C$  изоляции ввода. Проводник от последней обкладки наглухо крепится к соединительной втулке внутри ввода. Изоляционный остов помещен в фарфоровые крышки, которые являются внешней изоляцией и одновременно служат резервуаром заполняющего ввод масла.

Центральный стержень – труба, служит для соединения деталей ввода. У вводов масляных выключателей центральный стержень является токоведущим элементом. У трансформаторных вводов токоведущий проводник проходит внутри трубы. Втулка соединительная – предназначена для крепления ввода на выключателе или трансформаторе.

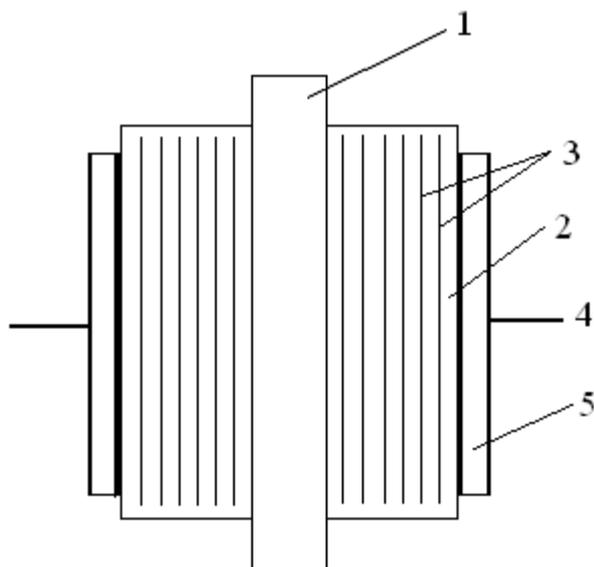


Рис. 2.14. Устройство ввода 110 кВ

1- латунная труба, 2- изоляционный остов, 3- уравнивательные обкладки, 4- измерительный вывод, 5 - последний слой изоляции.

*Ввод 35 кВ* – бумажно-бакелитовый ввод, изготавливаемый путем намотки на токоведущий стержень цилиндра из лакированной бумаги, смазанной бакелитовой смолой. Через определенные числа витков в цилиндр закладываются обкладки из фольги для регулирования электрического поля в радиальном и осевом направлениях. Во время намотки цилиндр обжимается горячими вальцами, вследствие чего смола плавится и склеивает слои бумаги. Затем цилиндр проходит термическую обработку, в процессе которой смола полимеризуется. Цилиндр помещают в фарфоровые покрывки, а пространство между покрывкой и бумажно-бакелитовым сердечником заливают изоляционной мастикой.

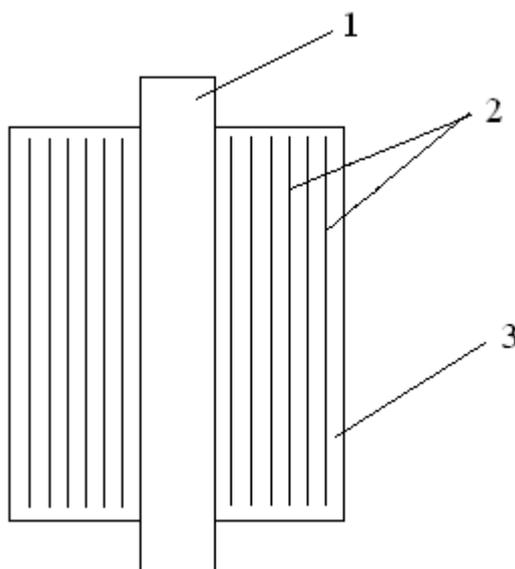


Рис.2.15. Устройство ввода 35 кВ

1 - токоведущий стержень, 2 - уравнивательные обкладки, 3 - бумажно-бакелитовый стержень.

Тангенс угла диэлектрических потерь – важнейший параметр изоляции. От величины  $tg\delta$  зависят потери в диэлектрике. Возрастание  $tg\delta$  в процессе эксплуатации происходит в результате общего старения изоляции и может привести к пробое.

Величина диэлектрических потерь:

$$P = U^2 \cdot w \cdot C \cdot tg\delta \quad , \quad (1)$$

где  $U$  – действующее значение испытательного переменного напряжения;

$w$  – угловая частота;

$C$  – емкость изоляции;

$\delta$  – угол диэлектрических потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь представляет собой отношение активной составляющей тока, протекающего в изоляции, к реактивной составляющей:

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_c} \quad , \quad (2)$$

где  $\delta$  – угол между векторами полного тока и реактивной составляющей тока в векторной диаграмме токов в изоляции (рис.2.16.).

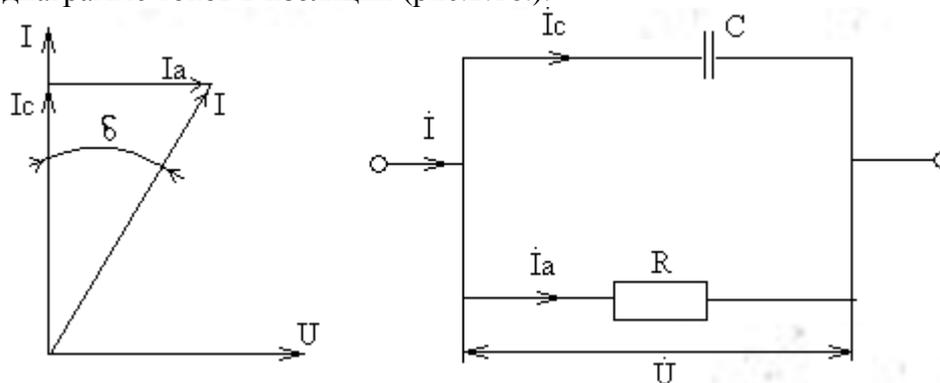


Рис.2.16. Схема замещения и векторная диаграмма токов в изоляции

Увеличение тангенса угла потерь обусловлено увлажнением изоляции, ионизацией газовых включений в расслоившейся изоляции, поверхностным загрязнением изоляции. Значение  $tg\delta$  так же зависит от температуры, испытательного напряжения и его частоты.

Тангенс угла диэлектрических потерь – удельная величина, характеризующая диэлектрические потери в единице объема изоляции. Поэтому его существенное возрастание наблюдается только при увеличении потерь значительной части объема изоляции. Если же потери возросли в малой части объема изоляции, то  $tg\delta$  изменился незначительно.

Покажем это для случаев параллельного и последовательного расположения диэлектриков с различными значениями тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 2.17).

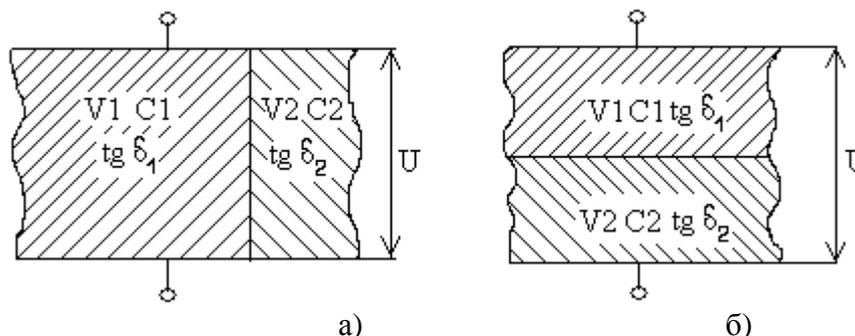


Рис. 2.17. Параллельное (а) и последовательное (б) расположение диэлектриков

В первом случае (параллельное расположение):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

Если объем  $V_2$  значительно меньше объема  $V_1$ , то и  $C_2 \ll C_1$ . Тогда

$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_2}{C_1} \cdot \operatorname{tg} \delta_2 \quad (4)$$

Из (4) следует, что результирующий тангенс угла диэлектрических потерь будет незначительно превышать тангенс угла потерь основного объема изоляции.

При последовательном расположении слоев:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_1 + C_1 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

Если слой с повышением тангенса угла потерь имеет незначительную толщину, то  $C_2 \ll C_1$ . В этом случае:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_1}{C_2} \cdot \operatorname{tg} \delta_2 \quad , \quad (6)$$

так как  $C_2 \ll C_1$ , то  $\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_1$

По этой причине достоверность результатов измерения тангенса угла диэлектрических потерь применительно к неоднородной композиционной изоляции соблюдается при общем старении (увлажнение изоляции). Указанные соображения верны для вводов силовых трансформаторов, вводов трансформаторов тока.

При влажности твердой изоляции менее 3% при температуре 20 – 30 °С определяющее значение при измерении тангенса угла потерь изоляции имеют характеристики трансформаторного масла (Лаб. раб № 11 разд. II).

При измерении  $\operatorname{tg} \delta$  изоляции и сравнении его значений с заводскими данными необходимо учитывать влияние температуры изоляции при измерениях.

Для изоляции силовых трансформаторов температурный пересчет производится по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta_{Q_1} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{Q_2}}{k_1} \quad (7)$$

Таблица 2.9. Значения коэффициента  $k$ .

$Q_2 - Q_1$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$k_1$	1,15	1,31	1,51	1,75	2	2,3	2,65	3	3,5	4

Состояние изоляции оценивается по абсолютной величине  $\operatorname{tg} \delta$ .

#### **Методика измерения тангенса угла диэлектрических потерь**

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь является одним из основных и наиболее распространенным методом контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения, поскольку распределенные дефекты в первую очередь вызывают увеличение диэлектрических потерь. Измеренное значение тангенса дает представление о качестве изоляции, а характер изменения позволяет судить об ухудшении свойств изоляции.

Измерение тангенса угла производится переносными мостами. Используется прямая (оба электрода испытываемого объекта изолированы) или перевернутая схема (один из электродов объекта заземлен). Напряжение питания моста не превышает 10 кВ независимо от номинального напряжения испытываемого оборудования.

Условие равновесия моста

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3, \quad (8)$$

где  $Z_1 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}$ ,  $Z_2 = \frac{1}{j\omega C_n}$ ,  $Z_3 = R_3$ ,  $Z_4 = \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_x}}$ , (9)

$$R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \left( \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_x}} \right) = R_3 \frac{1}{j\omega C_n} \quad (10)$$

Из этого равенства следует:

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3}, \quad R_x = R_3 \frac{C_4}{C_n} \quad (11)$$

Из треугольника сопротивлений схемы замещения диэлектрика (рис.3.4.) следует

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_x \cdot C_x, \quad (12)$$

так как  $R_4 = \frac{10^4}{\pi}$ ,  $f = 50$  Гц,  $C_n = 50,05$  мкФ, то

$$\operatorname{tg} \delta = C_4, \quad C_x = \frac{159360}{R_3} \quad (13)$$

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь при наличии у ввода измерительного вывода производится по «прямой» схеме, а при отсутствии измерительного вывода по «перевернутой» схеме.

В данной работе измерение тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции ввода ГТТБ-110 производим по «прямой» схеме, а измерение тангенса угла диэлектрических потерь последних слоев изоляции ввода ГТТБ-110 и изоляции ввода МВ-35 производим по «перевернутой» схеме. Измерение тангенса у вводов 35 кВ позволяет выявить увлажнение бакелито-бумажной основы и в меньшей степени дефекты мастичного наполнителя.

#### Схема лабораторной установки

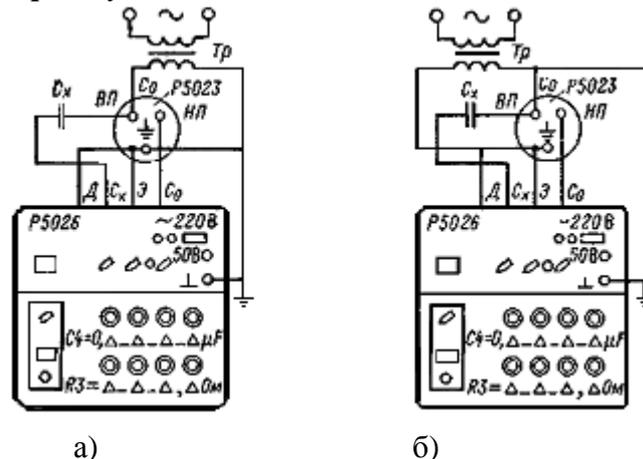


Рис.2.18. Принципиальные схемы измерения (а,б)

а – измерение по «прямой схеме».

б – измерение по «перевернутой схеме»

#### Правила техники безопасности при выполнении лабораторной работы.

См. общие правила по ТБ для лаборатории ВН

#### Порядок проведения лабораторной работы

1. Произвести внешний осмотр испытуемого высоковольтного ввода.

2. Проверить надежность заземления фланца ввода и подставки.
3. Проверить правильность сборки «прямой» или перевернутой схем в зависимости от метода испытаний (рис.2.18).
4. Проверить надежность заземления приборов Р–5026, Р–5023, НОМ–10.
5. Проверить целостность и исправность гальванического элемента, для питания нуль-индикатора. В нормальном режиме стрелка должна показать 28 – 30 мА.
6. Дать команду «Подаю напряжение».
7. Подать напряжение 100 В на низкую обмотку трансформатора НОМ 10000/100 В.
8. Произвести измерение в соответствии с правилами работы с приборами Р- 5026, Р-5023.
9. Снять напряжение.
10. Дать команду «Напряжение снято».
11. Отключить ЛАТр от сети, сделать видимый разрыв.
12. Записать данные измерения в протокол испытания, форма которого приведена в таблице 2.10.
13. Пересоединить схему испытания.
14. Выполнить пункты 6-12.
15. Измерить температуру окружающей среды.
16. Разобрать схему.
17. Дать заключение, о состоянии изоляции ввода, сверив полученные данные с нормами.

### **Обработка результатов измерений и анализ экспериментов**

Таблица 2.10. Форма протокола измерений

№	Тангенс угла диэлектрических потерь и емкость отдельных участков изоляции вводов			
	Основная изоляция		Изоляция измерительного конденсатора, ввода	
	$C_4$	$R_3$	$C_4$	$R_3$
1				
2				
3				
4				
5				

### **План составления отчета по лабораторной работе**

Отчет по лабораторной работе включает в себя:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения по определению  $tg\delta$ .
4. Характеристику приборов использованных в лабораторной работе и описание электрической схемы.
5. Протоколы измерений и результаты вычислений.
6. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Конструкция ввода 110 кВ.

2. Конструкция ввода 35 кВ.
3. Методика проведения измерения тангенса угла диэлектрических потерь.
4. Дать определение тангенса угла диэлектрических потерь и вывести формулу для его нахождения.
5. Что такое «прямая» и «перевернутая» схемы измерения, когда они применяются?
6. Охарактеризовать оборудование, используемое в данной работе.
7. По каким критериям производится оценка состояния изоляции ввода?
8. Методы контроля изоляции высоковольтного оборудования.
9. Достоинства и недостатки метода определения тангенса диэлектрических потерь, используемого в лабораторной работе.
10. При каких условиях справедливо равенство  $\operatorname{tg} \delta = C_4$  ?

## 2.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

(лабораторная работа № 10)

**Цель работы:** изучить метод контроля электрической прочности жидких диэлектриков по величине тангенса угла диэлектрических потерь и получить практические навыки по его применению.

**Оборудование:** аппарат АИМ-90, трансформаторное масло

**Паспортные данные и характеристика оборудования:**

*Аппарат АИМ – 90.* Аппарат предназначен для определения пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков. Напряжение питания сети однофазного переменного тока -  $220 \pm 22$  В. Наибольшее действующее пробивное напряжение – 90 кВ, Потребляемая мощность не более 0,5 кВА, объем измерительной ячейки –  $400 \text{ см}^3$ .

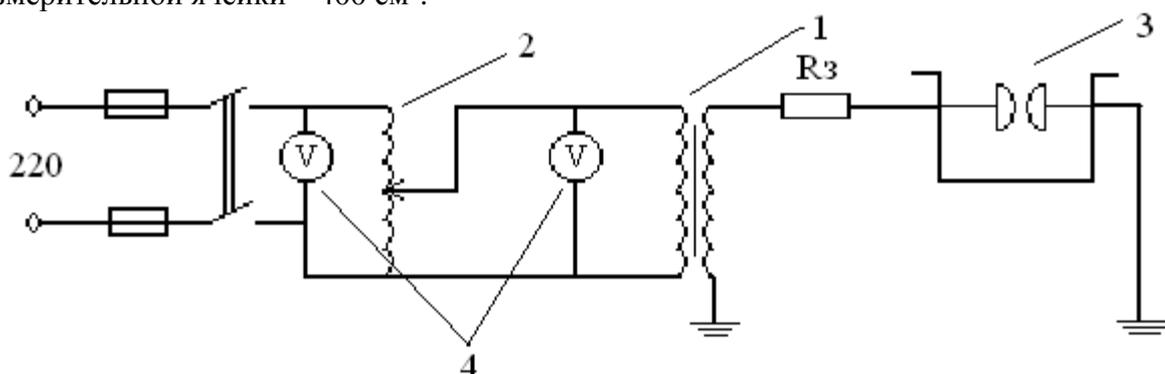


Рис.2.19. Основные элементы конструкции аппарата АИМ -90,  
1 – генераторное устройство; 2 – регулятор напряжения; 3 – измерительная ячейка; 4 – измерительный прибор, сигнальные лампы, реле.

Зона аппарата, где устанавливается измерительная ячейка, имеет крышку, которая в закрытом положении замыкает блок-контакты цепи высокого напряжения. При открывании крышки происходит разрыв цепи. Подъем высокого напряжения производится регулятором напряжения с постоянной скоростью электропривода.

*Трансформаторное масло.* Это наиболее распространенный диэлектрик, применяемый в высоковольтном оборудовании, и от его качества зависит надежная работа как силовых трансформаторов, так и маслонаполненных вводов.

### **Краткие теоретические сведения**

Трансформаторным (изоляционным) маслом заполняются баки силовых трансформаторов и реакторов, масляные выключатели, измерительные трансформаторы и вводы. Масла различных марок существенно отличаются по своим диэлектрическим свойствам, поэтому каждое из них предназначается для заливки в оборудование определенных классов напряжения.

Трансформаторное масло подразделяется:

- на свежее сырое (без присадок), в том виде, в каком оно поставляется заводом;
- регенерированное;
- чистое, сухое (свежее или регенерированное, либо смесь масел);
- эксплуатационное (показатели которого соответствуют нормам);
- отработавшее (показатели которого не соответствуют нормам эксплуатационного масла).

Основные физико-химические и диэлектрические свойства трансформаторных масел:

*электрическая прочность* – одна из основных характеристик, определяется по пробивному напряжению. Для свежего масла пробивное напряжение должно быть не менее 30 кВ. Снижение пробивного напряжения свидетельствует, как правило, о загрязнении масла водой, воздухом, волокнами и другими примесями;

*тангенс угла диэлектрических потерь* – характеризует свойство трансформаторного масла как диэлектрика. Диэлектрические потери характеризуют его качество и степень очистки свежего масла, а в процессе эксплуатации – степень его загрязнения и старения;

*цвет масла* у большинства масел светло-желтый. Темный цвет свежего масла характеризует отклонения в технологии его изготовления на заводе;

*механические примеси* – нерастворенные вещества, содержащиеся в масле в виде осадка или в взвешенном состоянии. Это – волокна, пыль, продукты растворения в масле компонентов, применяемых в конструкции трансформатора;

*влажность*. Ухудшение этого показателя свидетельствует о потере герметичности трансформатора или его работе в недопустимом нагрузочном режиме. При наличии в масле эмульсии воды электрическая прочность масла мала. С повышением температуры влага в масле постепенно переходит в раствор, в результате чего электрическая прочность возрастает, с дальнейшим повышением температуры она снова падает;

*температура вспышки масла* – характеризует степень его испаряемости. Температура вспышки для обычных трансформаторных масел колеблется в пределах 130...150 °С. В отношении пожарной безопасности большую роль играет *температура самовоспламенения* – это температура, при которой масло при наличии воздуха над поверхностью загорается самопроизвольно без поднесения пламени и составляет 350...400 °С;

*кислотное число* – это количество едкого калия (КОН), выраженного в миллиграммах, необходимое для нейтрализации свободных кислот в 1 г. Масла. Этот показатель характеризует старение масла, о чем свидетельствует появление в нем кислотных соединений. Кислотное число не должно превышать 0,25 мг КОН на 1 г. масла.

*водорастворимые кислоты и щелочи*, содержащиеся в масле свидетельствуют о его низком качестве. Они могут образовываться в процессе изготовления при нарушении технологии производства, а также при эксплуатации в результате его окисления. Эти кислоты вызывают коррозию металла и ускоряют старение изоляции;

*стабильность* проверяется в эксплуатации при получении партий свежего масла путем проведения его искусственного старения. Стабильность масла характеризует его срок службы и определяется двумя показателями – процентным содержанием осадка и кислотным числом;

*температура застывания* – это наибольшая температура, при которой масло застывает настолько, что при наклоне пробирки под углом 45° его уровень в течении 1 мин. не изменяется. Для трансформаторов первостепенное значение имеет охлаждение, поэтому, для их наполнения требуется масло, обладающее большей подвижностью, так как вязкое масло будет циркулировать гораздо медленнее, не обеспечивая необходимого охлаждения трансформатора;

*газосодержание масла*. Повышенное содержание газа в масле приводит к ухудшению его свойств: возрастанию интенсивности окисления, снижению электрической прочности изоляции активной части трансформатора;

*плотность* характеризует восприимчивость масел к присадкам их гигроскопичность, сопротивляемость воздействию электрического поля;

*вязкость* характеризует подвижность масла при температурных колебаниях в трансформаторе. Ухудшение вязкости нарушает теплообмен, ускоряет старение изоляции;

*показатель преломления* отражает содержание в масле нефтеноароматических углеводородов ( ).

В трансформаторах изоляционные масла осуществляют одновременно две функции: диэлектрика и теплоотводящей среды. Масло обеспечивает изоляцию обмоток

относительно заземленного корпуса и частей трансформаторов, находящихся под различным потенциалом.

Электрическая прочность трансформаторного масла зависит, главным образом, от содержания в них примесей, в том числе воды, газа, посторонних твердых частиц, растительных волокон и других загрязнений.

Наибольшее отрицательное воздействие оказывают вода и пыль. Пробивное напряжение недегазированного масла зависит от давления, что обусловлено наличием пузырьков воздуха.

При испытании электрической прочности масла необходимо строго соблюдать принятую методику испытания, так как форма обработки электродов, влажность среды, время выдержки масла под напряжением оказывают влияние на результаты измерения.

Таким образом, с точки зрения получения максимальной величины электрической прочности масло не должно быть влажным, содержать загрязнений, посторонних включений и должно быть тщательно высушено и дегазировано.

### ***Подготовка к работе***

#### ***Подготовка измерительной ячейки***

При применении новой измерительной ячейки или после длительного хранения, при изменении типа испытываемой жидкости ячейку следует обработать растворителем. При ежедневных испытаниях или при других видах испытаний, когда пробивное напряжение не превышает установленных норм, обработка испытательной ячейки сводится к ее ополаскиванию испытываемой жидкостью. В нерабочем состоянии ячейку хранят наполненной жидким материалом, пробивное напряжение которого не превышает установленных норм для данного типа жидкости.

#### ***Подготовка пробы трансформаторного масла***

За пробу принимают объем жидкого электроизоляционного материала, одновременно отобранный в один сосуд из емкости аппарата.

Пробивное напряжение трансформаторного масла определяется при температуре  $15 - 20^{\circ} \text{C}$ , не отличающейся от температуры помещения. Перед испытанием закрытый сосуд с пробой жидкости должен быть выдержан в помещении, в котором будут производиться испытания, до приобретения жидкостью температуры помещения, но не менее 30 мин. При этом сосуд должен быть защищен от воздействия дневного света.

Перед испытанием сосуд с пробой несколько раз осторожно переворачивают вверх дном, чтобы содержащиеся в пробе случайные примеси равномерно распределились по всему объему. После этого небольшим количеством жидкости ополаскивают ячейку, в том числе электроды, затем медленно заполняют ячейку, следя за тем, чтобы струя жидкости медленно стекала по стенке и не образовывалось пузырьков воздуха. Испытания производят через 10 мин. После заполнения ячейки.

При одном заполнении ячейки осуществляют шесть последовательных пробоев с интервалами между ними - 5 мин. После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки жидкость между электродами осторожно перемешивают для удаления продуктов разложения, не допуская образование воздушных пузырьков.

### ***Порядок проведения работы***

**При выполнении лабораторной работы должны соблюдаться общие правила техники безопасности зала высоких напряжений, указанных в Разделе I.**

#### ***Особые правила техники безопасности***

1. Запрещается прерывать повышение испытательного напряжения в интервале от 60 до 90 кВ путем выключения электродвигателя на время более чем 20 с., т.к. первичная обмотка трансформатора не рассчитана на длительное протекание по не тока холостого хода генераторного устройства при указанных величинах напряжения.

2. Запрещается включать высокое напряжение, если не установлены в аппарат: изоляционный барьер и ячейка с жидким диэлектриком.

3. Не допускается работать на аппарате при напряжении выше 90 кВ. При достижении во время испытания указанной величины необходимо отключить аппарат сетевой кнопкой.

**Порядок работы на аппарате АИМ-90 (рис. 2.1.)**

1. Проверить заземление аппарата АИМ -90.
2. Открыть крышку аппарата, установить ячейку с трансформаторным маслом и закрыть крышку.
3. Подключить аппарат к сети 220 В.
4. Включить кнопку сети (~), при этом должна загореться подсветка зеленого сигнала.
5. Включить кнопку высокого напряжения, при этом должна загореться подсветка красного сигнала.
6. Зафиксировать величину пробивного напряжения.
7. Включить кнопку (0←) для возврата стрелки измерительного прибора в нулевое положение.
8. Дождаться возврата стрелки измерительного прибора в нулевое положение, отключить сетевой выключатель, открыть крышку и из зазора между электродами и с самих электродов при помощи чистой сухой стеклянной палочки осторожно удалить твердые продукты разложения.
9. Для одной пробы жидкого диэлектрика должно быть проведено шесть пробоев. Результаты испытаний заносят в таблицу 2.11.
10. Среднее арифметическое значение пробивного напряжения

$$U_{np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{np_i} \quad (1)$$

**Обработка результатов измерений и анализ экспериментов**

Таблица 2.11. Протокол результатов испытания трансформаторного масла.

№ опыта	Пробивное напряжение, кВ	Среднее пробивное напряжение, кВ

Полученные результаты испытаний сравнивают с таблицей 2.12 и дают заключение о пригодности трансформаторного масла для категорий электрооборудования.

Таблица 2.12. Значения пробивного напряжения для категорий электрооборудования, кВ.

Категория электрооборудования	Свежее масло	Регенерированное и очищенное масло	Эксплуатационное масло
До 15 кВ включ.	30	30	20
До 35 кВ включ.	35	35	25
От 60 до 150 кВ	60	60	35
От 220 до 500 кВ	65	65	45

**План составления отчета по лабораторной работе**

Отчет по лабораторной работе включает в себя:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения по испытанию трансформаторного масла.

4. Характеристику приборов использованных в лабораторной работе и описание электрической схемы.
5. Протоколы измерений и результаты вычислений.
6. Выводы по работе.

***Контрольные вопросы***

1. Назначение аппарата АИМ-90.
2. Принципиальная электрическая схема и описание методики определения пробивного напряжения трансформаторного масла.
3. Устройство и подготовка измерительной ячейки.
4. Назначение и характеристики трансформаторного масла.
5. Что такое проба трансформаторного масла?
6. Марки трансформаторных масел (пример).
7. Основные физико-химические свойства.
8. Как производится оценка контроля состояния масла?
9. Каковы требования к качеству масла?
10. Периодичность испытания масла.

**8. Фонд тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний**

**Тестовые задания для оценки качества знаний по дисциплине**

1. Стимер это.....  
.....  
.....
2. Перечислите основные недостатки масляно-барьерной изоляции
3. Расшифруйте марку кабеля МССК-110.
4. Какие способы применяются для регулирования электрических полей.
5. Перечислите виды разрядов
6. Напишите какие материалы применяются в масляно-барьерной изоляции.
7. С какой целью применяются конденсаторные обкладки во внутренней изоляции ?
8. Опишите физические процессы в диамагнетике, формирующие значение магнитной проницаемости.
9. Напишите закон Пашена
10. Что такое ячейка КРУЭ.
11. Какие виды диэлектрических потерь вы знаете?
12. Какой вид поля обладает наибольшей электрической прочностью ?

13. Какое стекло используется в качестве подвесных изоляторов?
14. На какой тип медных проводов не накладывается резиновая изоляция?

### **9. Контрольные вопросы к экзамену**

1. Электрофизические процессы в газах.
2. Движение заряженных частиц в газе.
3. Основные свойства термической плазмы.
4. Разновидности разрядов в газах.
5. Канальная форма разряда.
6. коронный разряд.
7. Импульсная корона.
8. Ионизация и рекомбинация частиц в газах.
9. Лавина электронов и условие самостоятельности разряда.
10. Электропроводимость диэлектриков.
11. Поляризация диэлектриков. Диэлектрические потери.
12. Атмосферный воздух как диэлектрик.
13. Назначение изоляторов, их цели и конструкция.
14. Испытание внешней изоляции.
15. Развитие разряда и пробивные напряжения промежутков с однородным электрическим полем.
16. Развитие разряда, начальные и пробивные напряжения промежутков с неоднородным электрическим полем.
17. Вольт-секундная характеристика воздушных промежутков. Время разряда.
18. Разряд в длинных воздушных промежутках.
19. Влияние конструкции изоляторов на напряжение перекрытия.
20. Развитие разряда и напряжение перекрытия изоляторов при неблагоприятных погодных условиях.
21. Учет атмосферных условий при определении разрядных и испытательных напряжений.
22. Регулирование эл. полей во внешней изоляции электроустановок.
23. Внутренняя изоляция: понятие и общие свойства.
24. Зависимость эл. прочности внутренней изоляции от длительности воздействия напряжения.
25. Самовосстанавливающаяся и не самовосстанавливающаяся изоляция. Влияние на неё механических тепловых и др. воздействий.
26. Пробой жидких диэлектриков.
27. Пробой твёрдых диэлектриков. Разряд по поверхности твердого диэлектрика.
28. Маслобарьерная изоляция.
29. Твердая изоляция.
30. Бумажно-масленная изоляция.
31. Газовая и вакуумная изоляция. Элегазовая изоляция
32. Градирование изоляции.
33. Применение конденсаторных обкладок и полупроводниковых покрытий.
34. Допустимые напряжения на внутренней изоляции, факторы, влияющие на кратковременную эл. прочность внутренней изоляции.
35. Изоляция ВЛ на опорах.
36. Изоляционные расстояния в пролетах ВЛ.
37. Выбор линейной изоляции.

38. Изоляционные конструкции ОРУ.
39. Изоляционные промежутки в ОРУ.
40. Выбор наружной изоляции РУ подстанции.
41. Изоляционные конструкции с газовой изоляцией.
42. Экологическое влияние ВЛ и РУ.
43. Основные конструкции кабелей высокого напряжения.
44. Кабельные муфты. Испытание изоляции кабелей.
45. Классификация и особенности изоляции силовых трансформаторов. Конструкция изоляции трансформаторов.
46. Испытания изоляции трансформаторов.
47. Изоляция ТТ.
48. Изоляция масляных и воздушных выключателей.
49. Изоляция вакуумных выключателей.
50. Изоляция элегазовых выключателей.
51. Изоляция герметизированных РУ, КРУЭ.
52. Изоляция вводов ВН.
53. Изоляция силовых конденсаторов.
54. Изоляция электрических машин высокого напряжения

## **10 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

а) основная литература:

1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / 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. Куффель, Е. Техника и электрофизика высоких напряжений [Текст]: учеб.-справ. Рук. / Е. Куффель, В. Цаенгль, Дж. Куффель.- Долгопрудный: Интеллект, 2011.-520 с.

б) дополнительная литература:

5. Электроэнергетика. Изоляция : учеб.-метод. комплекс для спец. 140204, 140205, 140211, 140203/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина , В. В. Соловьев. -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -1 о=эл. опт. диск (CD-ROM)
6. Электроэнергетика. Изоляция : учеб.-метод. комплекс для спец. 140204, 140205, 140211, 140203/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина, В. В. Соловьев . -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -100 с.
7. Электрические аппараты высокого напряжения : учеб. пособие: доп. Гос. ком. СССР по нар. обр. / под ред. Г. Н. Александрова. - Л. : Энергоатомиздат, 1989. - 344 с. : рис., табл. - Библиогр.: с. 336
8. Савина Н.В, Соловьев В.В, Кривохижа Я.В, Тоушкин А.Г, Лупешко Ю.М Изоляция и перенапряжения. Лабораторный практикум: Учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007.

в) периодические издания (журналы):

11. Электричество;
12. Электрические станции
13. Известия РАН. Энергетика;
14. Вестник ИГЭУ;
15. Вестник МЭИ;
16. Промышленная энергетика;
17. Энергетика. Сводный том;
18. Электрика
19. IEEE Transaction on Power Systems;
20. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

<b>№</b>	<b>Наименование ресурса</b>	<b>Краткая характеристика</b>
1	<a href="http://www.biblio@amursu.ru/">http://www.biblio@amursu.ru/</a>	Электронный ресурс библиотеки АмГУ
2	<a href="http://www.iqlib.ru/">http://www.iqlib.ru/</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знаний.