

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

К.П. Путилин, Е.Г. Малюк, А.К. Пронина

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.3.027.3(075.8)
ББК 31.24я73
П901

Р е ц е н з е н т:

В.В. Кувшинов – к.т.н., доцент кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети»
Института ядерной энергии и промышленности
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

Путилин К.П.

П901 Техника высоких напряжений. Лабораторный практикум : учебное пособие / К.П. Путилин, Е.Г. Малюк, А.К. Пронина ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет . – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2021. – 77 с.: ил. – Текст: электронный.

Учебное пособие разработано в соответствии с учебной программой дисциплины «Техника высоких напряжений». В лабораторный практикум включены лабораторные работы, относящиеся к исследованиям электрической прочности диэлектриков и мониторингу состояния высоковольтной изоляции.

Рекомендовано для студентов, обучающихся по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», очной и заочной форм обучения.

УДК 621.3.027.3(075.8)
ББК 31.24я73

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 16/20 от 25 ноября 2020 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Электрические заряды. Взаимодействие электрических зарядов	6
1.1. Планетарная структура модели атома вещества	6
1.2. Закон Кулона	7
1.3. Электрическое поле заряда	7
1.4. Потенциал в электрическом поле	8
1.5. Емкость плоского конденсатора	10
1.6. Поляризация диэлектриков	12
2. Электрическая прочность внутренней изоляции	16
2.1. Электрический пробой внутренней изоляции	16
2.2. Тепловой пробой внутренней изоляции	17
2.3. Длительная электрическая прочность изоляции	18
2.4. Частичные разряды в изоляции	19
3. Контроль состояния изоляции	21
3.1. Использования явления абсорбции для контроля изоляции	21
3.2. Тангенс угла диэлектрических потерь	25
3.3. Измерение сопротивления изоляции мегаомметром	26
3.4. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	28
4. Основные правила по технике безопасности при работе на испытательных установках высокого напряжения	31
4.1. Подготовка установки к работе	31
4.2. Порядок включения установки	32
4.3. Порядок выключения установки	32
4.4. Перечень запрещённых действий	32
4.5. Действия в аварийных случаях	32
4.6. Перечень защитных устройств и средств	33
5. Лабораторные работы	34
Лабораторная работа № 1. Исследование электрической прочности воздушных промежутков при переменном напряжении	35
Лабораторная работа № 2. Исследование электрической прочности по поверхности твёрдых диэлектриков	41
Лабораторная работа № 3. Определение электрической прочности конденсаторной бумаги	45
Лабораторная работа № 4. Исследование диэлектрической прочности жидких диэлектриков	50
Лабораторная работа № 5 Измерение тангенса угла диэлектрических потерь	58
Приложения	68
Литература	77

ВВЕДЕНИЕ

В развитии электроэнергетики важное место занимает применение высоких напряжений для передачи электрической энергии на большие расстояния. Такая передача в настоящее время во всём мире осуществляется, главным образом, на высоком напряжении, обеспечивающем низкий уровень энергетических потерь в сетях. Поэтому «Техника высоких напряжений» является одной из базовых дисциплин, формирующих компетенции современных электроэнергетиков. Кроме того рост мощности электроприводов на морском транспорте привёл к использованию высоковольтных технологий и высоковольтного оборудования на крупных кораблях и судах.

Курс «Техника высоких напряжений» кроме лекционного раздела и практических занятий включает выполнение комплекса лабораторных работ.

В процессе работы в лаборатории на высоковольтных исследовательских стендах у обучающихся вырабатываются практические навыки проведения высоковольтных испытаний изоляционных конструкций высоковольтного оборудования, измерения высоких напряжений, исследования свойств диэлектриков при воздействии на них высокого напряжения. Обучающиеся осваивают методику обработки результатов измерений и испытаний, и на основании усвоенного теоретического материала и полученных результатов исследований делать выводы о процессах в изоляционных конструкциях при высоковольтных воздействиях.

Обязательным при работе в высоковольтной лаборатории является строгое соблюдение охраны труда и правил техники безопасности.

В настоящем пособии приведены пять лабораторных работ, предусмотренных учебными планами направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Первая и вторая лабораторные работы относятся к изучению разрядных характеристик изоляционных воздушных промежутков при воздействии переменного напряжения при различных видах электрического поля, создаваемого электродами различной конфигурации.

Третья лабораторная работа посвящена исследованию электрической прочности твёрдого диэлектрика и волокнистого диэлектрика пропитанного трансформаторным маслом.

Четвёртая и пятая лабораторные работы посвящены профилактическим испытаниям изоляции.

Для подготовки к выполнению лабораторных работ в пособие включён достаточно обширный теоретический материал, усвоение которого, обучающиеся могут самостоятельно проверить, ответив на контрольные вопросы к соответствующим лабораторным работам.

Обучающиеся, не имеют квалификационной группы по технике безопасности. В пособие включены основные правила техники безопасности, которые изучаются обучаемыми с начала работы в лаборатории.

Обучающиеся опускаются к работе после проверки преподавателем знаний техники безопасности, теоретических положений в соответствии с темой лабораторной работы, схемы экспериментальной установки и методики выполнения экспериментов.

Отчёт по выполнению работы включает в себя: цель работы, описание экспериментальной установки и методики проведения работы, необходимые расчёты, результаты проведённых исследований и их анализ.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

1.1. Планетарная структура атома

Электрические заряды бывают двух типов: положительный $+q$ и отрицательный $-q$. Любой заряд складывается из элементарных (неделимых) зарядов, которые в любом атоме вещества присутствуют в виде протонов $+q_e$ и электронов $-q_e$. Протон – элементарная частица с положительным зарядом, а электрон – элементарная частица с отрицательным зарядом.

При соединении двух элементарных частиц разных знаков происходит их нейтрализация. В любом атоме вещества тяжелые положительные частицы (протоны) находятся в центре атома, образуя его ядро, отрицательные же частицы более легкие (электроны) вращаются вокруг ядра по круговым орбитам. Число протонов и электронов одинаково и атом, таким образом, оказывается нейтральным. Электроны внешних орбит могут покидать атом, тогда оставшаяся часть атома приобретает вид положительно заряженной частицы – положительного иона. «Ушедший» электрон может «пристать» к другому нейтральному и образовать с ним отрицательную частицу – отрицательный ион. Масса иона практически равна массе атома.

Физиками была принята, в качестве модели атома, его планетарная структура: в центре атома находятся протоны (их число равно порядковому номеру элемента в периодической таблице Д.И. Менделеева). Масса протона в 1846 раз больше массы электрона. Протоны, имеющие единичный положительный заряд и нейтроны, имеющие массу приблизительно такую же, как масса протонов, но не имеющие заряда (нейтральные), в совокупности образуют ядро атома. Электроны, равные по числу протонам вращаются как планеты вокруг массивного ядра по определённым орбитам. Орбит может быть несколько и электронов на каждой орбите – строго определённое число. На «дальних» орбитах электроны более слабо связаны с ядром, чем на «ближних». Именно «наружные» электроны способны покидать атом. Внешняя энергия, которая в состоянии «выбить» электрон из атома и сделать его свободным, называется энергией ионизации.

Большое число элементарных зарядов одного знака может сосредотачиваться на поверхности проводящего тела (например, на поверхности металлического шара или провода). Единицей такого совокупного заряда является кулон (Кл). Один кулон содержит огромное число элементарных зарядов того или иного знака. В таблице 1.1 приведены основные характеристики элементарных частиц, составляющих атомы любого вещества. Протоны и нейтроны в совокупности образующие ядро атома, называют также нуклонами, масса протонов в количестве Z и нейтронов в количестве N образуют массовое число атома:

$$A = Z + N.$$

Т а б л и ц а 1.1

Элементарная частица	Заряд		Масса	
	Кл	Усл. ед.	г	А.е.м.*
Электрон	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	-1	$9,1 \cdot 10^{-28}$	0,00055
Протон	$1,6 \cdot 10^{-19}$	+1	$1,67 \cdot 10^{-24}$	1,00728
Нейтрон	0	0	$1,67 \cdot 10^{-24}$	1,00866

*Атомная единица массы (русское обозначение а.е.м.; международное: u), она же дальтон (русское обозначение: Да, международное: Da), она же углеродная единица.

1.2. Закон Кулона

Сила взаимодействия зарядов определяется законом Кулона:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ - электрическая постоянная (Ф/м);

q_1 и q_2 – взаимодействующие электрические заряды (Н);

r – расстояние между зарядами (м).

Разноименные (по знаку) электрические заряды притягиваются, одноименные – отталкиваются. Пусть взаимодействуют заряды в один кулон, тогда сила, в системе СИ измеряемая в ньютонах (Н), при расстоянии в 1 метр между взаимодействующими зарядами составит величину:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1 \cdot 1}{1^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н.}$$

Если размеры заряженных тел незначительны, по сравнению с расстоянием между ними, то такие заряды называют точечными.

1.3. Электрическое поле заряда

Электрический заряд образует вокруг себя электрическое поле, характеризующее в каждой точке окружающего пространства физической величиной, которая называется **напряженностью поля**.

Большое число элементарных зарядов одного знака, которые располагаются на изолированном проводнике, например, в виде шара, образуют электрический заряд $+q$ или $-q$. Взаимодействие зарядов, определяемое законом Кулона, происходит через поля зарядов. Пусть имеется некоторый заряд q . Будем вносить в поле заряда q другой положительный заряд единичной величины $+q_0 = +1$. На этот заряд, называемый пробным зарядом, будет действовать сила F , различная в разных точках поля заряда q . Сила F , согласно закону Кулона, пропорциональна $q \times q_0 = q_{10}$, поэтому, если мы поместим заряд $+1$ в какую либо точку поля, то сила, F_1 , действующая на него, будет характеризовать электрическое поле в этой точке. Таким образом, поле мож-

но характеризовать силой, которая действует на единичный заряд и называется эта величина (сила) напряженностью электрического поля.

$$E = F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot 1}{r^2}$$

Если в эту точку поместить заряд q (вместо $+1$), то сила будет определяться как:

$$F = E \cdot q.$$

Напряженность электрического поля $\underline{E}$ – векторная величина, вектор $\underline{E}$ направлен по радиусу от заряда q во вне если заряд положительный ($+q$), и к заряду, если он отрицательный ($-q$). Рассмотрим электрическое поле двух точечных зарядов q_1 и q_2 , рис. 1.1 в точке a .

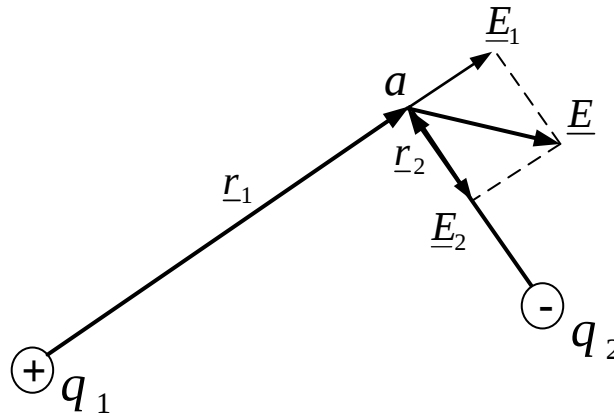


Рис. 1.1. Сложение электрических полей

Напряженность результирующего электрического поля в точке a есть векторная сумма напряженностей электрических полей, создаваемых отдельными зарядами. Поэтому справедлива запись в векторной форме:

$$\begin{aligned}\bar{E}_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r_1^3} \cdot \bar{r}_1; \\ \bar{E}_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(-q_2)}{r_2^3} \cdot \bar{r}_2; \\ \bar{E} &= \bar{E}_1 + \bar{E}_2\end{aligned}$$

1.4. Потенциал в электрическом поле

Электрическое поле зарядов в точке можно характеризовать не только вектором напряженности $\bar{E}$. Рассмотрим электрическое поле некоторого заряда $+q$, см. рис.1.2. Выберем точку a в этом поле с радиус-вектором $\bar{r}$. В точку поместим единичный, положительный заряд $+q_0$, называемый также пробным зарядом.

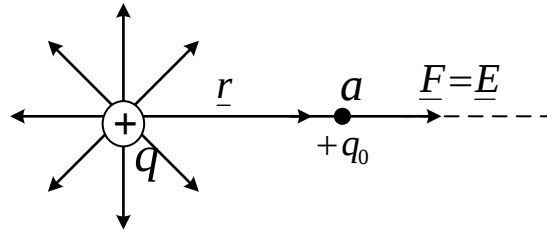


Рис. 1.2. Поле точечного заряда

На единичный разряд $+q_0$ будет действовать сила $\underline{F}$ равная $\underline{E}$. Предоставим полю перемещать пробный заряд из точки с радиусом $\vec{r}$ в точку, которая удалена в бесконечность ∞ . При этом будет совершена определенная работа силами поля. Работа сил поля по перемещению пробного заряда на элементарное перемещение $d\vec{r}$ определяется выражением:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cdot dr,$$

или

$$dA = \vec{E} \cdot d\vec{r} = E \cdot dr$$

Найдем всю работу по перемещению заряда $+q_0 = +1$ из заданной точки в бесконечность. Для этого рассмотрим интеграл:

$$A_{r\infty} = \int_r^{\infty} dA = \int_r^{\infty} \frac{q \cdot 1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot dr$$

Определенный интеграл сходится к конкретному числу:

$$A = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

Полученная величина A называется потенциалом поля в точке a . При этом важно лишь расстояние r от заряда q , и если провести окружность радиусом r , то получим точки равного потенциала (полученная окружность будет принадлежать поверхности равного потенциала, называемой эквипотенциальной поверхностью). Достоинство такой характеристики поля в заданной точке заключается в том, что потенциал – величина скалярная, то есть может быть определена числом, а не вектором, как напряженность $\vec{E}$.

Работа сил поля A равна энергии, затрачиваемой полем при перемещении зарядов из одной точки поля в другую, и измеряется в джоулях (Дж = Н×м). Эта энергия обозначается φ , является важнейшей характеристикой поля в данной точке и называется *потенциалом электрического поля в данной точке*. Оценим работу сил поля при перемещении единичного пробного заряда $+q_0$ из точки 1 поля в точку 2 того же поля. Электрическое поле неподвижных зарядов потенциально, то есть потенциал зависит только от положения точки в электрическом поле, и не связан с направлением вектора напряженности поля, следовательно, искомую работу можно определить как разность потенциалов:

$$A_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}.$$

Величину $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ называют разностью потенциалов и измеряют в вольтах (В), таким образом, вольт количественно характеризует энергию необходимую для перемещения единичного положительного заряда из одной точки поля в другую. Иначе эту разность потенциалов называют напряжением между точками 1 и 2.

Далее представим, что из точки 1 в точку 2 переносите не единичный, но определенный заряд q . Тогда работа по перемещению заряда q из точки 1 с потенциалом φ_1 в точку 2 с потенциалом φ_2 может быть представлена в виде энергии:

$$A_{12} = W_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot U_{12}$$

Заряд, величиной q , может перемещаться из точки 1 в точку 2 в течение определенного времени и скорость перемещения заряда в проводнике будет определяться формулой

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Величина i называется силой тока и измеряется в амперах (А).

Энергия по перенесению заряда q во времени из точки 1 в точку 2 при этом будет выражаться производной dW/dt , которая определяет собой мощность P :

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} (q \cdot U_{12})$$

Пусть $U_{12} = \text{const}$, и мы получаем формулу, выражающую закон Джоуля - Ленца для мощности:

$$P = U_{12} \frac{dq}{dt} = U_{12} \cdot i$$

Мощность измеряется в ваттах ($\text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$).

1.5. Емкость плоского конденсатора

Диэлектрик (изолятор) не имеет свободных зарядов, способных перемещаться под действием сил электрического поля, то есть образовать ток, в этом состоит отличие диэлектрика от проводника (в металлическом проводнике имеются свободные электроны, а в электролитах свободные ионы). Воздух является хорошим диэлектриком.

Рассмотрим плоский конденсатор. Он представляет собой две проводящие (металлические) пластины, разделенные тонким слоем d диэлектрика (например, воздухом) рис.1.3. Пластины (площадью S) называют обкладками. Для зарядки конденсатора обкладки присоединяют к электродам источника электрической энергии (источник ЭДС), например, гальванического элемента. Гальванический элемент представляет собой устройство преобразующее

энергию химической реакции в электрическую энергию и состоит из электродов в виде пластин из определенного металла погруженных в электролит.

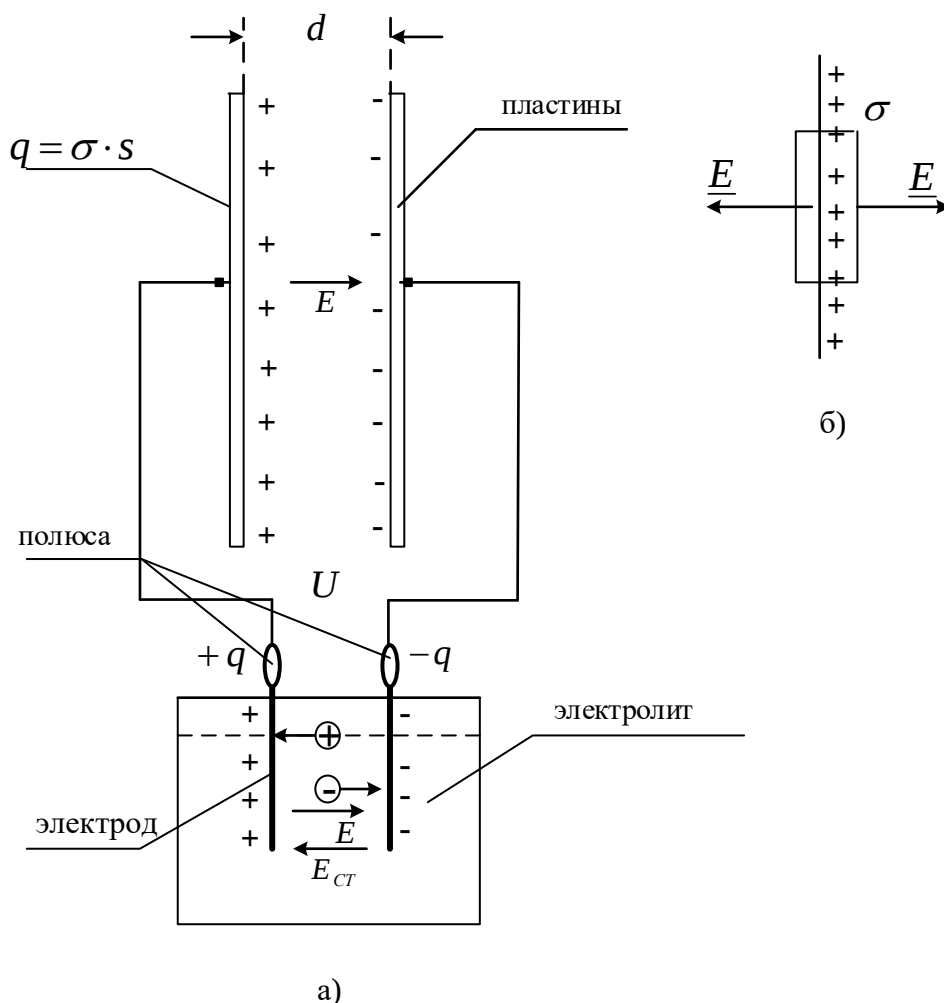


Рис 1.3. Плоский конденсатор а);
напряженность электрического поля пластины конденсатора б)

Свойства электролита таковы, что внутренние силы химической природы производят в электролите разделение зарядов по электродам. Накопление положительных зарядов на электроде образует положительный полюс, а накопление отрицательных зарядов на втором электроде – образует отрицательный полюс. Заряды электродов внутри элемента создают поле, препятствующее химическому разделению зарядов. По мере накопления зарядов на электродах, это противодействие возрастает. В момент равенства сил электрического поля и сил химического процесса разделение зарядов прекращается. Это происходит при равенстве $\vec{E} = \vec{F}_{\text{ст}}$, где $\vec{E}$ – напряженность электрического поля между электродами, $\vec{F}_{\text{ст}}$ – сторонняя сила химической природы, переносящая заряды против сил поля. Стороннюю силу называют также еще внутренней ЭДС $\vec{E}_{\text{вн}}$.

Если к полюсам источника ЭДС подсоединить конденсатор, то часть зарядов полюсов уйдет и расположится на пластинах (на обкладках) конденсатора. При этом внутреннее электрическое поле источника ослабевает, и сто-

ронные силы возобновляют перенос зарядов внутри источника против сил электрического поля, таким образом, поддерживается ЭДС источника. Одновременно, по мере накопления зарядов на пластинах конденсатора, перемещение зарядов от полюсов источника ЭДС к пластинам (обкладкам) конденсатора замедляется, а затем полностью прекращается. Обозначим поверхностную плотность зарядов на пластинах конденсатора как

$$\sigma = \frac{q}{s}$$

где s – площадь пластин, q – заряд пластины.

Выделим по поверхности пластин элемент ds с зарядом $dq = \sigma \times ds$. При большой площади пластины s , по сравнению с расстоянием между пластинами, электрическое поле будет направлено перпендикулярно элементу ds в обе стороны, рис. 1.3 б и его напряженность будет определяться выражением

$$E_{\sigma} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}.$$

При учете того, что электрическое поле между пластинами создается обоими зарядами $+\sigma$ и $-\sigma$, то напряженность электрического поля между пластинами суммируется и будет равна:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 s}.$$

Разность потенциалов между заряженными пластинами находится интегрированием напряженности по пути d (d – расстояние между пластинами). Напряженность электрического поля между пластинами $E = \text{const}$ и тогда напряжение между ними:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = E \cdot d = \frac{q}{\varepsilon_0 s} \cdot d.$$

Это выражение позволяет найти заряд на конденсаторе по известному напряжению:

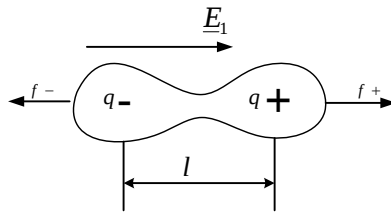
$$q = U \cdot \frac{\varepsilon_0 s}{d} = U \cdot C,$$

где C – емкость конденсатора в фарадах (Ф):

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{s}{d}.$$

1.6. Поляризация диэлектриков

Нейтральный атом любого диэлектрика, при внесении его в электрическое поле, превращается в диполь, это связано с тем, что уравновешенные в целом положительные и отрицательные заряды атома смещаются под действием напряженности электрического поля в противоположных направлениях, см. рис. 1.4.

Рис. 1.4. Образование диполя в электрическом поле $\underline{E}$

Это явление получило название поляризации, величина $p = q \times l$ называется дипольным моментом. Говорят, что поле индуцирует дипольный момент.

В атоме, состоящем из Z электронов (заряд $-Z \cdot e$) и протонов атомного ядра (заряд $+Z \cdot e$) помещенном в однородное электрическое поле напряженностью $\vec{E}$, возникает индуцированный электрический дипольный момент. Он обусловлен смещением отрицательного облака электронов относительно положительно заряженного ядра. Величина дипольного момента пропорциональна напряженности E и зависит от структуры атома, которая учитывается с помощью коэффициента α :

$$p = \alpha \cdot E.$$

Коэффициент α называют поляризуемостью. Диполь можно также характеризовать потенциальной энергией, равной работе, затраченной на его образование:

$$W_\alpha = \frac{\alpha \cdot E^2}{2} = \frac{1}{2} E \cdot p,$$

где $\alpha \cdot 10^{40} \text{Ф} \cdot \text{м}^2 = 0,2 \dots 30-40$ зависит от атома вещества.

Рассмотрим явление поляризации применительно к диэлектрику плоского конденсатора рис. 1.5. В первой картине между пластинами находится вакуум или воздух (а), а во второй – диэлектрик с хорошей поляризуемостью (б).

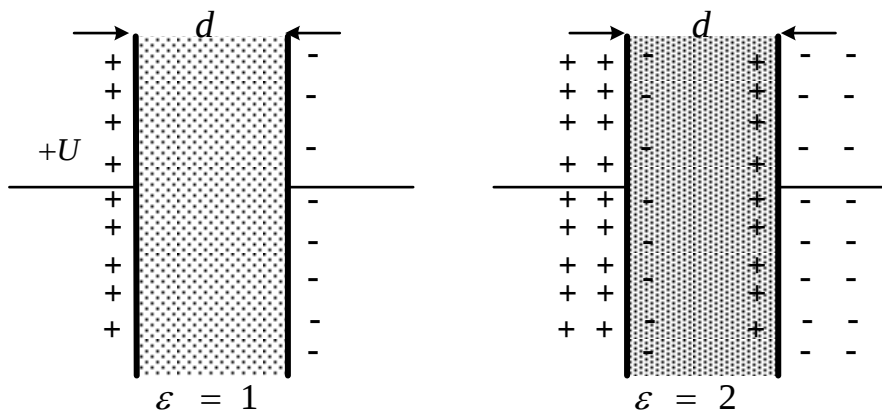


Рис. 1.5. Явление поляризации между пластинами плоского конденсатора с вакуумом а), с мраморным диэлектриком высокой поляризуемостью б)

Напряжение U , прикладываемое к пластинам в обоих случаях, одинаковое. Из-за поляризации диэлектрика в случае (б) на пластинах может образо-

вываться вдвое больше зарядов. Таким образом, второй конденсатор обладает в два раза большей емкостью. Число два – это условное произвольное число оно зависит от типа диэлектрика, обозначается как ε , и называется относительной диэлектрической проницаемостью. С учетом ε емкость конденсатора возрастает пропорционально величине ε и определяется формулой:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}.$$

Ниже в качестве примера приведены диэлектрические проницаемости некоторых диэлектриков.

Т а б л и ц а 1.2

Диэлектрик	ε
Воздух	1,0006
Эбонит	2,7...2,9
Стекло	5...10
Спирт	27
Вода	81

При уменьшении расстояния d между пластинами емкость C конденсатора растет, но при этом растет напряженность электрического поля в разделяющем пластины диэлектрическом пространстве так как:

$$E = \frac{U}{d} \left[\frac{\text{В}}{\text{м}} \right]$$

Увеличение напряженности E приводит к увеличению дипольного момента и силы, действующей на разрыв диполей. В случае разрыва диполь распадается на два иона, которые под действием поля начинают с ускорением, величина которого определяется величиной напряженности электрического поля, перемещаться к противоположным полюсам. За счет ударной ионизации образуется электрический ток, который называют током пробоя диэлектрика, при этом происходит потеря диэлектрических свойств диэлектриком. В случае же, например, конденсатора, при увеличении напряжения происходит пробой конденсатора и выход его из строя.

Пробивная напряженность зависит от типа и температуры диэлектрика. Наиболее легко пробивается воздух, и мы часто наблюдаем электрические разряды в воздухе в виде искры, электрической дуги или молнии.

Емкость важный параметр электрической цепи. Емкостью обладают любые два проводника, разделенные диэлектриком. К примеру, рассмотрим два параллельных цилиндрических провода с радиусами a и расстоянием между осями d , рис. 1.6. Это модель двухпроводной линии.

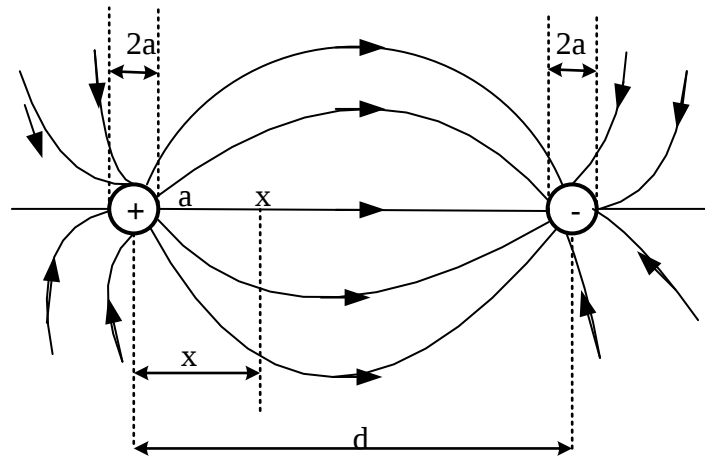


Рис. 1.6. К определению емкости двухпроводной линии

Если расстояние d сравнимое с a , то заряды на проводах будут распределены по поверхности проводов неравномерно и вычисление характеристик электрического поля будет сложным. Поэтому мы предположим, что расстояние между проводниками много больше их радиусов $d \gg a$. В этом случае оба провода по поверхности будут заряжены равномерно и напряженность поля, создаваемого ими, можно найти по формуле:

$$E = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} = \frac{q_{1 \times 1}}{2\pi\epsilon_0}$$

где q_1 - заряд на единицу длины провода.

Так как напряжение в электростатическом поле не зависит от формы пути, то для его вычисления выберем простейший путь в виде прямой линии, соединяющей оси проводов и перпендикулярной к их поверхности. Напряженность поля E , в какой-либо точке x на этой линии будет определяться как

$$E = \frac{q_{1+}}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{x} + \frac{q_{1-}}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{d-x}$$

Напряжение между проводами найдем интегрированием напряженности по прямой линии в пределах изменения x от a до $d-a$:

$$U = \int_a^{d-a} E dx = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \int_a^{d-a} \frac{dx}{x} + \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \int_a^{d-a} \frac{dx}{d-x} = \frac{q_1}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{d-a}{a} \approx \frac{q_1}{\pi\epsilon} \ln \frac{d}{a}$$

Емкость двухпроводной линии на каждую единицу длины (удельная емкость).

$$C_1 = \frac{q_1}{U} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d}{a}}$$

Заряд на единицу длины провода, если известно напряжение между проводами U равен:

$$q_1 = C_1 \cdot U$$

Рассмотрим далее процессы ионизации воздушных промежутков под действием напряженности электрического поля E .

Основной причиной возникновения электрического разряда в газе является ударная ионизация, которая возникает под действием электронов, ускоренных электрическим полем. Ударная ионизация характеризуется коэффициентом α , который определяет число актов ионизации, возникающих под действием электрона на пути 10^{-2} м. Коэффициент α зависит от напряженности электрического поля, температуры, плотности газа δ , а также от неоднородности поля в различных точках промежутка между электродами.

Для развития разряда в газе необходим хотя бы один свободный электрон. После первого акта ионизации образуются два свободных электрона, затем четыре и т. д. этот поток постоянно увеличивающегося числа электронов называется лавиной электронов.

В однородном поле напряженность одинакова во всех точках промежутка. Поэтому, если ионизация началась, она распространяется от одного электрода до второго и возникновение самостоятельного разряда обязательно означает полный пробой промежутка.

В промежутках с резко неоднородным полем, в которых радиус кривизны одного или обоих электродов может быть много меньше межэлектродного расстояния, возникает особая форма разряда – коронный разряд. При коронном разряде ионизация происходит лишь вблизи одного из электродов или вблизи обоих электродов, если они оба имеют малый радиус кривизны. Потому возникновение коронного разряда не означает полного пробоя промежутка. Случается, что возникновение коронного разряда переходит в последующий пробой промежутка.

Напряженность электрического поля, необходимая для пробоя промежутка при неизменной температуре зависит от давления. При низких давлениях увеличивается расстояние между атомами и количество эффективных столкновений электронов с диполями уменьшается и поэтому энергия электрического поля, а следовательно, и напряженность должны увеличиться, для того, чтобы как можно большее число столкновений электронов с диполями приводило к ионизации. При повышенных давлениях уменьшается расстояние между атомами – диполями, и электроны после образования до столкновения с атомами – диполями не успевают набрать скорость и энергию, поэтому не каждое столкновение с диполем или атомом приводит к их ионизации, следовательно, для увеличения числа столкновений, приводящих к ионизации, необходимо увеличить напряженность электрического поля.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

2.1. Электрический пробой внутренней изоляции

Этот пробой связан с кратковременным повышением напряженности электрического поля в диэлектрике и характеризуется кратковременной элек-

трической прочностью. Для внутренней изоляции различают два вида пробоя: *электрический и тепловой*.

При электрическом пробое образование и быстрое размножение подвижных заряженных частиц в изоляции происходит непосредственно под действием сильного электрического поля.

В случае теплового пробоя электрическое поле обуславливает сильный разогрев изоляции за счет диэлектрических потерь до теплового разрушения, которое сопровождается переходом диэлектрика в состояние повышенной проводимости.

Обычно под кратковременной электрической прочностью понимают минимальную напряженность электрического поля, при которой происходит электрический пробой. Напряжение, при котором достигается данная напряженность электрического поля называют пробивным напряжением.

Электрический пробой в изоляторах напоминает пробой в газах. Помимо твердого изоляционного материала используются жидкие материалы. Важное значение, в отличие от газов, в развитии пробоя твердой и жидкой изоляции играет ее однородность, то есть наличие примесей с меньшей электрической прочностью (влаги, газов и т.д.).

2.2. Тепловой пробой внутренней изоляции

При воздействии на изоляцию переменного напряжения U , количество теплоты Q_v , выделяющейся в единицу времени:

$$Q_v = \omega C U^2 \tan \delta,$$

где C – емкость изоляции; $\tan \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; ω – угловая частота.

Количество тепла $Q_{отв}$, отводимого от изоляции в окружающую среду:

$$Q_{отв} = Sk(\theta - \theta_{окр}),$$

где S – поверхность изоляции; k – коэффициент теплоотдачи; θ и $\theta_{окр}$ – температура изоляции и температура окружающей среды.

У большинства изоляционных материалов величина $\tan \delta$ с ростом температуры увеличивается:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{a(\theta - \theta_0)},$$

где θ_0 – температура, при которой $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0$, a – коэффициент, зависящий от вида изоляции.

С увеличением напряжения количество выделяемого тепла Q_v быстро растет, а количество отдаваемого тепла $Q_{отв}$ за счет теплоотдачи увеличивается медленно. Поэтому температура диэлектрика будет непрерывно нарастать, и происходит термическое разрушение изоляции с потерей диэлектрических свойств (вплоть до обгорания).

Напряжение теплового пробоя определяется условиями отвода тепла от изоляции и тепловыделениями в самой изоляционной конструкции. Сильное влияние оказывают также размеры и теплопроводность самой изоляции, других элементов конструкции, а также тепловыделением в токоведущих частях (проводах, изолированных обмотках). При непродолжительных повышениях напряжения изоляция может не успеть полностью нагреться и тепловой пробой не произойдет, даже если $U > U_{\text{пр}}$. Все пробой относятся к кратковременной прочности изоляции.

2.3. Длительная электрическая прочность изоляции

В процессе эксплуатации характеристики изоляционных конструкций изменяются. Качество изоляции с течением времени ухудшается: электрическая и механическая прочности снижаются, диэлектрические потери и проводимость утечки растут (происходит так называемое естественное старение). Старение изоляции принято исчислять в сроках ее жизни τ , который оценивают в годах.

Зависимость срока жизни τ изоляции от величины воздействующего напряжения обычно представляют в виде $\log \tau = f(\log U)$. В логарифмическом масштабе график этой зависимости близок к падающей прямой линии рис. 2.1.

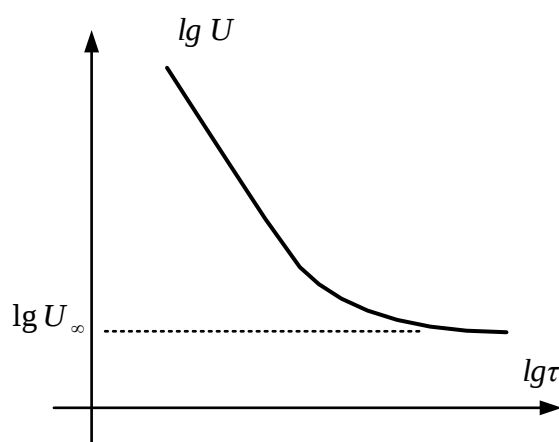


Рис. 2.1. Зависимость срока жизни τ изоляции от величины напряжения

Это означает, что «кривые жизни» могут быть представлены формулами, для среднего значения τ , в виде

$$\bar{\tau} = \frac{A_1}{U^n}; \quad \bar{\tau} = \frac{A_2}{E^n}$$

где n — показатель: для переменного напряжения 4,0 - 7,0, для постоянного напряжения 8,0 - 12,0. Коэффициенты A_1 и A_2 зависят от физико-химических свойств диэлектриков и здесь не рассматриваются.

2.4. Частичные разряды в изоляции

Согласно существующим представлениям основной причиной старения внутренней изоляции являются так называемые *частичные разряды*. Они представляют собой пробой отдельных слоев или участков изоляции, толщина которых много меньше полной толщины изоляции.

Частичные разряды возникают при некотором напряжении $U_{ч.р.}$ а точнее – напряженности $E_{ч.р.}$, в местах усиления электрического поля, или там, где имеются местные ослабления изоляции, например в газовых включениях. При напряжениях $U < U_{ч.р.}$ частичные разряды в изоляции отсутствуют, и электрическое старение не происходит.

Рассмотрим двухслойный диэлектрик (рис. 2.2) в конденсаторе.

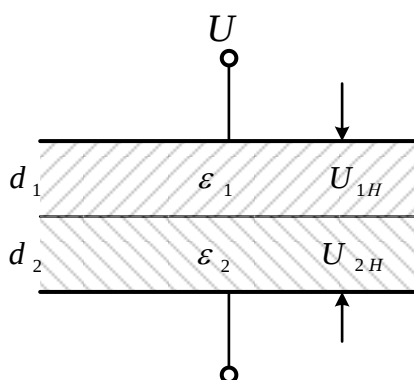


Рис. 2.2. Двухслойный диэлектрик конденсатора

В начальный момент приложения напряжения распределение напряжения по слоям происходит обратно пропорционально емкости слоев:

$$\frac{U_{1нач}}{U_{2нач}} = \frac{C_2}{C_1}$$

При одинаковой площади и толщине слоев напряжение между ними оказывается обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям:

$$\frac{U_{1нач}}{U_{2нач}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

так как

$$C_1 = \varepsilon_1 \frac{S}{d} \quad C_2 = \varepsilon_2 \frac{S}{d}.$$

Допустим, что $\varepsilon_2 = 6\varepsilon_1$ такое соотношение может иметь место в бумажно-масляной изоляции при газовых включениях, при условии, что диэлектрическая проницаемость газа в шесть раз меньше, чем масла. В последующем, из-за различного сопротивления утечки слоев, это соотношение меняется. Кроме того, толщина и площадь слоев здесь взяты одинаковыми, что в реальных условиях конечно же не выдерживается. Тем не менее, показано, что при газовых включениях, не превышающих долей миллиметра в них могут

возникать большие напряженности электрического поля и даже разряд. Схема изоляции с газовым включением (а) и схема ее замещения (б), приведены на рис. 2.3.

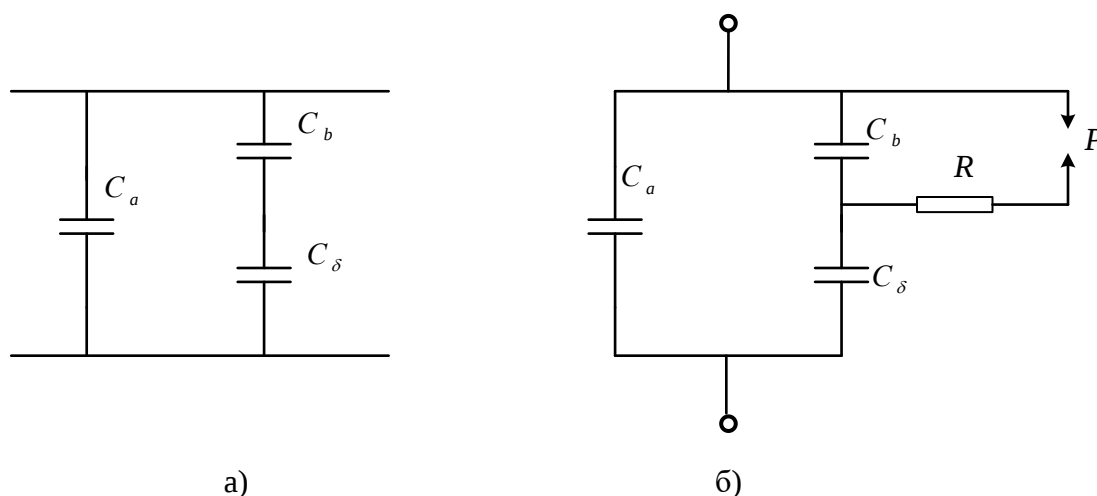


Рис. 2.3. Схема изоляции с газовым включением (а) и схема ее замещения (б)

Итак, частичные разряды (ЧР) в высоковольтной изоляции возникают в газовых включениях или в прослойках жидкого диэлектрика. Газовые включения могут появляться в изоляции в процессе изготовления (например, вследствие усадки масс и компаундов и прочее), или возникать вследствие растрескивания или расслоения изоляции от механических нагрузок, или при разложении диэлектриков с выделением газов.

Обычно размеры включений в высоковольтной изоляции не превышают долей миллиметра и составляют весьма малую часть от полной толщины изоляции. Однако они представляют собой слабые места в изоляции, так как газы имеют меньшую электрическую прочность, чем твердые и жидкие диэлектрики. Это является следствием того, что напряженности, что напряженности во включениях выше, чем в основной изоляции, из-за различия диэлектрических проницаемостей и окружающих включение диэлектриков.

Рассмотрим схему замещения рис. 2.3 (б). На этой схеме C_b – емкость газового включения; C_δ – емкость участка изоляции, расположенного последовательно с включением, C_a – емкость всей остальной изоляции. Срабатывание разрядника P имитирует пробой газового включения. Сопротивление R условно изображает сопротивление канала разряда во включении.

$$U_{mв} = U_m \frac{C_\delta}{C_\delta + C_b}; \quad U_{mб} = U_m - U_{mв}.$$

Так как емкость включения невелика, то есть $C_b \ll C_\delta$, то все напряжение U_m прикладывается практически ко включению, что и вызывает разряд. Разряд через сопротивление R практически мгновенно уменьшает U_b до нуля, после чего он гаснет. Однако восстановление напряжения U_b , после погасания разряда, приводит к последующим разрядам (частота до 10^8 Гц).

Разрушение изоляции под действием ЧР происходит главным образом вследствие бомбардировки диэлектриков электронами из канала разряда во включении (газовое включение). Абсолютная величина энергии, рассеиваемая в разряде невелика, однако она воздействует на весьма малый участок поверхности включения, где происходит мгновенное повышение локальной температуры, иногда до нескольких сотен градусов. Как следствие такого воздействия происходит разрушение малого объема диэлектрика с образованием побочных, иногда химически активных продуктов. Затем разряды концентрируются в образовавшихся углублениях, которые со временем растут, образуя в диэлектрике узкие («древовидные») каналы – щели. По мере удлинения каналов электрическая прочность изоляции снижается. Поэтому длительная работа внутренней изоляции может быть обеспечена лишь при ограниченной интенсивности ЧР.

3. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

3.1. Использование явлений абсорбции для контроля изоляции

Изоляция высоковольтных установок состоит, как правило, из нескольких различных диэлектриков и поэтому даже в хорошем состоянии не является однородной. При увлажнении или загрязнении отдельных его слоев степень неоднородности резко возрастает, так как проводимость увлажненных слоев увеличивается по сравнению с нормальной в 100 - 1000 раз и более. Одновременно повышается и диэлектрическая проницаемость, однако в значительно меньшей степени (в 1,5 – 2,0, не более), поэтому практически с этим можно не считаться.

В простейшем случае неоднородная изоляция может рассматриваться как состоящая из двух слоев, каждый из которых характеризуется своей проводимостью γ и диэлектрической проницаемостью ε , рис. 3.1. Очевидная схема замещения показана на рис. 3.1, б, где

$$R_1 = \frac{d_1}{\gamma_1 S} \text{ и } R_2 = \frac{d_2}{\gamma_2 S}$$

- сопротивление утечки соответствующих слоев в установившемся режиме;

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{S}{d_1} \text{ и } C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{S}{d_2}$$

- емкости этих слоев,
- S площадь электродов.

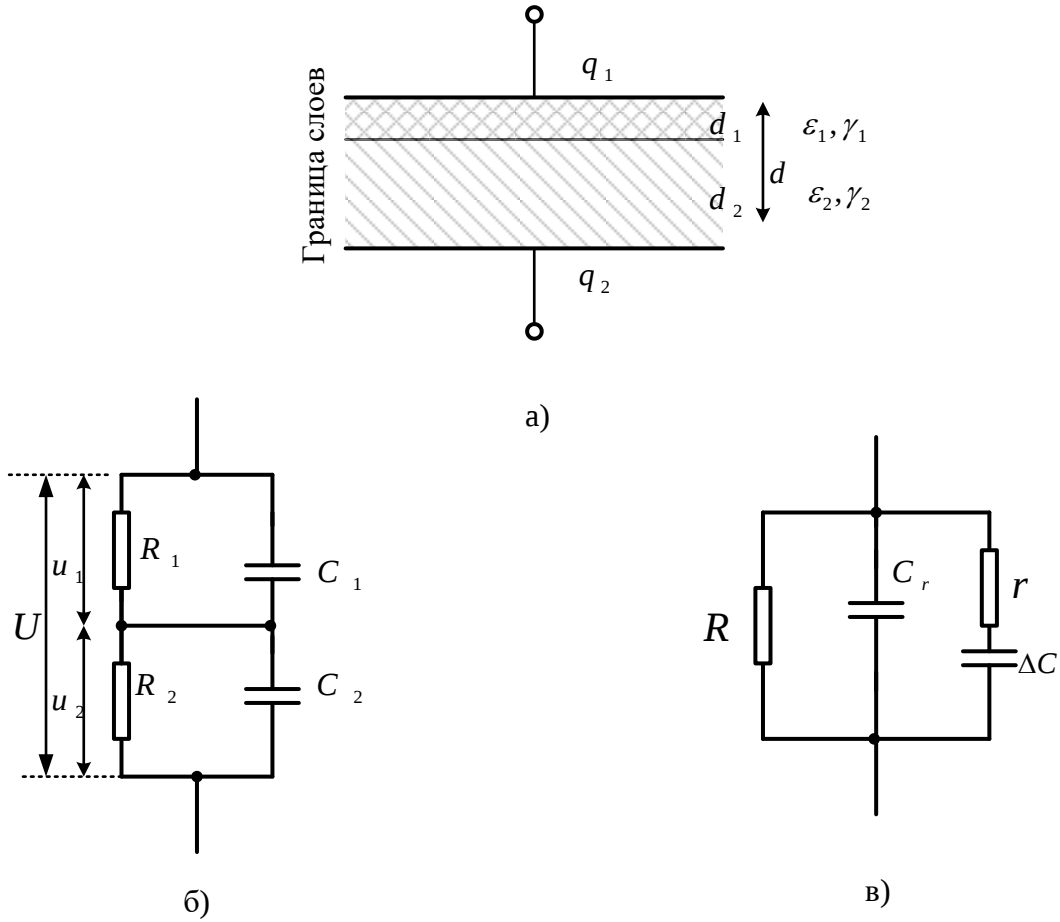


Рис. 3.1. Двухслойная изоляция (а) и схемы ее замещения (б) и (в)

При длительном воздействии на неоднородную изоляцию постоянного напряжения на границе слоев накапливается заряд абсорбции, равный:

$$q_{\text{абс}} = q_1 - q_2 = U_1 C_1 - U_2 C_2$$

откуда

$$q_{\text{абс}} = U \frac{C_1 R_1 - C_2 R_2}{R_1 + R_2}$$

Если использовать схему замещения рис 3.1, в, то вся изоляция будет иметь на схеме замещения следующий физический смысл:

$R = R_1 + R_2$ – сопротивление утечки всей изоляции;

$C_r = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ – геометрическая емкость изоляции, определяемая лишь ее размерами и диэлектрической проницаемостью слоев (последовательное включение C_1 и C_2);

r и ΔC – отражают накопление зарядов абсорбции по линии раздела слоев.

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}; \quad \Delta C = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)} \quad (3.1)$$

Из приведенных формул следует, что в случае однородной изоляции, когда $R_1 C_1 = R_2 C_2$ или $\varepsilon_1/\gamma_1 = \varepsilon_2/\gamma_2$, сопротивление $r = \infty$, а емкость $\Delta C = 0$.

При этом схема замещения включает только R и C_r , а заряд абсорбции не накапливается. В случае неоднородной изоляции в начальный момент приложения постоянного напряжения ток оказывается большим из-за заряда емкости C_r , и одновременно происходит накопление заряда абсорбции на емкости ΔC . В последующие моменты времени происходит быстрый разряд емкости C_r через сопротивление R , и более медленный разряд емкости ΔC через сопротивление $r + R$. Постоянная времени этого разряда $r\Delta C$ велика (так как $r \gg R$);

$$T = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}$$

С этой же постоянной времени происходит и изменение тока разряда. Суммарный ток можно представить как:

$$i = \frac{U_0}{R} + \frac{U_0}{r} e^{-t/T}. \quad (3.2)$$

Соответственно при измерении сопротивления изоляции мегомметр будет показывать сопротивление, изменяющееся по закону:

$$R(t) = \frac{U_0}{i(t)} = \frac{R}{1 + \frac{R e^{-t/T}}{r}}. \quad (3.3)$$

Пусть увлажненный слой изоляции составляет d_1/d . Примем условие, что $\gamma_{увл}/\gamma_{сух} = 100$ ($\varepsilon_{увл}/\varepsilon_{сух}$), тогда, используя (3.1), (3.2) и (3.3) можно рассчитать изменение сопротивления изоляции во времени. За величину сравнения принимаем сопротивление сухой изоляции ($R_{сух}$). Тогда по итогам расчетов получим:

При $d_1/d = 0,001$, в момент $t = 0$ $R(0) = 0,9$ и сопротивление восстанавливается до $R(t) = 1,0$ за время $t/T_{сух} = 2$;
при $d_1/d = 0,003$ имеем: $R(0) \approx 0,75$, $t/T_{сух} = 2$;
если $d_1/d = 0,03$, то $R(0) \approx 0,25$, $t/T_{сух} = 3,5$; при этом $R_{уст} = R_{сух}$.

Таким образом, малый по толщине слой увлажнения (до 0,03) не сильно сказывается на установившемся сопротивлении $R \approx R_{сух}$, которое устанавливается (по показаниям мегомметра) достаточно быстро.

В то же время, при толщине увлажнения $d_1/d = 0,1$ начальное показание $R(0)$ составляет лишь 0,1 о.е., установившееся значение составит

$R_{уст} \approx 0,85$, а время установления $t/T_{уст} = 3,5$. При еще большем слое увлажнения $d_1/d=0,3$ начальное сопротивление $R(0) \approx 0$, после чего сопротивление медленно увеличивается до установившегося значения $R \approx 0,65$ и время установления затягивается до $t/T_{сух} = 4-5$, и составляет уже секунды. Очевидно, что измерение времени установления сопротивления изоляции, позволяет выявить ее увлажнение.

Вышеуказанные особенности изменения $R(t)$ во времени используют для оценки степени увлажнения изоляции. При испытаниях измерение сопротивления изоляции производят мегомметром, и показания мегомметра снимают последовательно через 15 (R_{15}) и 60 (R_{60}) секунд после подачи напряжения U_0 , на испытываемую изоляцию. Заключение о качестве изоляции делают по величине R_{60} , а также по отношению $R_{60}/R_{15} = k_{абс}$ – коэффициенту абсорбции.

Опытным путем установлено, что для наиболее распространенных видов изоляции $k_{абс} > 1,3$ при нормальной (допустимой) влажности, а при недопустимо сильном увлажнении близок к 1,0.

Рассмотрим более подробно мониторинг состояния изоляции с помощью данного метода. Наиболее частыми причинами снижения сопротивления изоляции обмоток является загрязнение их токопроводящей пылью и увлажнение.

Увлажненность изоляции обмоток электрических машин можно определить с помощью измерения, так называемого, коэффициента абсорбции. Физический смысл коэффициента абсорбции показан выше. Исследовать состояние изоляции на предмет увлажнения, можно проведя измерение сопротивление изоляции с помощью мегомметра. Мегомметр измеряет сопротивление изоляции по току утечки, который состоит из сквозного тока и тока абсорбции. Сквозной ток называют емкостным. Время затухания сквозного тока лежит в пределах от долей, до нескольких секунд в зависимости от мощности машины. Ток абсорбции, напротив, затухает относительно медленно.

Установлено, что абсорбционный ток практически не зависит от влажности изоляции, в то время как сквозной ток проводимости с увеличением влажности возрастает. Поэтому отношение этих токов является хорошим показателем влажности.

На практике производят два измерения сопротивления изоляции – через 15 секунд (когда заряд геометрической емкости завершен) и через 60 секунд (когда практически закончен заряд абсорбционной емкости) с момента приложения напряжения мегомметра. Вычислив отношение R_{60}/R_{15} называемое коэффициентом абсорбции $k_{абс}$, можно по его значению определить степень увлажнения изоляции.

Синхронные машины, крупные асинхронные двигатели, трансформаторы можно эксплуатировать без сушки изоляции, если $k_{абс} > 1,3$ при температуре обмоток от $+10$ до $+30$ °С. Величина $k_{абс}$ при неувлажненной изоляции может достигать 2-3 и более. При коэффициенте абсорбции, близком к единице, изоляция обмоток считается увлажненной и электрическую машину необходимо подвергнуть сушке.

Цель сушки электрической машины заключается в удалении влаги из изоляции обмоток. Удаление влаги происходит за счет так называемой термической диффузии, вызывающей перемещение влаги в направлении потока тепла. Перемещение влаги происходит вследствие перепада влажности в разных слоях изоляции: из слоев с большей влажностью влага перемещается в слои с меньшей влажностью. Перепад влажности создается перепадом температуры. Чем больше температурный перепад, тем интенсивнее происходит сушка, поэтому, нагревая внутренние части обмотки (например: током), можно создать перепад температур между внутренними и внешними слоями изоляции и тем ускорить процесс сушки.

3.2. Тангенс угла диэлектрических потерь

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ - важнейший параметр, характеризующий состояние изоляции. Величина $\operatorname{tg} \delta$ характеризует потери в диэлектрике. Возрастание $\operatorname{tg} \delta$ в процессе эксплуатации происходит в результате общего старения изоляции и может привести к тепловому пробую.

Величина диэлектрических потерь:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

где U – действующее значение переменного напряжения; ω – угловая частота; C – емкость изоляции, δ – угол диэлектрических потерь.

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

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

где δ – угол между векторами полного тока и реактивной составляющей тока в векторной диаграмме токов в изоляции, рис. 3.2.

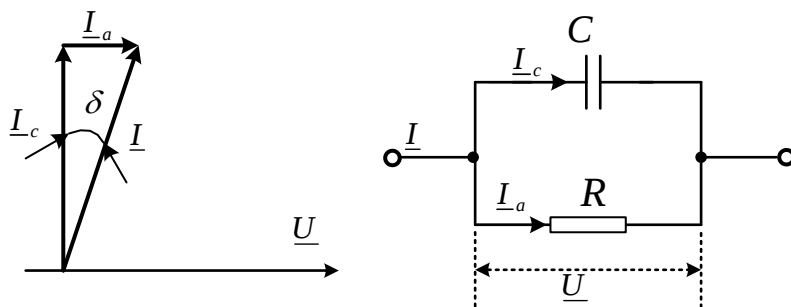


Рис. 3.2. Схема замещения и векторная диаграмма токов в изоляции

Увеличение тангенса угла потерь обусловлено увлажнением изоляции, ионизацией газовых включений в расслоившейся изоляции, поверхностным загрязнением изоляции. Значение $\operatorname{tg} \delta$ зависит также от температуры, величины напряжения, приложенного к изоляции и его частоты. Тангенс угла диэлектрических потерь – удельная величина, характеризующая диэлектрические потери в единице объема изоляции. Поэтому его существенное увеличение наблюдается только при увеличении потерь в значительной части объема изоляции. Покажем это для случаев параллельного и последовательного расположения диэлектриков с различными значениями тангенса угла диэлектрических потерь, рис. 3.3.

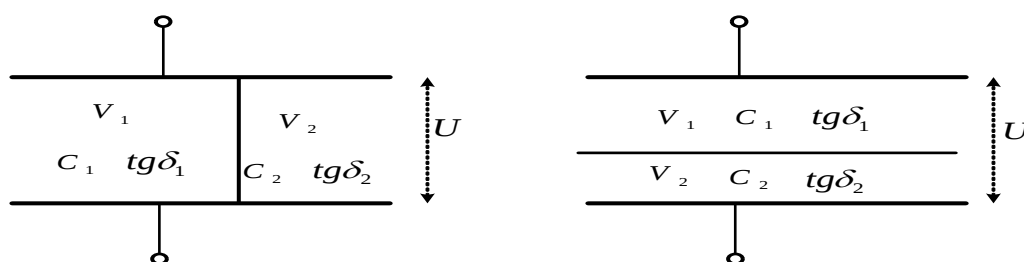


Рис. 3.3. Параллельное и последовательное расположение диэлектриков

В первом случае (параллельное соединение):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}$$

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

$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg} \delta_2$$

Из последнего следует, что результирующий тангенс угла потерь будет незначительно превышать тангенс угла потерь основного объема изоляции.

При последовательном расположении слоев:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_1 + C_1 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}$$

Если слой с повышенным значением тангенса угла потерь имеет незначительную толщину, то $C_2 \gg C_1$, в этом случае:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_1}{C_2} \operatorname{tg} \delta_2.$$

3.3. Измерение сопротивления изоляции мегаомметром

Сопротивление изоляции обычно измеряют переносными приборами – мегаомметрами при отключенном от сети электрооборудовании. Величина

сопротивления определяется как отношение постоянного напряжения, приложенного к изоляции, к току, протекающему в изоляции:

$$R_{\text{из}} = \frac{U}{I}$$

Источником постоянного напряжения в мегаомметре служит генератор с постоянными магнитами Γ , имеющий ручной или электрический привод. Прибор для измерения сопротивления изоляции – логометр $\mathcal{L}$ имеет две расположенные под углом рамки 1 и 2. Последовательно с рамками включены ограничительные сопротивления R_1 и R_2 . Ток i_1 в рамке 1 имеет постоянное значение и пропорционален напряжению, приложенному к изоляции. Ток i_2 в рамке 2 определяется величиной сопротивления R_x изоляции. Отклонение стрелки прибора, связанной с поворачивающимися рамками, пропорционально отношению i_x/i_1 , поэтому он измеряет R_x (показания стрелки отградуированы в масштабе мегаом или килоом).

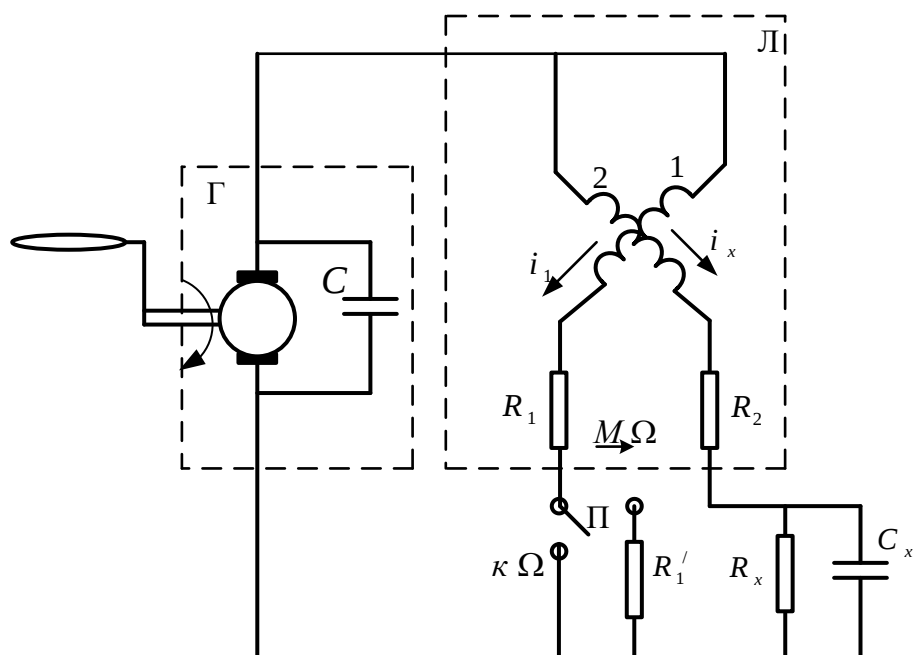


Рис. 3.4. Упрощенная схема мегаомметра

Результат измерения не зависит от напряжения генератора, но важно, что оно поддерживается стабильным. В случае большой емкости C_x и при случайных колебаниях напряжения в рамке 2 протекает ток перезаряда, меняющийся во времени. Это вызывает колебания стрелки логометра и затрудняет измерение. Переключатель Π устанавливает пределы измерения сопротивления изоляции в килоомах ($k\Omega$), или в мегаомах ($M\Omega$).

Для измерения сопротивления изоляции высоковольтного оборудования используются мегаомметры на напряжение 500, 1500 и 2500В. Переключатель Π устанавливает шкалу по измерению R_x в килоомах ($k\Omega$), или в мегаомах ($M\Omega$).

Кроме аналоговых приборов, описанных выше, широко используются цифровые мегаомметры. Цифровой прибор работает несколько иначе. Здесь нет никаких физически отклоняющихся катушек, зато есть источник точно калиброванного постоянного напряжения, который через схему цифрового амперметра включается последовательно цепи, сопротивление которой нужно узнать. В зависимости от характеристик исследуемой цепи, напряжение на щупах прибора будет разным, начиная от 100 вольт, заканчивая всеми 2500 вольтами, если измеряется сопротивление высоковольтной цепи. Это напряжение выбирается специальным переключателем или кнопками на панели прибора. Есть, безусловно, нормативы, согласно которым цепи разного рабочего напряжения проверяются соответствующим напряжением на щупах мегаомметра. Цифровые мегаомметры могут питаться от гальванических элементов, аккумуляторов, индивидуальных блоков питания.

При измерении сопротивления мегаомметром опираются на следующие нормы:

- Электрические цепи с рабочим напряжением до 50 вольт испытываются напряжением мегаомметра 100 вольт, при этом сопротивление цепи не должно быть меньше 0,5 МОм. Полупроводниковые приборы, входящие в диагностируемую цепь, для предотвращения их выхода из строя, должны быть зашунтированы.

- Электрические цепи с рабочим напряжением от 50 до 100 вольт испытываются напряжением мегаомметра 250 вольт.

- Электрические цепи с рабочим напряжением от 100 до 380 вольт испытываются напряжением мегаомметра от 500 до 1000 вольт. Что касается осветительной проводки, она испытывается напряжением 1000 вольт, при этом сопротивление не должно быть меньше 0,5 МОм.

Электрические цепи с рабочим напряжением от 380 до 1000 вольт испытываются напряжением мегаомметра от 1000 до 2500 вольт. К оборудованию такого типа относятся распределительные устройства, щиты и токопроводы. Сопротивление секции цепи (каждая секция промеряется отдельно) при этом не должно быть менее 1 МОм.

3.4. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь

На практике при контроле изоляции высоковольтного электрооборудования для измерения применяют мост переменного тока Шеринга. Мост Шеринга — измерительный мост переменного тока, предназначенный для измерения электрической ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции высоковольтного электрооборудования, а также, в электрических кабелях. Назван так по имени немецкого инженера и изобретателя этого устройства Геральда Шеринга (1880 – 1959).

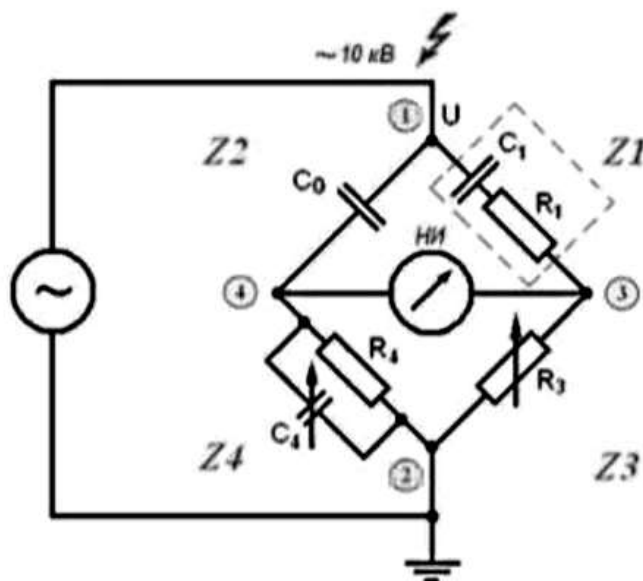


Рис. 3.5. Упрощенная схема моста Шеринга:

C_1 — ёмкость испытуемой изоляции объекта контроля;

R_1 — активное сопротивление объекта контроля;

C_0 — ёмкость образцового (эталонного) конденсатора;

R_3 — безындукционный переменный резистор;

C_4 — магазин ёмкостей с переменным конденсатором;

R_4 — переменный безындукционный резистор, включённый параллельно C_4

Мост Шеринга представляет собой одинарный мост переменного тока, имеющий четыре плеча $Z1$, $Z2$, $Z3$, $Z4$, в одно плечо которого включается магазин ёмкостей C_4 и параллельно присоединённое к нему постоянное активное сопротивление R_4 . в противоположное плечо включается объект контроля, эквивалентная электрическая схема которого состоит из последовательно соединённых ёмкостного C_1 и активного сопротивления R_1 в третье плечо включается магазин активных сопротивлений R_3 , в четвёртое — эталонный (образцовый) конденсатор C_0 .

На одну диагональ моста (точки 1, 2) подаётся переменное напряжение питания измерительной схемы (обычно 10 кВ). К другой диагонали подключается нуль-индикатор (НИ) переменного напряжения. С точки зрения схемотехники, одинарные мосты — это комбинация двух делителей напряжения и нуль - индикатора, включённого между ними. Рассматривая схему моста с этой точки зрения, можно прийти к выводу, что при равенстве произведения комплексных сопротивлений двух противоположных плеч произведению двух других противоположных плеч моста, разность потенциалов на нуль-индикаторе будет равна нулю.

Равновесие моста переменного тока, в отличие от равновесия моста постоянного тока, достигается лишь при соблюдении двух условий:

1) Отношение модулей полных сопротивлений смежных плеч моста должны быть равны между собой:

$$Z_1/Z_2 = Z_3/Z_4$$

откуда следует, что произведения модулей полных сопротивлений противоположных плеч моста должны быть равны между собой:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3; \quad (5)$$

где Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 — комплексные (полные) сопротивления плеч моста.

2) Разности фазовых углов смежных плеч моста должны быть равны между собой:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$$

Откуда следует, что суммы фазовых углов противоположных плеч моста должны быть равны между собой:

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$$

Данное утверждение верно, если входное сопротивление нуля-индикатора очень велико, а в идеале — равно бесконечности. При конечном входном сопротивлении нуля-индикатора последний будет вносить погрешность в измерительную схему, что необходимо учитывать.

Приведение моста в состояние, при котором нуля-индикатор покажет нулевое значение, называется *балансировкой моста*.

Из условий равновесия моста переменного тока следует, что для балансировки необходима регулировка не менее двух параметров мостовой схемы.

Процесс уравнивания заключается в попеременном регулировании этих параметров. При этом равновесие моста достигается большим или меньшим числом переходов от регулирования одного параметра к регулированию другого.

Балансировка моста производится поочерёдными изменениями сопротивления R_3 и ёмкости магазина конденсаторов C_4 , при этом происходит выравнивание напряжений в диагонали (в точках 3 и 4) моста.

При наступлении равновесия моста, которое контролируется по показаниям нуля-индикатора, выполняется равенство (5) откуда определяются параметры изоляции контролируемого объекта:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4$$

$$C_1 = \frac{R_4}{R_3} C_0$$

Для расширения пределов измерения ёмкости контролируемого объекта параллельно резистору R_3 включается шунт, а изменяя сопротивление резистора R_4 , можно изменять пределы измерения $\tan \delta$. Для упрощения расчётов сопротивление резистора выбирается равным $10^n/\pi$, где n целое число.

Тогда при промышленной частоте 50 Гц круговая частота будет равна:

$$\omega = 2\pi f = 100\pi$$

а тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\tan \delta = 10^{n+2} C_4$$

Если значение ёмкости C_4 выразить в микрофарадах, то значение измеренного $\tan \delta$ будет определяться следующими соотношениями:

R_4	$100/\pi$	$1000/\pi$	$10000/\pi$
$\operatorname{tg} \delta$	$0,01 \cdot C_4$	$0,1 \cdot C_4$	C_4
$\operatorname{tg} \delta \%$	C_4	$10 \cdot C_4$	$100 \cdot C_4$

Измерения мостом Шеринга могут выполняться по прямой, перевёрнутой и обратной схемам включения. При прямой схеме измерений заземляется точка 2 моста; при перевёрнутой схеме - точка 1; при обратной схеме - точка 3. Поэтому обратная схема измерений иногда называется схемой с заземлённой диагональю.

4. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

К выполнению работ в лаборатории Техники высоких напряжений (ТВН) допускаются сотрудники кафедры, изучившие оборудование лаборатории, прошедшие инструктаж по технике безопасности (ТБ) и имеющие соответствующую квалификационную группу по ТБ. Работы на установках высокого напряжения производятся бригадой в составе не менее 2-х человек. Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ после прохождения инструктажа по ТБ, о чем должна быть сделана запись в журнале инструктажа по ТБ. Работа на установках высокого напряжения (ВН) проводится студентами под руководством преподавателя. Самостоятельная работа студентов на установках ВН не допускается.

4.1. Подготовка установки к работе

Перед началом работы на установке ВН необходимо убедиться в следующем:

1. Рубильники питания отключены, на рубильнике с видимым разрывом висит плакат «**Не включать! Работают люди!**».
2. На стороне высокого напряжения установки наложено переносное заземление.
3. Регулятор напряжения находится в нулевом положении.
4. Сетчатое ограждение, заземление, блокировка и световая сигнализация исправны.
5. Дверь ограждения открыта.

Только убедившись в выполнении всех указанных выше пунктов, можно производить работы на стороне высокого напряжения.

4.2. Порядок включения установки

Перед включением установки необходимо:

1. Проверить, что все члены бригады находятся на рабочих местах и за ограждением никого нет.
2. Предупредить бригаду словами: **«Подаю напряжение»**, снять временное заземление, включить сетевой рубильник или выключатель.
3. Включить установку вторым рубильником, максимальным автоматом и с помощью регулятора напряжения повышать напряжение до необходимой величины. С момента снятия заземления все элементы испытательной установки считаются под напряжением, и производить какие-либо пересоединения в схеме **ЗАПРЕЩАЕТСЯ!** После включения установки – выполнять только ту работу, к которой допущены руководителем.

4.3. Порядок выключения установки

После окончания работы на установке или после автоматического отключения установки необходимо:

1. Перевести регулятор напряжения в положение, соответствующее минимальному напряжению.
2. Отключить рубильники питания, обеспечить в цепи питания видимый разрыв и вывесить плакат: **«Не включать! Работают люди!»**.
3. С помощью переносного заземления произвести разрядку заряженных емкостей (конденсаторов, кабелей), наложить переносное заземление на высоковольтный вывод трансформатора и сообщить членам бригады: **«Напряжение снято!»**. После этого можно производить переключения в схеме испытательной установки.

4.4. Перечень запрещенных действий

1. Не оставлять установку, находящуюся под напряжением, без присмотра.
2. Не находиться во время работы установки за ограждением, не прикасаться к ограждению, не протягивать сквозь ограждение руки, посторонние предметы и т.д.

4.5. Действия в аварийных случаях

При возникновении аварийной обстановки необходимо:

1. Немедленно отключить рубильники питания.

2. Наложить переносное заземление на высоковольтный вывод испытательного трансформатора.

3. В дальнейшем действовать в соответствии с характером и размерами очага аварии, стремясь к возможно быстрой ее ликвидации.

4.6. Перечень защитных устройств и средств

1. Сетчатые ограждения вокруг испытательного поля высокого напряжения.

2. Дверная блокировка, световая сигнализация, предупредительные плакаты.

3. Заземление сетчатого ограждения, корпуса испытательного трансформатора регулятора напряжения.

4. Временное переносное заземление.

5. Вспомогательные защитные средства: диэлектрические коврики и перчатки.

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

5.1. Содержание отчета по лабораторной работе и правила его оформления

Отчет составляется на листах бумаги 11 формата. На титульной странице отчета указываются:

Название учебного заведения, кафедры.

Номер лабораторной работы и название предмета (дисциплины).

Наименование лабораторной работы, фамилия и инициалы исполнителя, номер группы, специальность.

Дата выполнения работы. Пример выполнения титульного листа в приложении 4.

На последующих страницах приводятся следующие сведения:

Краткое изложение цели исследования и описание объекта исследования с указанием его основных параметров или характеристик.

1. Краткое описание методики проведения лабораторной работы.

2. Электрические схемы, по которым выполнялись исследования и технические характеристики использованного основного оборудования.

3. Результаты наблюдений в виде таблиц. Все таблицы и схемы должны иметь наименования.

4. Расчетные соотношения и формулы, используемые в работе. Примеры расчета в цифрах.

5. Необходимые зависимости, представленные в виде графиков.

При построении кривых следует пользоваться масштабами, выражающимися числами 1, 2, 5, умноженными на 10^n , где n - целое число. Под каждым графиком должно быть указано его наименование. Если на графике приводятся несколько кривых - каждая кривая помечается цифрой, а под графиком дается необходимое разъяснение. По каждой кривой в отчете приводится расчет 2-3 точек.

На графиках необходимо показать точки, полученные во время эксперимента или в результате расчета, по которым строились кривые. На координатных осях графиков нужно указывать наименование величин и их размерности.

6. Выводы и заключение по полученным результатам.

7. Подпись исполнителя.

8. Отчеты выполняются чернилами. Графики и схемы можно выполнять карандашом с применением необходимых чертежных инструментов.

Каждый член студенческой бригады выполняет индивидуальный отчет по лабораторной работе.

Лабораторная работа № 1

Тема: **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ**

1.1 Цель работы

Экспериментальное исследование зависимостей разрядных напряжений в воздухе от расстояния между электродами, конфигурации электрического поля (слабонеоднородное, неоднородное), конфигурации электродов.

1.2 Теоретические положения

В качестве изоляции между проводами, ошиновкой и конструктивными элементами электрических распределительных устройств (ГРЩ, РЩ и т. д.), внешней изоляции трансформаторов и электрических аппаратов широко используются воздушные промежутки. Знание основных закономерностей возникновения электрических разрядов в воздухе, учет влияния различных факторов на электрическую прочность воздушных промежутков позволяют определять ее величину при проектировании высоковольтного оборудования и высоковольтных конструкций.

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 α , который определяется как число ионизации, совершаемых одним электроном на пути в 1 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 η , зависящий от соотношения E/p и вида газа и определяемый из экспериментальных данных (где E - напряжённость электрического поля, p - давление).

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

$$\alpha_{эф} = \alpha - \eta. \quad (1.1)$$

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

$$n = n_0 \exp \left[\int_0^x \alpha_{эф}(E) dx \right], \quad (1.2)$$

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 не меньшим 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 . В неоднородных электрических полях полному электрическому пробое промежутка предшествует возникновение короны – одного из видов самостоятельного разряда. Поэтому в неоднородных полях начальное напряжение соответствует напряжению возникновения короны, а в однородных – электрическому пробое.

Начальные и пробивные напряжения (амплитудное значение) в киловольтах для простейших геометрических форм электродов можно определить из эмпирических выражений.

Параллельные плоские электроды:

$$U_0 = 24,5\delta d + 6,4\sqrt{\delta d}, \quad (1.3)$$

где $\delta = \frac{pT_0}{p_0T}$ – относительная плотность воздуха; p_0, T_0 – соответственно давление и температура воздуха при нормальных условиях ($p_0 = 101300$ Па, $T_0 = 293$ К); p, T – соответственно давление и температура воздуха в условиях эксперимента; d – расстояние между электродами, см.

Сфера-сфера:

$$U_0 = \frac{1}{f} 27,2\delta \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{rd}} \right) d, \quad (1.4)$$

где f – геометрический фактор; r – радиус сферы.

При симметрично включенном напряжении

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

Если одна из сфер заземлена, величина f определяется из табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

d/r	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	1,01	2,34

При условии $d/r \ll 2$ формула (1.4) дает величину пробивного напряжения промежутка, при $d/r > 2$ – напряжения начала короны.

Коаксиальные цилиндры:

$$U_0 = 24,5\delta[1 + 0,65(\delta r_0)^{-0,38}]r_0 \ln \frac{R}{r_0}, \quad (1.5)$$

где r_0, R – соответственно радиусы внутреннего и наружного цилиндров.

Формула (1.5) дает значение пробивного напряжения промежутка при $R/r_0 < 2,718$ и начального напряжения – при $R/r_0 > 2,718$. Из анализа выражения $U_0 = 24,5\delta[1 + 0,65(\delta r_0)^{-0,38}]r_0 \ln \frac{R}{r_0}$, следует, что величина U_0 имеет экстремум при $R/r_0 = 2,718$.

Параллельные цилиндры:

$$U_0 = 2 \left[30,3\delta \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{rd}} \right) \right] r \ln \frac{d}{r} \quad (1.6)$$

где d – расстояние между электродами, см;

r – радиус электродов, см.

Формула (1.6) даёт значение пробивного напряжения при $\frac{d}{r} < 30$, но при условии, что $r \ll d$ и значения коронных напряжений при $\frac{d}{r} > 30$.

Стержневые электроды:

Для незаземлённых стержней

$$U_0 = \sqrt{2} \delta(14 + 3,36d) \quad (1.7)$$

Один стержень заземлён

$$U_0 = \sqrt{2} \delta(14 + 3,16d) \quad (1.8)$$

Промежуток стержень – плоскость

$$U_0 = \sqrt{2} \delta(7 + 3,36d) \quad (1.9)$$

Формулы (1.7), (1.8), (1.9) справедливы при расстоянии между электродами $d \geq 8$ см для переменного напряжения и дают амплитудные значения разрядных напряжений.

При одинаковых расстояниях между электродами наименьшие пробивные напряжения получаются для промежутка стержень-плоскость, поле которого наиболее неравномерно.

В резконеоднородных несимметричных электрических полях (стержень-плоскость, коаксиальные цилиндры при $R \gg r_0$) при воздействии выпрям-

ленного 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 объемного 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 счет влияния положительного объемного заряда ионов и уменьшается в глубине промежутка. Это облегчает появление короны у поверхности электрода, но затрудняет процесс прорастания разряда вглубь 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 счет уменьшения коэффициента ударной ионизации электронами в результате их прилипания к электроотрицательным молекулам водяного пара. Приведение экспериментальных значений U_0 к условиям нормальной относительной влажности воздуха (63 %) при $T = 293$ К производится с помощью поправочного коэффициента k , определяемого из выражения

$$U_{0н} = U_0 k , \quad (1.10)$$

где $U_{0н}$ – разрядное напряжение при нормальных условиях. График определения коэффициента k приведен в ГОСТ 1516.2.

1.3. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 в прил. 5. Источником высокого напряжения промышленной частоты является испытательный трансформатор Т1 типа ИОМ-70/30. Обмотка γ спе-

циально предназначена для измерения высокого выходного напряжения трансформатора вольтметром, шкала которого градуирована в киловольтах. Если испытательный трансформатор ИОМ не имеет специальной обмотки для измерения высокого напряжения, то его можно измерить с помощью электростатического киловольтметра С-96, подключаемого к обмотке ВН, или по показаниям вольтметра $pV1$ и коэффициенту трансформации трансформатора ИОМ. Следует помнить, что при измерениях получают действующие значения напряжения. Для получения амплитудных значений (при испытании на выпрямленном напряжении) или при сопоставлении с расчетными значениями опытные данные умножаются на $\sqrt{2}$.

Включение установки производится с помощью рубильника видимого разрыва QS1, автомата SF1 и контактора КМ. В цепи питания электромагнита контактора включены блок - контакты двери, ведущей на испытательное поле. Доступ к электродам, расположенным на испытательном поле, возможен только при полностью отключенной установке и наложении переносного заземлителя на вывод обмотки ВН трансформатора Т1.

Электроды различной формы укрепляются на изолирующей конструкции. Резисторы R1, R2 ограничивают ток разряда, защищая трансформатор и выпрямитель от токовых перегрузок. В момент пробоя автоматический выключатель SF2 отключает установку. Пробивное напряжение фиксируется вольтметром $pV2$. При выполнении измерений, при неизменном расстоянии между электродами опыт повторяется пять раз для определения среднего значения пробивного напряжения. Затем изменяется расстояние между электродами и опыт повторяется. Данные измерений пробивных напряжений заносят в табл. 1.2.

1.4. Последовательность выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки, расположением ее элементов, порядком проведения работы, правилами безопасности при работе на установке.

2. Исследователь электрическую прочность воздушных промежутков при переменном напряжении промышленной частоты для промежутков:

а) плоскость-конус; б) сфера-сфера; в) стержень-стержень; г) стержень-плоскость.

3. Исследовать электрическую прочность воздушных промежутков сфера-сфера и плоскость-плоскость при переменном напряжении. Снять зависимость $U_{пр} = f(d)$ для промежутка стержень-плоскость.

4. Рассчитать значения пробивных напряжений $U_{расч}$ по формулам и построить графические зависимости для промежутков стержень-плоскость и сфера-сфера по опытным и расчетным данным. Определить средние арифметические значения средней пробивной напряженности электрического поля промежутка $E_{пр ср}$ и полученные результаты занести в табл. 1.2. Определить среднюю квадратическую ошибку измерений σ и величину доверительного

интервала измерений β для каждого исследуемого промежутка, пользуясь прил. 2.

Т а б л и ц а 1.2

d , см	$U_{np}, \text{кВ}_0$					$E_{np.cp} = \frac{U_{cp}}{d}$ кВ/см	$U_{расч},$ $\text{кВ}_{макс}$	σ
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5			

5. Проанализировать зависимости $U_{np} = f(d)$ для промежутков различной формы. Сравнить опытные и расчетные данные.

1.5. Контрольные вопросы

1. В чем состоят особенности электрического разряда в неоднородных полях и чем они обусловлены?
2. Что означают понятия начального напряжения и напряжения полного разряда?
3. В чем состоит физический смысл уравнения самостоятельности разряда?
4. Почему электрическая прочность электроположительных и электроотрицательных газов различна? В каком случае она выше?
5. Почему электрическая прочность воздушных промежутков с резко неоднородным полем зависит от полярности электрода с малым радиусом кривизны?
6. Чем объяснить различие электрической прочности воздушных изоляционных промежутков при различных формах электродов?

Лабораторная работа № 2

Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

2.1. Цель работы

Исследование электрической прочности воздуха при развитии разряда по поверхности диэлектрика в искровых промежутках с различной конфигурацией электрического поля.

2.2. Теоретические положения

Широкое применение в электроустановках высокого напряжения изоляторов различных типов, работающих в газовой изоляционной среде, вызывает необходимость исследования электрической прочности газов с учетом влияния диэлектрических поверхностей. На электрическую прочность воздуха при поверхностном разряде оказывают влияние конфигурация электрического поля, длина межэлектродного промежутка, состояние поверхности диэлектрика, частота воздействующего напряжения.

Характер разряда и разрядные напряжения по поверхности твердого диэлектрика в условиях неоднородного электрического поля в значительной степени определяются влиянием тангенциальной и нормальной составляющих напряженности электрического поля.

Если преобладает тангенциальная составляющая напряженности электрического поля (рис. 2.1, а - в), то разрядные напряжения по поверхности близки к пробивным напряжениям воздушных промежутков между аналогичными по форме электродами.

В случае значительной нормальной составляющей напряженности электрического поля (рис. 2.1, г, д) разряд по поверхности имеет ряд особенностей.

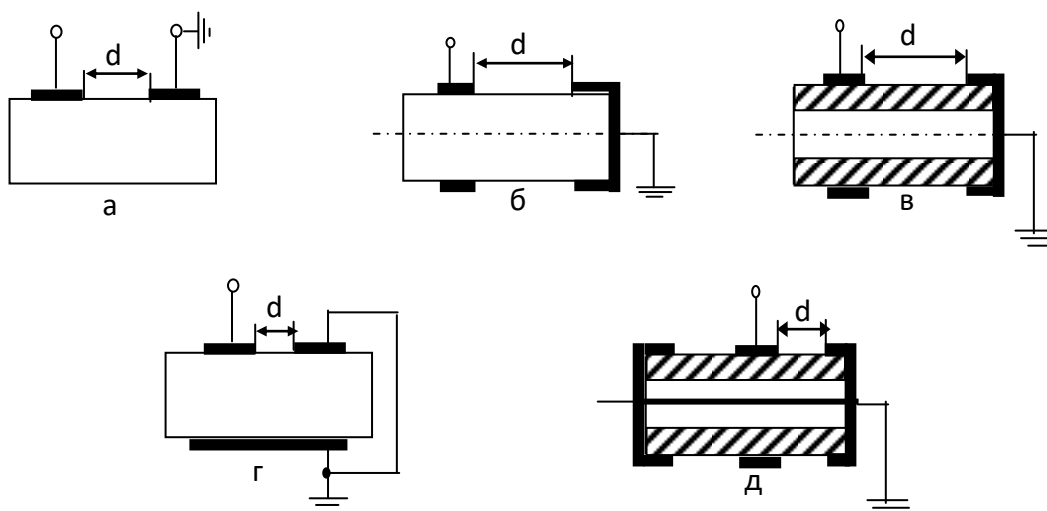


Рис. 2.1. Искровые промежутки для исследования перекрытия по поверхности твердого диэлектрика

При относительно небольших напряжениях наблюдается корона у электродов. Рост напряжения сопровождается появлением слабо светящихся каналов (стримеров), которые при дальнейшем повышении напряжения преобразуются в скользящие разряды, характеризующиеся интенсивным свечением. В скользящих разрядах протекает значительный ток, обусловленный процессом ионизации воздуха и зависящих от емкости канала скользящего разряда по отношению к противоположному электроду.

По Теплеру скользящий разряд, представляющий собой неполный поверхностный разряд, возникает при напряжении (кВ)

$$U_c = \frac{1,355 \cdot 10^4}{C_n^{0,44}}, \quad (2.1)$$

где C_n – удельная поверхностная емкость, т.е. емкость 1 см² поверхности, по которой развивается разряд, по отношению к противоположному электроду, Ф/см².

При небольшой толщине диэлектрика удельная поверхностная емкость для случая плоского конденсатора (Ф/см²)

$$C_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\Delta}, \quad (2.2)$$

где Δ – толщина диэлектрика, см.

Отсюда формула (2.1) преобразуется к виду

$$U_c = 74,8 \left(\frac{\Delta}{\varepsilon} \right)^{0,45}. \quad (2.3)$$

Благодаря малым сопротивлению и падению напряжения на каналах скользящих разрядов потенциал электрода выносится вглубь промежутка, и развитие разряда облегчается.

Дальнейшее повышение приложенного напряжения приводит к быстрому удлинению скользящих разрядов, и процесс завершается полным перекрытием промежутка между электродами. **Напряжение поверхностного перекрытия всегда ниже напряжения пробоя воздушного промежутка того же размера.**

Приближенно разрядное напряжение по поверхности выражается так:

$$U_c = k \left(\frac{\Delta}{\varepsilon} \right)^m d^n, \quad (2.4)$$

где d – расстояние между электродами по поверхности, см; Δ – толщина диэлектрика, см; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; k, m, n – коэффициенты, зависящие от особенностей конструкции изоляционного промежутка и диапазона изменения расстояния d .

Увлажнение и загрязнение поверхности диэлектрика резко снижают величину разрядного напряжения.

В изоляционных конструкциях для повышения разрядного напряжения увеличивают разрядное расстояние по поверхности за счет юбок и ребер на изоляторе.

2.3 Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки и её описание приведены в разделе 1.3 методики выполнения лабораторной работы № 1.

При выполнении экспериментов исследуется зависимость пробивного напряжения по поверхности диэлектриков (рис. 2.1), от межэлектродного расстояния и конфигурации электрического поля при воздействии напряжения промышленной частоты. Для каждого изоляционного промежутка величина пробивного напряжения определяется по данным пяти измерений с последующей их обработкой по правилам, изложенным в приложении 2. Измерение U_p осуществляется вольтметром, подключенным к измерительным выводам обмотки испытательного трансформатора. Показания вольтметра фиксируются в момент полного перекрытия изоляционного промежутка первым искровым каналом, после чего испытательный трансформатор отключается с пульта управления. Затем опыт повторяется.

Для изменения расстояния между электродами необходимо отключить рубильником видимого разрыва испытательный трансформатор и наложить заземление на его высоковольтный вывод. Блок – контакты двери стенда обеспечивают снятие напряжения при открытой двери.

2.4. Последовательность выполнения работы

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями электрического разряда в воздухе по поверхности твердых диэлектриков.
2. Изучить схему и методу работы на экспериментальном стенде.
3. Изучить правила техники безопасности при работе на экспериментальном стенде.
4. Экспериментально получить значения напряжения начала скользящих разрядов для схем рис.2.1 г, д. Для схемы на рис.2.1,д кольцевой электрод установить посередине трубки. Результаты занести в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Искровой промежуток	$U_c, кВ$						
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_{cp}	U_p
Схема рис. 1, г							
Схема рис. 1, д							

5. Экспериментально получить значения напряжений U_p полного перекрытия по поверхности стекла, фарфора и электрокерамики (рис. 2.1) при расстояниях $d = 4, 6, 8, 10, 12$ см между электродами. Результаты занести в табл. 2.2. По данным таблицы 2.2. построить графические зависимости

$$U_p = f(d).$$

Т а б л и ц а 2.2

Искровой промежуток	d, см	$U_p, кВ$						$E_{cp} = \frac{U_{cp}}{d},$ кВ/см
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_{cp}	

На одном графике показать зависимости $U_p = f(d)$ и $E_{cp} = f(d)$ для случаев рис. 2, г, д.

6. Проанализировать результаты эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Как зависит коэффициент ударной ионизации электронами от давления газа и напряженности электрического поля?
2. В чем состоит условие самостоятельности разряда?
3. Каков физический смысл коэффициента γ ?
4. Как формулируется закон Пашена и объясняется ход кривой $U_p = f(pd)$?
5. Как можно повысить электрическую прочность разрядных промежутков в однородных полях?
6. Почему при уменьшении расстояния между электродами при повышенных давлениях газа закон Пашена не выполняется?
7. Почему ход кривой $U_p = f(pd)$ для воздуха отличается от хода аналогичных кривых, полученных в атмосфере инертных газов?

Лабораторная работа № 3

Тема: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ БУМАГИ

3.1. Цель работы

Изучение методики определения электрической прочности электротехнической бумаги; исследование влияния на электрическую прочность числа слоёв диэлектрика, пропитки бумаги трансформаторным маслом и площади электродов.

3.2. Теоретические положения

Твердые диэлектрики являются неотъемлемой частью изоляционных конструкций, поэтому вопрос о предельных напряженностях электрического поля в диэлектриках является определяющим надежностью работы изоляции при воздействии на нее высокого напряжения.

Величина напряженности электрического поля, при которой диэлектрик теряет свои изоляционные свойства и пробивается, носят название электрической прочности диэлектрика. Электрическая прочность связана с величиной пробивного напряжения U_n и толщиной диэлектрика d соотношением

$$E_n = \frac{U_n}{d},$$

справедливым для однородного электрического поля.

Характерной особенностью твердых диэлектриков (в отличие от жидких или газообразных) является то, что после пробоя они не восстанавливают своих изоляционных свойств.

Электрическая прочность диэлектриков определяется их структурой. Неоднородные материалы имеют, как правило, пониженную электрическую прочность. Пропитка целлюлозных материалов жидким диэлектриком значительно повышает их электрическую прочность. Например, непропитанная кабельная бумага имеет электрическую прочность $(3...5) \cdot 10^6$ В/м, а пропитанная трансформаторным маслом $-(4...8) \cdot 10^7$ В/м.

Для обеспечения надежной работы твердых диэлектриков приложенное к ним рабочее напряжение U_p должно быть ниже пробивного U_n . Отношение U_n / U_p носит название коэффициента запаса и для каждой конструкции устанавливается в зависимости от физико-химических свойств диэлектрика и условий работы.

По характеру развития различают два основных вида пробоя: тепловой и электрической.

Тепловой пробой твердых диэлектриков развивается в случае их нагрева за счет диэлектрических потерь и выделения теплоты в токоведущих элементах конструкции. В результате повышения температуры увеличивается тан-

генс угла диэлектрических потерь и проводимость диэлектрика при постоянном напряжении, что приводит к его дальнейшему нагреву. Если теплоотдача в окружающую среду компенсирует выделение теплоты, то устанавливается тепловое равновесие и дальнейший нагрев прекращается. В противном случае диэлектрик нагревается до температуры, при которой происходит его расплавление, растрескивание, обугливание. Обычно в зоне наибольшей температуры в диэлектрике прогорает канал, в котором происходит пробой. Увеличение теплопроводности диэлектрика и теплоотдачи с его поверхности приводит к повышению пробивного напряжения.

Пробивное напряжение зависит от толщины диэлектрика, а в случае бумажной изоляции – от количества ее слоев. В тонких слоях твердых диэлектриков вследствие их неоднородности наблюдается уменьшение электрической прочности, если размер частиц неоднородности соизмерим с толщиной диэлектрика. При использовании многослойного диэлектрика вероятность совпадения слабых мест уменьшается, и прочность изоляции растет. Однако при дальнейшем возрастании числа слоев или толщины диэлектрика наблюдается некоторое снижение электрической прочности, что можно объяснить ухудшением условий теплоотвода от внутренних слоев диэлектрика.

Электрическая прочность зависит также от площади электродов. Увеличение площади электродов приводит к снижению E_n , что связано с увеличением вероятности попадания слабых мест диэлектрика под электрод. Эта зависимость резко проявляется для бумаг, лакотканей, пленок.

На прочность диэлектрика влияет температура окружающей среды – чем она выше, тем больше тангенс угла диэлектрических потерь, тем ниже прочность диэлектрика.

Если количество теплоты, выделяющейся в диэлектрике под действием электрического поля, незначительно, то тепловой пробой невозможен. Нарушение электрической прочности в этих случаях связано с электрически характером пробоя. Электрический пробой возникает при кратковременных импульсных воздействиях напряжений, малых диэлектрических потерях и интенсивном охлаждении диэлектрика при низких температурах окружающей среды. Электрический пробой связан с ударной ионизацией электронами и разрушением диэлектрика силами приложенного к нему поля. В однородном поле электрический пробой наступает при напряженностях порядка $10^8 \dots 10^9$ В/м.

В неоднородном электрическом поле пробой наступает, когда вблизи одного или обоих электродов напряженность электрического поля достигает критического значения. Так как у поверхности электродов, имеющих большую кривизну, напряженность электрического поля высока, то критическая напряженность достигается при относительно невысоких напряжениях. Поэтому пробивное напряжение твердого диэлектрика в неоднородном поле значительно ниже, чем в однородном. В условиях неоднородного электрического поля напряженность поля у электродов слабо зависит от расстояния

между ними. Поэтому увеличение толщины диэлектрика мало сказывается на повышении пробивного напряжения.

Характер электрического поля в диэлектрике определяется, прежде всего, формой электродов. Так, для плоских электродов в области краев происходит увеличение напряженности.

3.3. Экспериментальная установка

Пробивное напряжение электроизоляционной бумаги и других тонких диэлектриков таких как стеклотекстолит, электротехнический картон, тонкий лист текстолита, гетинакс и других выполняется на высоковольтных установках переменного и постоянного тока.

Схема испытательной высоковольтной установки переменного напряжения, порядок и методика выполнения экспериментов подробно представлены в описании лабораторной работы № 1.

Размещение образцов твёрдой изоляции между электродами высоковольтной установки переменного тока с целью определения пробивного напряжения выполняется в соответствии с рис. 3.1. Полученные в результате экспериментов значения пробивных напряжений заносятся в табл. 3.1.

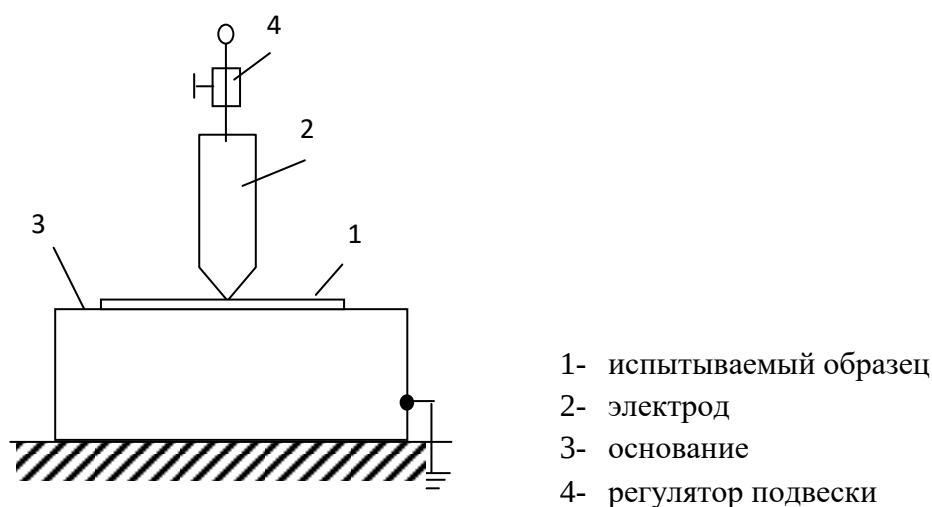


Рис. 3.1. Размещение испытуемого образца при выполнении экспериментов на высоковольтной установке переменного напряжения

Порядок установки и выполнения исследований описан в метод. руководстве к ЛР № 1 и 2.

На рис. 3.1 испытываемый образец размещается между конусным электродом и плоским основанием, которое заземлено.

Определение электрической прочности бумажно-масляной изоляции и тонких диэлектриков осуществляется по схеме испытательной установки постоянного напряжения до 5 кВ (рис. 3.2).

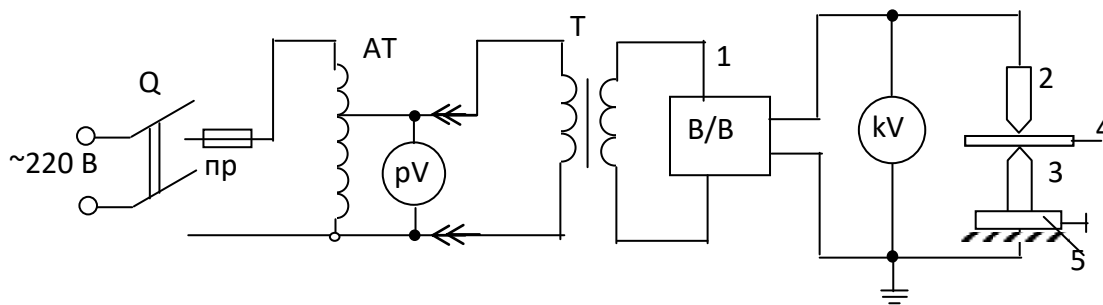


Рис. 3.2. Схема испытательной установки постоянного напряжения до 5кВ:
 Q – выключатель двухполюсный; Пр – предохранитель;
 AT – автотрансформатор типа ЛАТР; pV – вольтметр для измерения напряжения на низковольтной обмотке повышающего трансформатора;
 T- повышающий трансформатор; kV – киловольтметр типа С-146;
 1 – высоковольтный выпрямитель, выполненный по схеме удвоения напряжения;
 2 и 3 – угольные электроды, где 3 – подвижный электрод;
 4 – испытываемый образец; 5 – винт для регулирования зазора между электродами.

3.4. Последовательность выполнения работы

Испытания бумажно-масляной изоляции и тонких диэлектриков выполняются в следующем порядке:

1. Устанавливается начальный предельный зазор между электродами (2) и (3) 5 мм.

2. Движок регулятора напряжения на автотрансформаторе (АТ) устанавливается в положение близкое к минимуму выходного напряжения.

3. Устанавливается и фиксируется испытуемый образец между электродами 2 и 3.

4. Выключателем Q подается рабочее напряжение на испытательную установку.

5. Автотрансформатором (АТ) медленно увеличивают напряжение на выходе установки, изменение напряжения фиксируется киловольтметром (kV) прямого включения.

6. При пробое образца, определяемом характерным треском электрической дуги, снимаем значение пробивного напряжения по показаниям киловольтметра и схема испытаний отключается от сети 220 В вручную. Движок автотрансформатора выводится в крайне левое положение (минимальное напряжение на выходе автотрансформатора).

7. Полученные значения пробивных напряжений заносятся в табл. 3.1.

8. Для бумажно-масляной изоляции испытания проводят меняя количество слоёв изоляции вначале сухой (не пропитанной трансформаторным маслом бумаги), а затем пропитанной трансформаторным маслом бумаги.

9. Полученные результаты экспериментов обрабатываются по методике изложенной в приложении 2. По полученным данным строятся графики зависимости пробивного напряжения бумажно-масляной изоляции от количества слоёв для случаев сухой и пропитанной изоляции.

Т а б л и ц а 3.1

U_1	U_2	U_3		U_5	$\bar{U}$	σ	β	$U_{мин}$	$U_{макс}$

3.5. Требования техники безопасности

1. Киловольтметр должен быть заземлен.
2. После пробоя отключение установки осуществляется сразу после фиксации напряжения пробоя.
3. После каждого опыта конденсаторы в схеме высоковольтного выпрямителя необходимо разрядить.

Контрольные вопросы

- 3.1. В чем состоит сущность электрической и тепловой формы пробоя твердых диэлектриков?
- 3.2. Как экспериментально установить ту или иную форму пробоя?
- 3.3. Чем объяснить нелинейность зависимости U_n от толщины диэлектрика?
- 3.4. Почему пробивное напряжение конденсаторной бумаги зависит от площади электродов и силы межэлектродного нажатия?
- 3.5. Как определяется коэффициент запаса электрической прочности?

Лабораторная работа № 4

Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

4.1. Цель работы

Исследовать зависимость разрядных напряжений в жидком диэлектрике от его качества, определить электрическую прочность трансформаторного масла.

4.2 Теоретические положения

В электрических установках (ЭУ) широко применяют жидкие диэлектрики. Они используются в трансформаторах, бумажно-масляных конденсаторах, маслонеполненных кабелях, проходных изоляторах, выключателях и других аппаратах. Основное достоинство жидких диэлектриков заключается в том, что они имеют значительно более высокую диэлектрическую прочность, чем газовая изоляция, и хорошо отводят тепло от обмоток трансформаторов и аппаратов. В выключателях жидкие диэлектрики служат также дугогасящей средой.

Применяются природные и синтетические жидкие диэлектрики. К природным относятся трансформаторное, конденсаторное и кабельное масла, получаемые путем переработки нефти. Для получения изоляционных масел нефть подвергается фракционной перегонке в условиях вакуума. Для придания маслу высоких изоляционных свойств в него вводят некоторые дополнительные химические вещества – присадки. Конденсаторное и кабельное масла отличаются от трансформаторного более высокой степенью очистки.

Для использования в ЭУ изоляционные масла должны обладать вполне определенными характеристиками, важнейшей из которых является электрическая прочность E [кВ/см], или [мВ/м].

Как охлаждающая среда масло должно обладать малой вязкостью и низкой температурой застывания.

Основные нормированные характеристики изоляционных масел приведены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Основные нормированные характеристики изоляционных масел

Наименование показателей	Единица измерения	Трансформаторное масло	Конденсаторное масло	Кабельное масло
Электрическая прочность при частоте 50 Гц	кВ/см	120-160	200	200
Температура вспышки	$^{\circ}\text{C}$	135	135	180
Температура застывания	$^{\circ}\text{C}$	-45	-45	-30
$\text{tg } \delta$ при частоте 50 Гц и 20°C (не более)	%	0,3	-	-

Синтетические жидкие диэлектрики применяются в основном для огнебезопасности и повышенной нагревостойкости. Одной из наиболее распространенных синтетических изоляционных жидкостей является совол ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}$). Очищенный совол – бесцветная жидкость с резким запахом. Совол имеет электрическую прочность 150 – 200 кВ/см. В качестве жидкого диэлектрика применяется обычно совтол – смесь совола с трихлорбензолом. Совол и совтол применяются для заполнения бумажных конденсаторов и в трансформаторах для полной огнебезопасности. В качестве жидких диэлектриков с повышенной нагревостойкостью используются кремнеорганические соединения. Электрическая прочность их 200 – 250 кВ/см.

Электрическая прочность жидких диэлектриков зависит от многих факторов. Под действием электрического поля в жидких диэлектриках возникает электрический ток. Носителями электрических зарядов являются ионы самого диэлектрика, а также примесей. С увеличением температуры усиливается диссоциация молекул жидкости на ионы, увеличивается подвижность ионов. В результате этого с повышением температуры удельное сопротивление жидких диэлектриков падает.

В сильных электрических полях в жидких диэлектриках возникают электрические разряды. В сравнительно равномерных полях при повышении напряжения, приложенного к электродам, вначале происходят единичные слабые искровые пробой промежуток. С повышением напряжения пробой учащаются и, наконец, переходят в устойчивый пробой.

В неравномерных полях пробой предшествует появлению короны у одного или обоих электродов в виде неустойчивых незавершенных искр. Считается, что пробой очищенных жидких диэлектриков является результатом ударной ионизации электронами и автоэлектронной эмиссии с катода. Большую роль в пробое жидких диэлектриков играют примеси: вода, газовые включения. Теория Геманта и др. рассматривает пробой увлажненного масла. Вода и масло находятся обычно в состоянии эмульсии, т.е. вода взвешена в виде мельчайших капель. В сильном электрическом поле происходит поляризация и растяжение этих капель и их слияние в водяной канал, по которому

происходит пробой. Существующие теории пробоя жидких диэлектриков не дают количественных критериев пробоя и не позволяют определять разрядные напряжения в конкретных случаях. Поэтому при определении разрядных напряжений жидких диэлектриков пользуются опытными данными.

В общем случае пробой изоляционных масел характеризуется двумя значениями разрядного напряжения: минимальным и максимальным. Первое относится к появлению единичной искры между электродами, второй - к установившемуся пробую. При выборе изоляционных расстояний особенно важно минимальное разрядное напряжение. Величина разрядных напряжений зависит от расстояния между электродами, степени неравномерности электрического поля и степени очистки масла. Для технически чистого трансформаторного масла зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами является нелинейной. При этом, чем больше расстояние, тем больше эта нелинейность. С увеличением степени неравномерности поля при одинаковых расстояниях между электродами разрядные напряжения уменьшаются.

Приближенные значения разрядных напряжений для трансформаторного масла могут быть получены из эмпирических формул.

(Напряжения 50 Гц, амплитудные значения)

Промежуток стержень-стержень

$$U = 39 \cdot S^{0,7} [\text{кВ}] \text{ при } S \leq 50 \text{ см}$$

Промежуток стержень-плоскость

$$U = 28,8 \cdot S^{0,74} [\text{кВ}] \text{ при } S \leq 30 \text{ см}$$

где S – расстояние между электродами в см.

В процессе эксплуатации происходит старение масла: появляются примеси, загрязнения, изменяются состав, физические и химические характеристики.

Основными факторами, обуславливающими старение масла, являются окисление его кислородом воздуха, нагрев и разложение под действием электрических разрядов. Наблюдается увлажнение масла. Вода попадает в масло из воздуха, из плохо высушенной твердой изоляции, а также образуется в результате окисления углеводородов масла. Вода в масле находится в растворенном состоянии и в виде эмульсии. Увеличение содержания воды до 001 – 0,09 % (по весу) значительно снижает электрическую прочность масла. В присутствии воды старение масла и выпадение в нем осадков происходит быстрее, чем в сухом масле.

В масле, работающем совместно с твердой изоляцией, возможно появление загрязнений в виде хлопчатобумажных и целлюлозных волокон. Присутствие волокон особенно во влажном масле, приводит к резкому уменьшению разрядных напряжений. Скапливаясь в межэлектродном пространстве и, увлажняясь, волокна образуют проводящие мостики, которые сильно иска-

жают поле между электродами и являются причиной снижения разрядных напряжений.

При старении в масле образуются нерастворимые осадки - шлам. Осадки гигроскопичны. Поэтому их наличие увеличивает содержание воды в масле.

В масле может находиться значительное количество газовых включений. В свежем изоляционном масле в 100 см^3 содержится 6 см^3 газов. Количество газов увеличивается в результате разложения масла под действием электрической дуги, поверхностных разрядов, короны.

При эксплуатации изоляционных масел необходимы меры, препятствующие загрязнению и старению масел, уменьшающие вредное влияние примесей и удлиняющих срок службы масла.

Срок эксплуатации масла может быть удлинён постоянной очисткой масла непосредственно в трансформаторах во время работы. Очистка осуществляется с помощью термосифонных фильтров. Масло проходит через фильтр, где очищается от воды, кислот и смол. Фильтрующим веществом является силикагель – высушенный и прокаленный гель двуокиси кремния SiO_2 . Он обладает пористой структурой, является хорошим сорбентом благодаря развитой пористой структуре.

Изоляционные масла должны подвергаться периодическому контролю с целью определения их характеристик. В правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей предусматриваются 3 вида испытаний изоляционных масел: полный химический анализ, сокращенное испытание и испытание на содержание взвешенного угля.

При сокращенном испытании определяется состояние масла: определяется пробивное напряжение, наличие твердых осадков, температура вспышки, реакция водной вытяжки, кислотное число, а также $\text{tg } \delta$. Сокращенный анализ масла производится не реже одного раза в 3 года, а также после капитальных ремонтов трансформаторов и аппаратов. Для трансформаторов, работающих без термосифонных фильтров, сокращенный анализ должен производиться один раз в год.

Испытания масла на пробой производится в стандартном разряднике. Electroды разрядника устанавливаются на расстоянии 2,5 см друг от друга строго параллельно, на 15 мм выше поверхности электродов, рис. 4.1.

Проверку содержания угля производят в масляных выключателях сразу после отключения при коротком замыкании. В энергосистемах и на промышленных предприятиях составляется годовой график взятия проб масла из каждого аппарата.

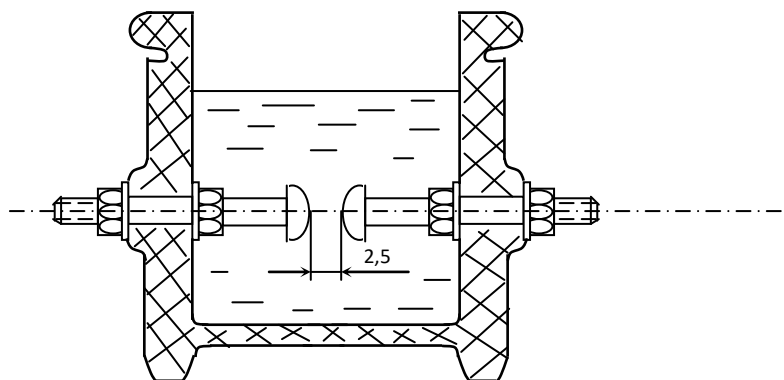


Рис. 4.1. Маслопробойник

Масло, которое не удовлетворяет нормам по характеристикам, должно быть удалено из ЭУ и подвергнуто очистке.

4.3. Экспериментальная установка

Техническая характеристика и устройство аппарата АИМ-80

Аппарат предназначен для определения пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков.

Технические характеристики

1. Напряжение питающей сети однофазного переменного тока, В	220
2. Частота питающей сети, Гц	50
3. Наибольшее вторичное переменное напряжение эффективного значения, кВ	80
4. Объем измерительной ячейки, см ³	400
5. Наибольшая потребляемая мощность, кВ.А	0,65
6. Масса аппарата не более, кг	35

Устройство и принцип работы

Конструкция аппарата выполнены в виде переносного пульта и включает в себя следующие основные элементы:

- генераторное устройство;
- регулятор напряжения (вариатор) с моторным приводом щетки;
- ячейку измерительную (см. рис. 4.1);
- измерительный прибор, сигнальные лампы и др.

Генераторное устройство заполнено трансформаторным маслом, уровень которого находится на 8 мм ниже панели (крышки).

Высокое напряжение от трансформатора выводится посредством специальных изоляторов, которые одновременно служат опорой для установки на них ячейки измерительной.

Зона аппарата, где устанавливается ячейка, имеет крышку, которая в закрытом положении замыкает блок-контакты цепи включения высокого напряжения. При открывании крышки указанная цепь размыкается.

Во избежание электрического пробоя с высоковольтных изоляторов генераторного устройства на заземленные части аппарата, на панели генераторного устройства на заземленные части аппарата, на панели генераторного устройства устанавливается изоляционный барьер, который одновременно служит маслосборником случайно пролитого диэлектрика из ячейки.

Подъем высокого напряжения на электродах ячейки производится регулятором напряжения с постоянной скоростью электроприводом.

Возврат стрелки прибора и щетки регулятора напряжения в нулевое положение после электрического пробоя диэлектрика может осуществляться либо посредством включения кнопки ($0 \leftarrow$), либо автоматически при включенной кнопке ($0 \rightleftarrows$).

На лицевой панели аппарата расположены: измерительный прибор, световая сигнализация (зеленая – включение сети, желтая – готовность схемы аппарата к включению высокого напряжения, красная – включено высокое напряжение) и следующие элементы управления:

- замок включения сети ($\sim$);
- кнопка включения высокого напряжения ($\downarrow$);
- кнопка разового возврата стрелки прибора и щетки регулятора напряжения после пробоя диэлектрика ($0 \leftarrow$);
- кнопка автоматического возврата стрелки прибора и щетки регулятора напряжения в нулевое положение после пробоя диэлектрика ($0 \rightleftarrows$);
- кнопка прерывания подъема высокого напряжения ($\neg$).

С задней стороны аппарата расположены: дверца, обеспечивающая доступ к предохранителям и клеммам для присоединения контрольного вольтметра; штепсельный разъем для присоединения кабеля питания аппарата к сети; клемма заземления для присоединения провода заземления к заземленному контуру помещения

4.4. Последовательность выполнения работы

1. Перед испытанием выполнить следующее:

- а) установить требуемое расстояние (2,5 мм) между электродами;
- б) промыть фарфоровый сосуд с электродами сухим чистым маслом;
- в) залить в промытый сосуд такое количество испытываемого масла (около 400...500 г), чтобы слой масла, покрывающий электроды, был не менее 15 мм.

г) выдержать вылитое в сосуд масло в течение 10 мин. для того, чтобы пузырьки воздуха всплыли на поверхность, температура масла должна быть 15...35 °С;

д) отвернуть на 2-3 оборота пробку генераторного устройства, чтобы дать возможность маслу свободно изменяться в объеме:

4.5. Требования техники безопасности

Запрещается:

– Прерывать повышение испытательного напряжения в интервале 60 – 70 кВ путем выключения электродвигателя на время не более, чем 20 с, т.к. первичная обмотка трансформатора не рассчитана на длительное протекание по ней тока холостого хода генераторного устройства при указанных величинах напряжения.

– Включать высокое напряжение, если не установлены в аппарат изоляционный барьер и ячейка с жидким диэлектриком.

– Не допускается работать на аппарате при напряжении выше 70 кВ. При достижении во время испытания указанной величины, необходимо отключить аппарат сетевым ключом.

– Работать на аппарате без штатного заземления.

– Работать на аппарате без диэлектрического коврика.

Контрольные вопросы

1. Какие применяются в технике высоких напряжений жидкие диэлектрики и в каких ЭУ?

2. Назовите основные характеристики жидких диэлектриков и дайте их сравнительную оценку.

3. Дайте объяснение физических явлений в жидких диэлектриках под действием сильного электрического поля.

4. В результате каких процессов возникает пробой в жидких диэлектриках?

5. Поясните какие факторы обуславливают старение изоляционного масла?

6. Как осуществляется контроль за состоянием изоляционных масел в процессе эксплуатации?

7. Почему при стандартном испытании масла берут среднее из шести значений пробивного напряжения, а не удовлетворяются одним-двумя значениями?

8. Какие и в каких электрических установках применяют жидкие диэлектрики?

9. Почему и как изменяется диэлектрическая прочность масла при содержании в нем воды и других примесей?

10. Как влияет на электрическую прочность масла большое число следующих друг за другом пробоев?

Лабораторная работа № 5

Тема: ИЗМЕРЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

5.1. Цель работы

Изучение методики и устройства для измерения тангенса угла диэлектрических потерь в условиях действующей подстанции, выработка навыков оценки состояния изоляции по тангенсу угла диэлектрических потерь.

5.2. Теоретические положения

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ – важнейший параметр изоляции. От величины $\operatorname{tg} \delta$ зависят потери в диэлектрике. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ изоляции электрооборудования проводится во время плановых отключений и ревизий. Возрастание $\operatorname{tg} \delta$ в процессе эксплуатации происходит в результате общего старения изоляции и может привести к тепловому пробую.

Величина диэлектрических потерь

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (5.1)$$

где U – действующее значение испытательного переменного напряжения; ω – угловая частота; C – емкость изоляции; δ – угол диэлектрических потерь.

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

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c}, \quad (5.2)$$

где δ – угол между векторами полного тока и реактивной составляющей тока в векторной диаграмме токов в изоляции (рис. 5.1).

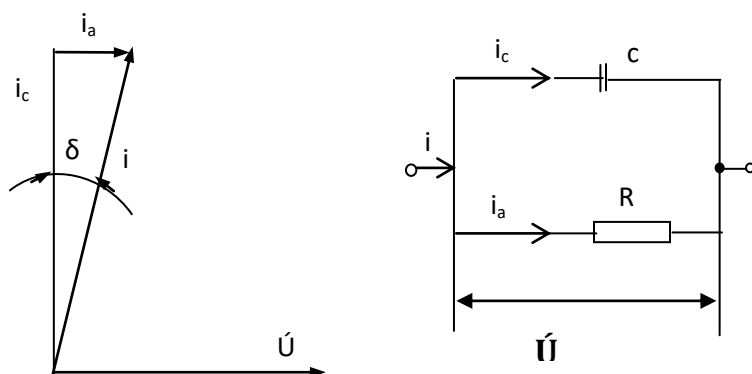


Рис. 5.1 Схема замещения и векторная диаграмма токов в изоляции

Увеличение тангенса угла потерь обусловлено увлажнением изоляции, ионизацией газовых включений и расслоением изоляции, поверхностным загрязнением изоляции. Значение $\operatorname{tg} \delta$ также зависит от температуры, испытательного напряжения, его частоты.

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

Покажем это для случаев параллельного и последовательного расположения диэлектриков с различными значениями тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 5.2).

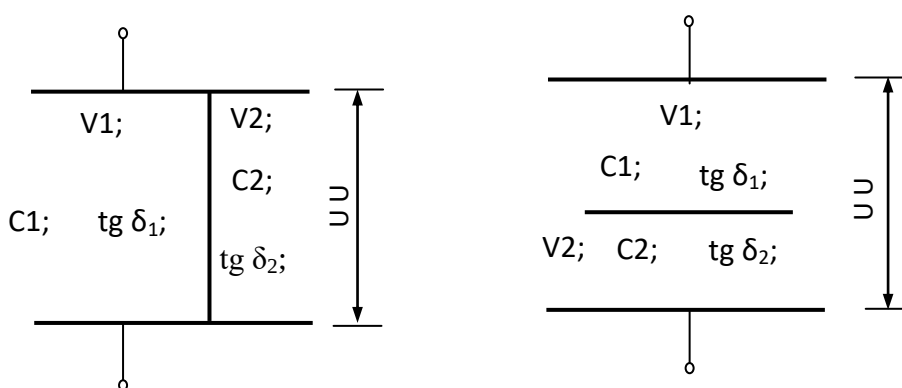


Рис. 5.2. Параллельное и последовательное расположение диэлектриков

В первом случае (параллельное расположение)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}. \quad (5.3)$$

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

$$\operatorname{tg} \delta \cong \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg} \delta_2. \quad (5.4)$$

Из (формулы 5.4) следует, что результирующий тангенс угла потерь будет незначительно превышать тангенс угла потерь основного объема изоляции. При последовательном расположении слоев

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_1 + C_1 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}. \quad (5.5)$$

Если слой с повышенным значением тангенса угла потерь имеет незначительную толщину, то $C_2 \gg C_1$. В этом случае

$$\operatorname{tg} \delta \cong \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_1}{C_2} \operatorname{tg} \delta_2. \quad (5.6)$$

Так как $C_2 \gg C_1$, то $\operatorname{tg} \delta \cong \operatorname{tg} \delta_1$.

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

При влажности твердой изоляции менее 3 % при 20...30 °С определяющее значение при изменении тангенса угла потерь изоляции имеют характеристики трансформаторного масла. 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

$$\operatorname{tg} \delta_{\Theta_1} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\Theta_2}}{k_1}.$$

Значения k_1 приведены в табл. 5.1. Состояние изоляции оценивается по абсолютной величине $\operatorname{tg} \delta$.

Т а б л и ц а 5.1

$\Theta_2 - \Theta_1$	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

Для ввода для бумажно-масляной изоляцией на 150...220 кВ $\operatorname{tg} \delta$ при монтаже и после капитального ремонта не должен превышать 0,8 %. Для вводов 380...500 кВ эти значения соответственно 0,7 и 0,5 %. Для силовых трансформаторов значения $\operatorname{tg} \delta$ при монтаже не должны превышать 130 % паспортного значения.

В условиях эксплуатации существует емкостная связь между объектом испытания, измерительным устройством и незранированными токоведущими частями работающего оборудования. Измерительные устройства имеют достаточно надежную экранировку, но токи емкостной связи (токи влияния) могут проходить через систему измерительного устройства, вызывая погрешности измерений.

На рис. 5.3 ток влияния $I_{\text{вл}}$, величина которого определяется работающим оборудованием (РО), протекает через емкость объекта измерения C_x . Пунктиром обозначена схема измерительного моста.

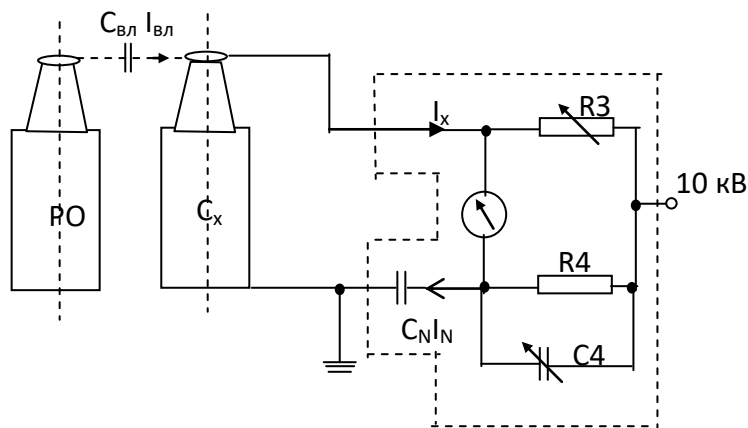


Рис. 5.3. Влияние работающего оборудования на измерительный мост

Ток влияния $I_{вл}$ вследствие того что $R3 \ll \frac{1}{\omega C_x}$, практически полностью замыкается через сопротивление $R3$ и источник питания моста. Поэтому при равновесии моста ток в сопротивлении $R3$ будет $I_x + I_{вл}$, а не I_x . Равновесие моста достигается при условии $(I_x + I_{вл}) R_3 = I_N R_4$, что приводит к ошибочной оценке измерительной величины $tg \delta_u$.

Влияние тока $I_{вл}$ иллюстрируется векторной диаграммой на рис.5.4. При уравнивании в мостовой схеме протекает сумма токов I_x и $I_{вл}$, имеющих фазовые сдвиги относительно друг друга. Следовательно, при отсчете будет измерено некоторое фиктивное значение $tg \delta'$ или $tg \delta''$.

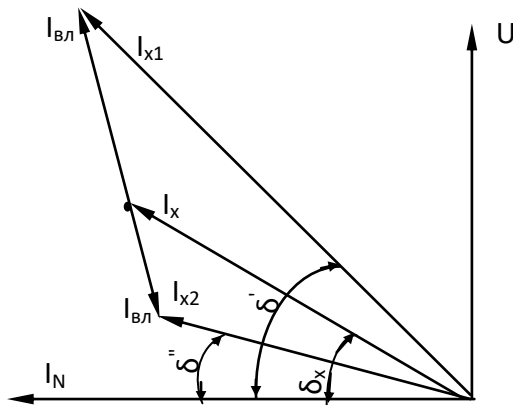


Рис. 5.4. Диаграмма равновесия моста с учетом внешних влияний

Для устранения влияния можно прибегнуть к способу двух отсчетов. Для этого производится два измерения при фазах испытательного напряжения, отличающихся на 180° , что достигается изменением полярности питания испытательного трансформатора при втором измерении.

Для расчета $tg \delta_x$ берется среднееарифметическое значение отдельных результатов

$$tg \delta_x = \frac{tg \delta' + tg \delta''}{2} \quad (5.7)$$

или более точно

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{\operatorname{tg} \delta R_3'' + \operatorname{tg} \delta R_3'}{R_3' + R_3''} \quad (5.8)$$

Погрешность измерения не постоянна и зависит от фазы тока влияния по отношению к току объема. Она характеризуется коэффициентом влияния

$$k_{\text{вл}} = \frac{I_{\text{вл}}}{I_x} = \frac{I_{\text{вл}}}{\omega C_x U_{\text{ном}}},$$

где ω – частота испытательного напряжения; C_x – емкость испытуемого объекта; $U_{\text{ном}}$ – испытательное напряжение.

Для устранения погрешностей при измерении $\operatorname{tg} \delta$ используют также метод совмещения фаз токов влияния $I_{\text{вл}}$ и объекта I_x . Подгонку фазы осуществляют специальным регулятором, включенным в цепь питания испытательного трансформатора. Процесс измерения проводят по методике, указанной в табл. 5. 2.

Т а б л и ц а 5.2

Номер операции	Напряжение, питающее испытательный трансформатор	Положение ручек мостовой схемы и фазорегулятора			Записываемые значения
		$C_4 (\operatorname{tg} \delta)$	R_3	Фазорегулятор	
1	От фаз 1 и 2 после фазорегулятора	0	Изменяя R_3 и фазу фазорегулятора, балансируют мост		R_3'
2	От фаз 2-1 (изменение полярности на 180°)	Изменяя $C_4 (\operatorname{tg} \delta)$ и R_3 , балансируют мост		Остается в фиксированном положении после операции 1	$\operatorname{tg} \delta''$ и R_3''
3	От фаз 2-1 (изменение полярности на 180°)	Устанавливают положение $\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \delta''$	Изменяя R_3 и фазу фазорегулятора, балансируют мост		$R_3' ''$
4	От фаз 1-2	Изменяя $C_4 (\operatorname{tg} \delta)$ и R_3 , балансируют мост		Остается в фиксированном положении после операции 3	$\operatorname{tg} \delta'''$ и R_3'''

Истинное значение $\operatorname{tg} \delta_x$ и C_x подсчитывается таким образом:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{\operatorname{tg} \delta_1 R_3''' + \operatorname{tg} \delta_2 R_3''}{R_3''' + R_3''},$$

где

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \delta''; \quad \operatorname{tg} \delta_2 = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \delta'''$$

$$C_x = C_N R_4 \frac{R_3''' + R_3'''}{2R_3''' \cdot R_3'''}.$$

Данный метод дает наименьшие погрешности при измерении в условиях внешних влияний.

5.3. Экспериментальная установка

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляции электрооборудования измеряют с помощью моста Р-595 (или Р-5026). Схема испытательной установки изображена на рис. 5.5.

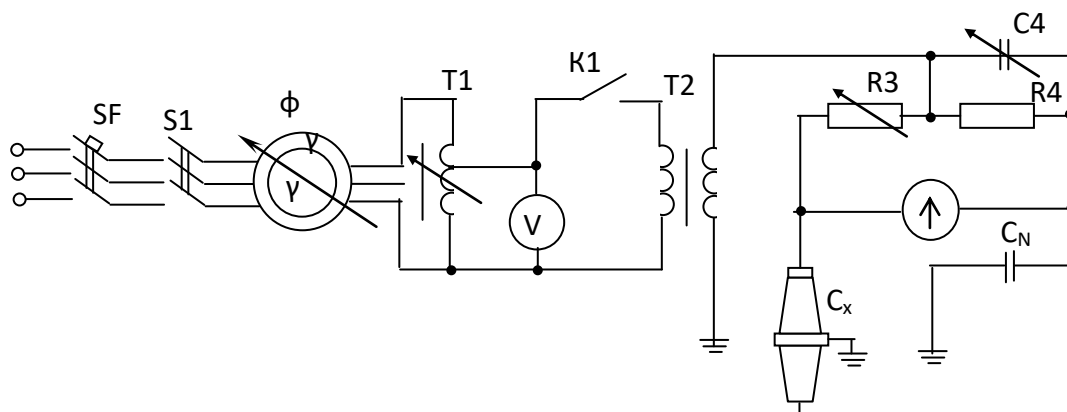


Рис. 5.5. Схема экспериментальной установки

Она включает: фазорегулятор, автотрансформатор T1 типа ЛАТР, высоковольтный трансформатор T2 типа НОМ-10 и мост. Одним плечом моста является емкостью испытываемого объекта C_x , вторым – образцовый конденсатор без потерь C_N , третьим - магазин сопротивлений R_3 . Четвертое плечо моста состоит из постоянного сопротивления R_4 . Четвертое плечо моста состоит из постоянного сопротивления R_4 и магазина емкостей C_4 . Нуль индикатором служит транзисторный усилитель со стрелочным прибором на выходе.

Особенность моста Р-595(Р-5026) – возможность измерения по нормальной и перевернутой схемам. В первом случае оба электрода испытываемого объекта изолированы от земли, во втором – один из электродов заземлен (рис. 5.6, 5.7).

При измерении по перевернутой схеме измерительная часть моста находится под высоким напряжением. Конструкция моста предусматривает изоляцию измерительной части от заземленного корпуса и обеспечивает безопасность обслуживания.

При измерении тангенса угла диэлектрических потерь необходимо с помощью экранированных кабелей, входящих в комплект моста, собрать нормальную или перевернутую схему измерений в зависимости от особенностей испытываемого объекта. После этого закрывается дверь защитного огражде-

ния, за которым расположены испытываемый объект, трансформатор НОМ-10 и эталонный конденсатор C_N .

Включением автомата SF подается напряжение на регулировочный автотрансформатор. Плавно повышая напряжение, контролируемое с помощью вольтметра, включенного со стороны НН трансформатора НОМ-10, устанавливают необходимое значение испытательного напряжения.

Симметрирование моста выполняется измерением величин R_3 и C_4 . Из условия равновесия моста следует, что

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4. \quad (5.9)$$

В мостах $R_4 = 10^4/\pi$, или 3184 Ом. Тогда при $\omega = 314$ $\operatorname{tg} \delta = C_4 \cdot 10^6$.

Таким образом, $\operatorname{tg} \delta$ численно равен емкости C_4 , выраженной в микрофарадах. Шкалы C_4 указывают значение $\operatorname{tg} \delta$ в процентах. Емкость испытываемого объекта

$$C_x = \frac{C_N R_4}{R_3}. \quad (5.10)$$

Для смены испытываемого объекта необходимо снизить напряжение до нуля, выключить автомат и рубильник видимого разрыва и открыть дверь ограждения. При этом размыкаются блок-контакты в цепи питания электромагнита контактора K , исключающего возможность подачи напряжения на обмотку НОМ-10.

В случае электростатических влияний измерение диэлектрических потерь проводится в последовательности, указанной в табл. 5.2.

Основные характеристики моста переменного тока Р-5026 Мост переменного тока Р-5026 предназначен для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной промышленной изоляции (изоляторов, вводов, конденсаторов, трансформаторов, машин-двигателей, генераторов, компенсаторов и т.п. объектов) в эксплуатационных условиях, непосредственно на месте установки оборудования; для лабораторных измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь различных электроизоляционных материалов и конденсаторов при частоте 50 Гц.

Мост предназначен для эксплуатации в условиях умеренного климата в закрытых сухих отапливаемых помещениях при температуре окружающего воздуха от 10 до 35 °С и относительной влажности 80 % (при 25 °С) и в закрытых неотапливаемых помещениях при температуре окружающего воздуха от 10 до 40 °С и относительной влажности 90 % (при 30 °С).

Пределы измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, пределы допускаемой основной погрешности измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, пределы рабочего напряжения приведены в табл. 5.3.

C^* - числовое значение емкости, пФ.

C и $\operatorname{tg} \delta$ – измеренное значение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Устройство моста Р-5026 и принцип работы приведены в прил. 3.

Т а б л и ц а 5.3

Пределы измерения		Пределы допускаемой основной погрешности измерения		Пределы рабочего напряжения, кВ	Схема измерения	Диапазон рабочих температур, °С
C _х , пФ	tg δ _х	C _х , %	tg δ _х			
1000-10000	5×10 ⁻³ -1,0	±2,5+ $\frac{50}{C^*}$ /	±0,05tgδ+3×10 ⁻³ /	3-10	Прямая и перевернутая	От–10 до +40
10 ⁴ -10 ⁵						
10 ⁵ -10 ⁶						
650-2×10 ⁵	5×10 ⁻³ -1,0	±2,5	±0,05tgδ+3×10 ⁻³ /	<0,1	прямая	От–10 до +40
6500-2×10 ⁶	5×10 ⁻³ -1,0					
2×10 ⁶ -5×10 ⁸						

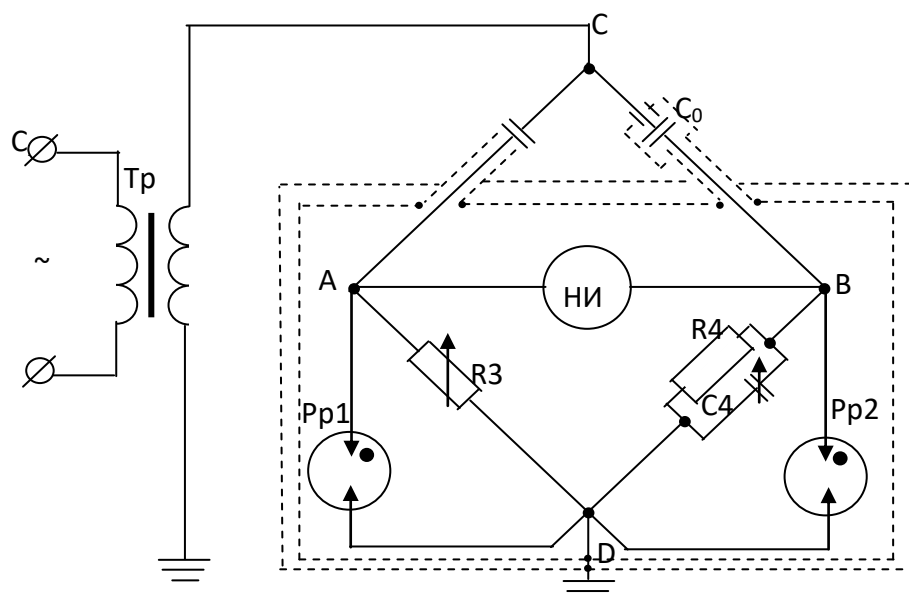


Рис. 5.6. «Прямая» схема на ВН

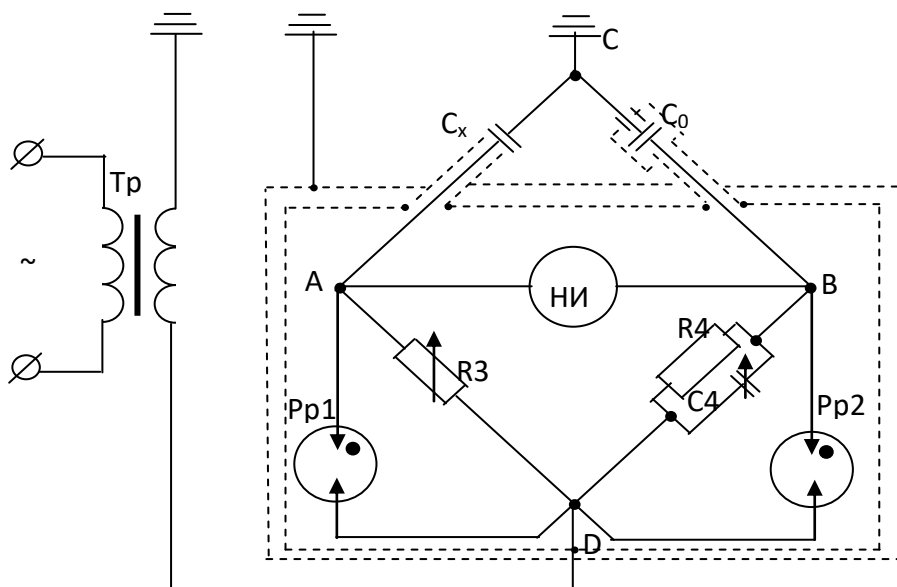


Рис. 5.7. «Перевернутая» схема на
 Pp1, Pp2 – высоковольтные разрядники; C_0 – емкость образцового конденсатора;
 C_x – емкость испытываемого конденсатора; НИ – нуль-индикатор (микроамперметр);
 R3 – сопротивление ряда R3; C4 – емкость ряда C4;
 R4 – сопротивление на переключатели R4

5.4. Последовательность выполнения работы

1. Установить на панели управления моста:
 - ручку «чувствительность» - в положение «ВЫКЛ»;
 - ручки ряда R3 – в положение отсчета 50 Ом;
 - ручки ряда C4 – в положение 0,001 мкФ;
 - ручку переключателя «SA1» - в положение предполагаемого значения измеряемой емкости (положение «1») при работе на высоком напряжении.
2. Включить мост и регулирующее устройство в сеть.
3. Включить автомат «Сеть» регулирующего устройства, нажать кнопку «Пуск», при этом должна загореться зеленая лампочка. Вращением ручки автотрансформатора установить испытательное напряжение 3 кВ.
4. Включить тумблер «Сеть» моста. При этом должна загореться лампочка освещения шкалы микроамперметра..
5. Установить ручку «Чувствительность» в такое положение, при котором стрелка микроамперметра отклониться на 30-35 мкА.
6. Добиться положения, при котором стрелка амперметра наиболее близко подойдет к нулевой отметке шкалы, поочередно регулируя сопротивления R4, сопротивления ряда R3 и емкости ряда C4, увеличивая при этом чувствительность указателя равновесия.
7. Записать значения отсчета «R4», «C4», «R3».
8. Отключить тумблер «Сеть» моста.
9. Вращением ручки автотрансформатора установить испытательное напряжение на нулевую отметку. Нажать кнопку «Стоп», при этом должна загореться красная лампочка. Включить автомат «Сеть» регулирующего устройства.

10. Отключить мост и регулирующее устройство от сети.

5.5. Обработка результатов измерений

Вычисление C_x и $tg\delta x$ производить по формулам

$$C_x = C_0 \cdot N \cdot \frac{3183}{R3}$$

где C_0 - действительное значение емкости образцового конденсатора, пФ

N - множитель у переключателя «R4» (1 или 0,1)

$R3$ - отсчет на мосте

$$tg\delta x = N \cdot C4 ,$$

где $C4$ – отсчет на мосте.

Принципиальная схема балансировки измерительного моста по прямой схеме включения при работе на высоком напряжении приведена на рис. 5.6.

5.6. Указание мер техники безопасности

1. Прежде чем приступить к работе с измерительным мостом, необходимо заземлить его гибким медным проводом сечением 4 мм².

2. Установку и выемку ячейки с диэлектриком производить только после полного отключения установки от сети.

3. Работу на установке производить стоя на резиновом коврике.

4. Производить работу на установке с неисправной сигнализацией и блокировками запрещается.

5. Устройство отключения испытательного трансформатора должно находиться под рукой, чтобы в случае необходимости можно было в любой момент немедленно снять напряжение.

6. При выполнении измерений в схеме с мостом все лица должны соблюдать общие требования по технической эксплуатации и технике безопасности при эксплуатации измерительных приборов, установленные Правилами Госэнергонадзора.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой угол диэлектрических потерь?
2. От каких факторов зависит тангенс угла диэлектрических потерь?
3. В чем состоят недостатки $tg\delta x$ как критерия состояния изоляции?
4. Чем отличаются нормальная схема измерения $tg\delta x$ от перевернутой.
5. Какие требования к конструкции моста связаны с измерением по перевернутой схеме?
6. О чем свидетельствует рост $tg\delta x$ при повышении испытательного напряжения?
7. Какой вид имеет векторная диаграмма равновесия моста при учете внешних электростатических влияний?

Приложение 1

Т а б л и ц а П1.1

**Относительная диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность
наиболее распространённых изоляционных материалов**

№ п/п	Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость. ϵ	Электрическая прочность, $F_{\text{пр}} \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$
1	2	3	4
1.	Асбоцемент	6,0-8,0	2,0-3,0
2.	Битум	2,2-2,8	12-25
3.	Бумага конденсаторная, пропитанная минеральным маслом	3,4-3,7	250-300
4.	Воздух	1,0006	3,0
5.	Водород	1,0003	1,8
6.	Гетинакс	5,0-8,0	10-20
7.	Жидкость электроизоляционная кремний-органическая	2,4-2,8	18
8.	Капрон	3,6-5,0	15-20
9.	Лавсан	3,0-3,5	80-120
10.	Лакоткань хлопчатобумажная	3,0-4,0	17-35
11.	Масло трансформаторное	2,1-2,4	15-20
12.	Миканит	5,0-5,2	15-40
13.	Мрамор	7,0-8,0	2,0-4,0
14.	Октол	2,2-2,4	12-16
15.	Парафин	1,9-2,2	20-30
16.	Пленка из фторопласта-4	1,9-2,1	180-220
17.	Пленка лавсановая	3,3-3,6	140-170
18.	Пленка полистирольная	2,1-2,6	80-170
19.	Пленка полиэтиленовая	2,1-2,2	100-120
20.	Пленка триацетатная	3,0-4,0	80-120
21.	Пленкоэлектрокартон	-	16-35
22.	Полистирол	2,4-2,6	25-40
23.	Полихлорвинил	3,2-4,0	18-35
24.	Полиэтилен	2,2-2,4	35-60
25.	Резина электроизоляционная	3,0-6,0	15-25
26.	Сегнетокерамика	1500-4000	2,5-3,5
27.	Слюда электроизоляционная	5,0-8,0	80-190
28.	Смола эпоксидная	3,8-4,6	15-30
29.	Совол	4,8-5,2	14-20
30.	Стеатит	6,0-6,8	35-40
31.	Стекло кварцевое	3,2-3,5	20-35
32.	Стекло обыкновенное	6,0-10,0	10-15
33.	Стекло органическое	3,5-3,8	15-25
34.	Стеклолакоткань	3,0-4,0	30-40
35.	Текстолит	6,0-8,0	10-16
36.	Термоконт	14-25	8-12

1	2	3	4
37.	Тиконд	70-80	10-12
38.	Токонд	130-150	10-12
39.	Фторопласт-4	1,9-2,2	25-27
40.	Шифер	6,0-8,0	0,5-1,5
41.	Эбонит	2,7-3,5	15-20
42.	Элегаз	1,0019	7,2
43.	Электрокартон сухой	2,5-4,0	8-10
44.	Электрофарфор	5,5-7,0	20-30

Приложение 2

Обработка результатов измерений

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения $U_{ПР}$ в кВ вычисляют по формуле

$$U_{ПР} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{ПРi} ,$$

где $U_{ПРi}$ – величина, полученная при последовательных пробоях, кВ;

n – число пробоев.

Среднюю квадратичную ошибку среднего арифметического значения пробивного напряжения вычисляют по формуле

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{ПРi} - U_{ПР})^2}{n(n-1)}}$$

Доверительный интервал $\pm\beta$ определяют по формуле

$$\beta = \pm t(p_0, n) \sigma_n$$

где σ_n – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического; $t(p_0, n)$ – коэффициенты Стьюдента (гарантийные коэффициенты), приведенные в табл. П2.1.

Т а б л и ц а П2.1

N	Коэффициенты Стьюдента			
	Доверительная вероятность p_0			
	0,9	0,95	0,98	0,99
3	2,9	4,3	7,0	9,9
5	2,1	2,8	3,7	4,6
10	1,8	2,3	2,8	3,3
20	1,7	2,1	2,5	2,8
30	1,7	2,0	2,5	2,8
∞	1,6	2,0	2,3	2,6

При большом числе измерений ($n \rightarrow \infty$) доверительный интервал $3\sigma_n$ соответствует высокой доверительной вероятности $p_0 = 0,997$. При $n \geq 5$ «правило 3σ » обеспечивает доверительную вероятность свыше 0,95, что в большинстве случаев также можно считать достаточным. Поэтому, как правило, рекомендуется принимать $t(p_0, n) = 3$.

Иногда доверительный интервал определяют приближенно $\beta = \pm 3 \sigma_n$

Приложение 3

Устройство моста Р-5026 и его работа

Мост состоит из:

- панели У1;
- нульиндикатора У2;
- магазина сопротивлений У3;
- магазина емкости У4;

Магазин сопротивления У3 (рис. ПЗ.1) имеет три декады (120x100, 9x10, 9x1 Ом) и плавно переменный потенциометр, имеющий шкалу с ценой деления 0,02 Ом.

Нуль индикатор предназначен для индикации равновесия моста и представляет собой чувствительный транзисторный избирательный усилитель, на выходе которого включен стрелочный прибор.

Чувствительность НИ составляет не менее 2 мкА/мкВ и измеряется ступенями через 30 дБ.

Входное сопротивление НИ не менее 300 Ом.

Питание НИ осуществляется от двух элементов (например 373) при этом потребляемый ток не более 10 мА.

Переключатель (В1-2) служит для включения и выключения НИ.

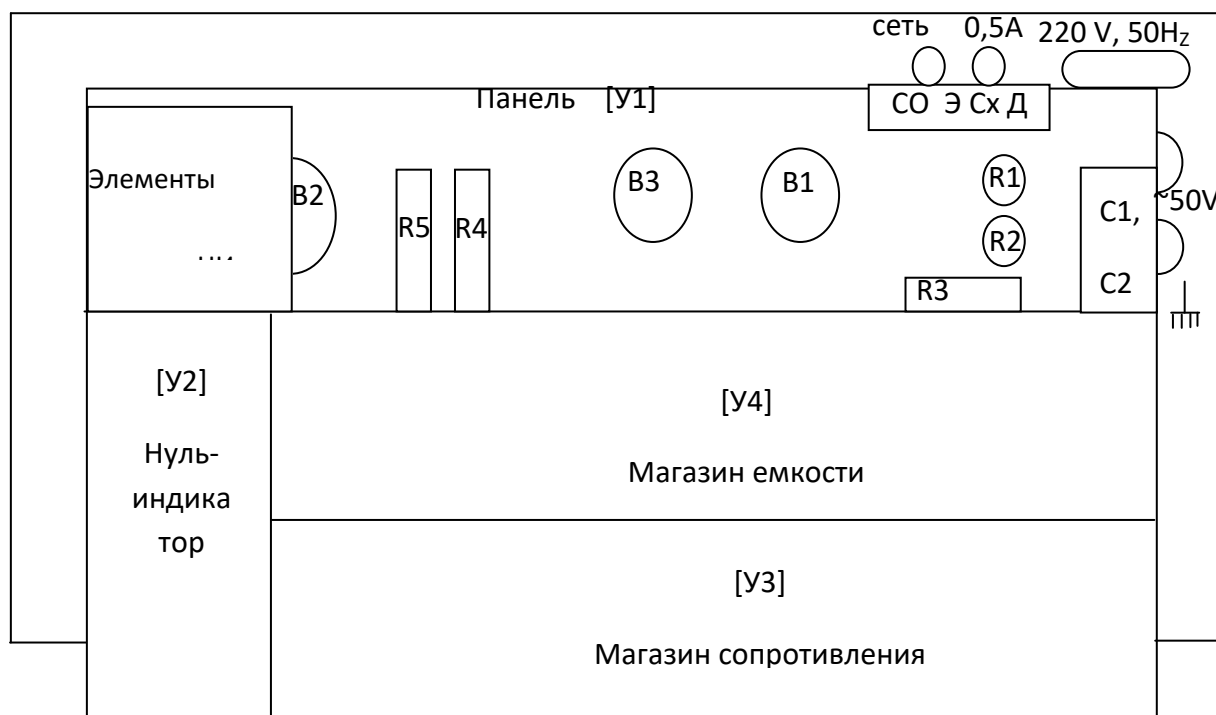


Рис. ПЗ.1 Расположение блоков моста

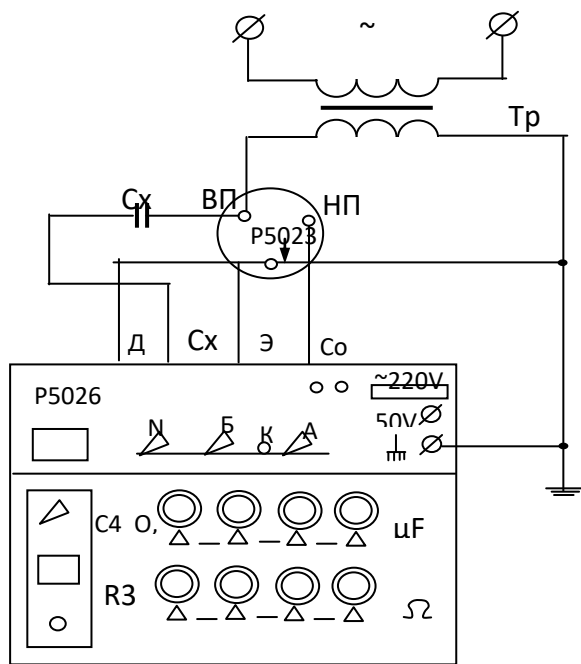


Рис. ПЗ-2. Схема соединений при работе на высоком напряжении «прямая»

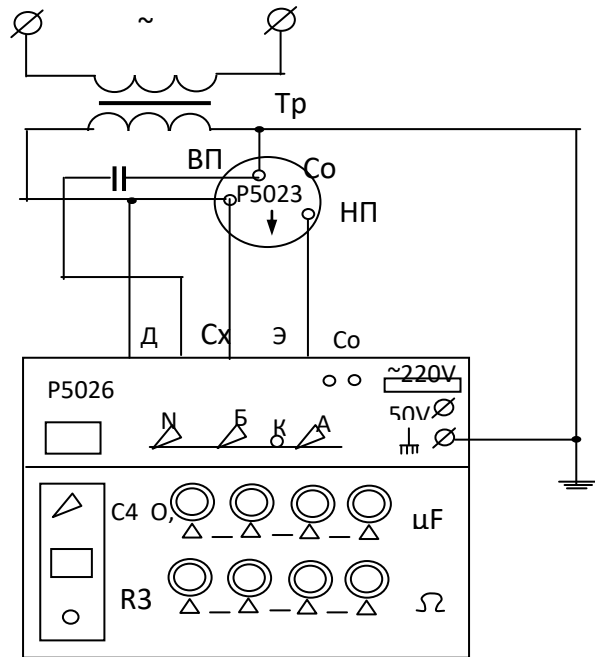


Рис. ПЗ-3. Схема соединений при работе на высоком напряжении «перевернутая»

Магазин емкости состоит из 3-х декад: $9 \times 0,1$; $9 \times 0,01$; $9 \times 0,001$ мкФ и воздушного конденсатора переменной емкости.

Панель У1 (рис. ПЗ-1).

На панели расположен переключатель пределов измерения на высоком и на низком напряжении «А», блокировочная кнопка переключателя «К», переключатель полярности НИ и знака $\text{tg}\delta$ – «Б», переключатель типа $R4$ «N», разрядники, гнезда для подключения шнура питания, зажимы подключения C_x и C_0 , образцовые конденсаторы для низковольтной схемы измерения, элементы питания НИ и шунтирующего сопротивления.

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

На наружной панели моста укреплены: трансформатор Тр1, ограничительный конденсатор С1, лампочка Л1 для освещения шкалы микроамперметра.

Переключатель пределов «А» обеспечивает выбор схемы моста для работы на высоком (красная маркировка) или на низком (черная маркировка) напряжении.

Для исключения ошибки от неправильный действий оператора перевод работы схемы с высокого напряжения на низкое и обратно возможно лишь при нажатии кнопки «К».

Переключатель «Б» обеспечивает два включения для измерения положительного или отрицательного $\text{tg}\delta$. Каждое такое включение имеет два положения «1», «2». При переходе из положения «1» в положение «2» изменяется полярность присоединения НИ.

Регулировка, чувствительность НИ моста осуществляется ручкой «чувствительность» «В», которая служит также для подключения и отключения элементов питания.

Для контроля состояния элементов питания НИ моста служит кнопка «контроль», расположенная на лицевой панели моста.

При нажатой кнопке стрелка микроамперметра должна отклониться не менее чем на 30 мкА.

Образцовый конденсатор Р 5023, применяемый при работе моста на высоком напряжении, представляет собой воздушный конденсатор с коаксиальным расположением электродов.

Сборка электродов (высокопотенциального наружного и низкопотенциального внутреннего) вертикально укреплена в стальном цилиндрическом корпусе, на крышке которого расположены ввод «Вн», зажимы «НП» и « ».

Рабочее напряжение при испытаниях должно быть не менее 3 кВ.

В мосте применена схема Шеренга, позволяющая производить измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь:

а) по прямой схеме на высоком напряжении (рис. ПЗ-2);

б) по «перевернутой» схеме на высоком напряжении (рис. ПЗ-3);

Емкость и tg угла диэлектрических потерь определяется по нижеприведенным формулам.

Переключатель пределов «А» установлен в положении «1».

Формулы имеют вид

$$C_x = C_0 N \frac{3183}{R3}, \quad (\text{ПЗ.1})$$

где C_0 – действительное значение емкости образцового конденсатора;

N – множитель у переключателя (1 или 0,1);

$R3$ – отсчет на мосте.

$$\operatorname{tg} \delta_x = N \cdot C4. \quad (\text{ПЗ.2})$$

Переключатель пределов «А» установлен в положение «2» или «3». При этом переключатель «N» установлен в положение «1».

Формулы для определения C_x и $\operatorname{tg} \delta_x$ для соответствующих положений переключателей «А».

$$C_x = 200 \cdot C_0 \frac{150 - S + R3}{R3}, \quad (\text{ПЗ.3})$$

где S – отсчет на плавно переменном потенциометре.

$$\operatorname{tg} \delta_x = C4 \quad (\text{ПЗ.4})$$

где $C4$ – отсчет на мосте.

$$C_x = 2000 \cdot C_0 \frac{150 - S + R3}{R3}; \quad (\text{ПЗ.5})$$

$$tg\delta_x = C4 . \quad (ПЗ.6)$$

Переключатель пределов «А» установлен в положении «4» переключатель «N» в положение «0,1».

Формулы для определения C_x и $tg\delta_x$ имеют вид:

$$C_x = \frac{4 \cdot 318,3 \cdot 10^3}{R3} Пф ; \quad (ПЗ.7)$$

$$tg\delta_x = 0,1 \cdot C4 . \quad (ПЗ.8)$$

Переключатель пределов “А” установлен в положение “4”, переключатель «N» в положение «0,1».

Формулы для определения C_x и $tg\delta_x$:

$$C_x = \frac{4 \cdot 318,3 \cdot 10^3}{R3} мкф ; \quad (ПЗ.9)$$

$$tg\delta_x = C4 . \quad (ПЗ.10)$$

Переключатель пределов “А” установлен в положение “5”, переключатель «N» в положение «1».

$$C_x = \frac{3183}{R3} мкф ; \quad (ПЗ.11)$$

$$tg\delta_x = C4 . \quad (ПЗ.12)$$

Приложение 4

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра возобновляемых источников энергии
и электрических систем и сетей

Лабораторная работа № _____

Тема: _____

Выполнил: студент (ка) группы _____
Петров А.С.

« ____ » _____ 20 ____ г.

Севастополь 20 ____

Приложение 5

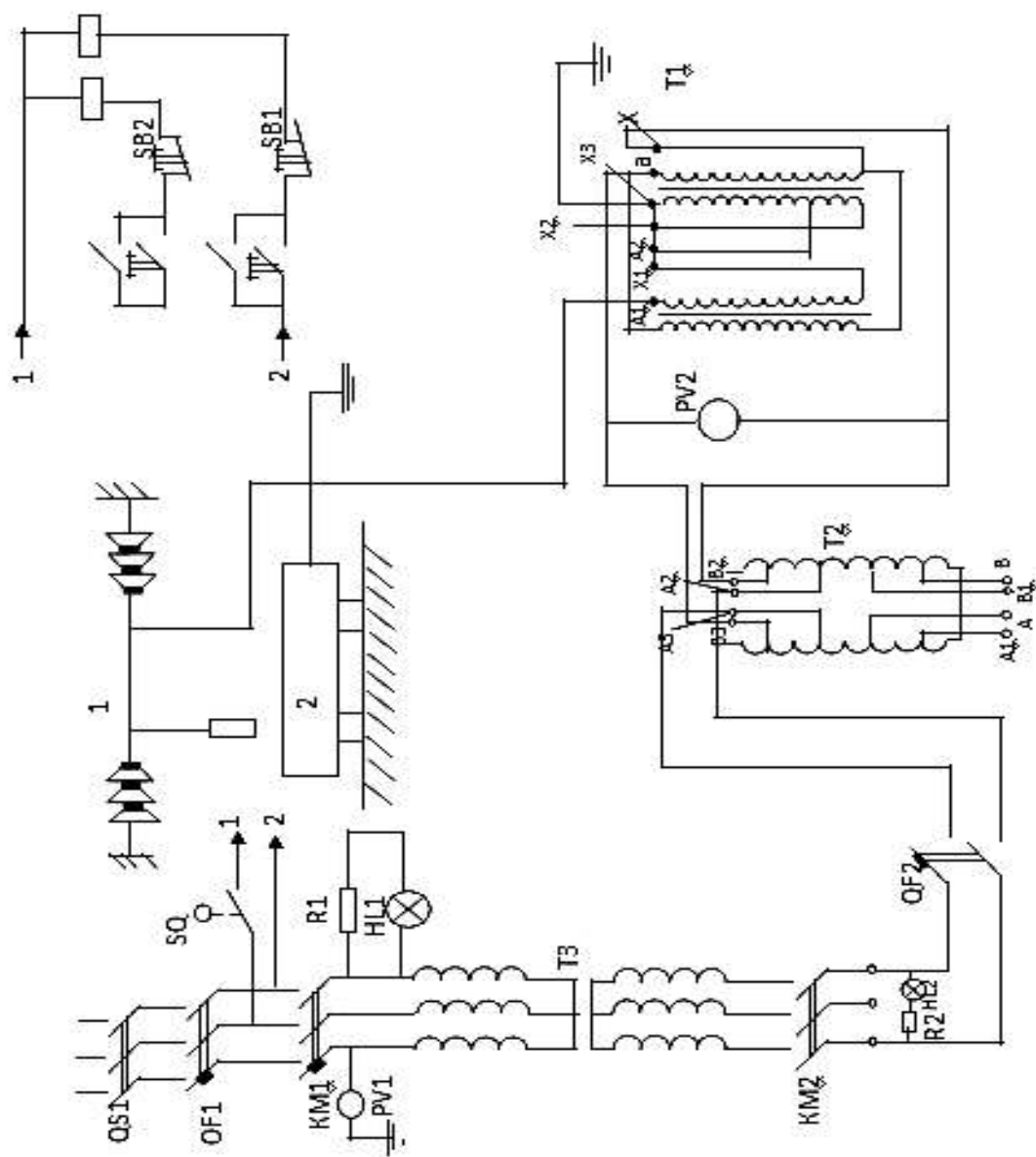


Рис.1 Схема экспериментальной установки

ЛИТЕРАТУРА

1. Вазов, В. Ф. Техника высоких напряжений : учебник / В. Ф. Вазов, В. А. Лавринович. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 262 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – ISBN 978-5-16-010565-9. – Текст : электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1086750>.

2. Бочаров, Ю.Н. Техника высоких напряжений : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – 265 с. – ISBN 978-5-7422-3998-7. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>.

3. Электрофизические основы техники высоких напряжений [Текст]: учеб. для студ. вузов, обуч. по напр. подгот. "Электроэнергетика" / И.М. Бортник [и др.] ; ред. И. П. Верещагин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с. : ил. – (Учебник для вузов).

4. Техника высоких напряжений: учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / Л.Ф. Дмоховская [и др.] ; под общ. ред. Д.В. Разевига. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.: ил.

Учебное издание

**Путилин Константин Петрович
Малюк Евгений Григорьевич
Пронина Анна Константиновна**

**ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Изд. № 36/2021. Объем 5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»