

Учебное пособие для подготовки к лабораторным работам по курсу «Техника высоких напряжений» для студентов 3 курса ИШЭ.

В учебном пособии приводится методическое описание лабораторных работ по технике высоких напряжений. Предназначено для студентов бакалавриата по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», выполняющих цикл лабораторных работ в лаборатории высоковольтной техники ИШЭ.

Название и последовательность лабораторных работ:

№ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ.

№2. РАЗРЯД В СЛАБОНЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

№ 3. ЭФФЕКТ ПОЛЯРНОСТИ И ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ НА ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ.

№ 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА.

№ 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОНЫ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

№ 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ГИРЛЯНДЕ ПОДВЕСНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ.

№ 7. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

№ 8. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Цель работы: исследование зависимости разрядного напряжения в воздухе от расстояния между электродами при различной форме электродов.

1. Краткие сведения

Основным диэлектриком для создания внешней изоляции ЛЭП и высоковольтного оборудования, работающего в открытых распределительных устройствах электрических станций и подстанций, является воздух при атмосферных условиях.

При нормальных атмосферных условиях электрическая прочность воздушных промежутков невелика и в однородном поле не превышает 30 кВ/см. Электрическое поле реальных изоляционных конструкций в большинстве случаев является неоднородным, и электрическая прочность воздушных промежутков значительно уменьшается. Это связано с особенностями развития разряда в неоднородных полях.

При приложении к воздушному промежутку высокого напряжения происходит эмиссия электронов из катода, их ускорение в электриче-

ском поле и ионизация атомов и молекул воздуха, что приводит к появлению большого количества носителей зарядов в лавинах, которые преобразуются в стримеры. В результате этого при некоторой величине приложенного напряжения в воздухе формируется плазменный искровой канал, который переключает промежуток. Минимальное напряжение, при котором происходит полная потеря диэлектриком изолирующих свойств называется разрядным напряжением (U_p).

В неоднородных и резконеоднородных полях ионизация начинается только в части промежутка с наибольшей напряженностью поля. Возникший в этих областях самостоятельный разряд называется коронным разрядом, а начальное напряжение – напряжением зажигания коронного разряда. В слабонеоднородных полях ($K_n = E_{\max}/E_{\text{ср}} \leq 3$) коронный разряд неустойчив и быстро переходит в полный пробой промежутка. В таких полях напряжение зажигания коронного разряда близко или совпадает с U_p .

В резконеоднородных полях ($K_n > 3$) ионизация и коронный разряд занимают незначительную часть промежутка вблизи электрода с меньшим радиусом, коронный разряд является устойчивым, и разрядное напряжение может быть существенно выше коронного. Возникновение

стримерного коронного разряда сопровождается свечением области ионизации, потрескиванием и появлением запаха озона. Коронный разряд может иметь две формы – лавинную и стримерную. Лавинной называется такая форма разряда, при которой в промежутке развиваются лавины электронов. При этом напряженность поля зарядов каждой из лавин значительно меньше напряженности внешнего поля. Зона ионизации при большом числе лавин имеет более или менее однородную структуру, что приводит к выравниванию электрического поля в промежутке за счет образующегося объемного заряда, знак которого совпадает со знаком "острого" электрода.

Число электронов в лавине, развивающейся от одного эффективного электрона, равно

$$n = e^{\alpha x}, \quad (1)$$

где n – число электронов в лавине; x – расстояние, пройденное лавиной; α – эффективный коэффициент ударной ионизации.

Коэффициент ударной ионизации определяется

$$\alpha = \frac{0,2}{\delta} (E - 24,5\delta)^2, \quad (2)$$

где δ – относительная плотность воздуха

$$\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \quad (3)$$

где P и T – давление и температура в условиях опыта, P_0 и T_0 – нормальные атмосферные условия: $P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 293$ К, E – напряженность поля в области фронта лавины.

При более интенсивной, стримерной форме разряда, кроме лавин электронов в промежутке развиваются стримерные каналы. Если поле зарядов лавины становится соизмеримым с внешним электрическим полем в промежутке, то лавины электронов преобразуются в стример. У головки стримера происходит интенсивная ионизация, обеспечивающая прораствание стримера в глубь промежутка. Коронный разряд, распространяющийся только в части промежутка между электродами, еще не означает потерю электрической прочности, но приводит к значительным потерям энергии, коррозии провода, арматуры и изоляции, вызывает появление шума и радиопомех. Поэтому при работе высоковольтных установок интенсивность коронного разряда необходимо снижать.

Величина разрядного напряжения зависит от длины промежутка, размеров и формы электродов (рис. 1), способа их подключения, плот-

ности и вида газа, полярности и частоты напряжения. Расчет разрядного напряжения для некоторых форм электродов в сантиметровых промежутках можно проводить по приближенным формулам.

Для электродов острие–плоскость

$$U_p = (7 + 3,36 S)\delta, \text{ кВ.} \quad (4)$$

Для электродов острие – острие

$$U_p = (14 + 3,16 S)\delta, \text{ кВ.} \quad (5)$$

Для электродов шар – шар

$$U_p = 27,2 \cdot \delta \cdot S \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{R\delta}}\right) / 0,25 \left[\frac{S}{R} + 1 + \sqrt{\left(\frac{S}{R} + 1\right)^2 + 8} \right], \text{ кВ,} \quad (6)$$

где S – расстояние между электродами, см.

В реальных условиях изоляционные конструкции имеют самые разнообразные конфигурации и размеры, а, следовательно, и различные электрические поля. Поэтому исследование разрядных напряжений и напряжений коронного разряда для различных форм электродов и разных расстояний между ними представляет большой практический интерес. Для точного сопоставления результатов измерений, проведенных

при различных условиях внешней среды (давление, температура и влажность воздуха), U_p корректируют, приводя к нормальным условиям.

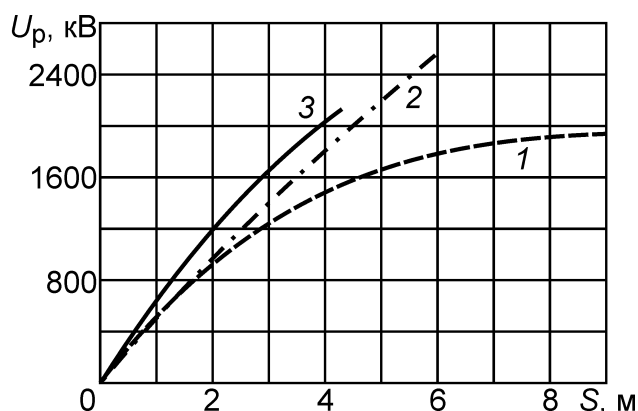


Рис. 1. Разрядные напряжения воздушных промежутков при переменном напряжении частотой 50 Гц:

1 – стержень–плоскость; 2 – стержень–стержень; 3 – провод–провод

2. Порядок работы

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рис. 2).

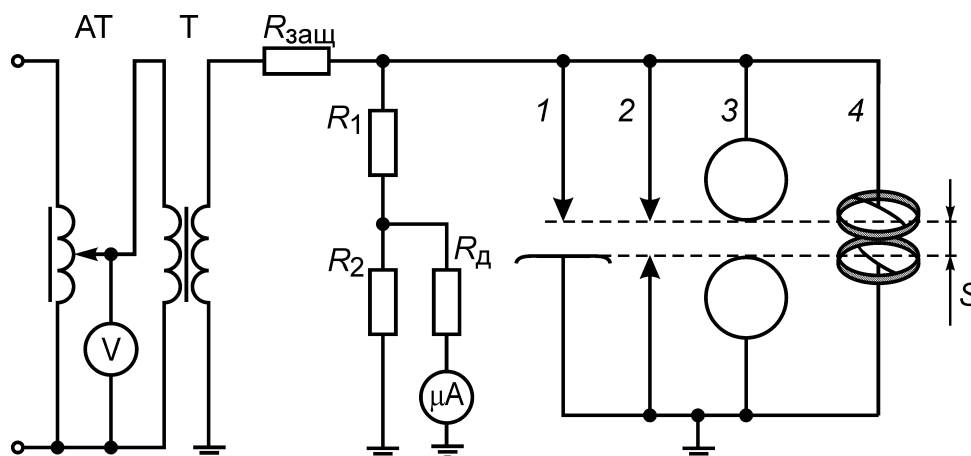


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

AT – автотрансформатор; T – высоковольтный трансформатор; $R_{\text{заш}}$ – защитное сопротивление; R_1, R_2 – высоковольтный омический делитель; $R_{\text{д}}$ – добавочное сопротивление; V – вольтметр; μA – микроамперметр; 1–4 – испытываемые электроды

2. Установить в держателях электроды острие – плоскость.
3. При плавном повышении напряжения для различных расстояний S между электродами зафиксировать пробивное напряжение U_p . Для каждого расстояния S провести три измерения, результаты занести в табл. 1. Рассчитать средние значения разрядного напряжения $U_{\text{ср}}$ и напряженности поля $E_{\text{ср}}$ для каждого расстояния S .
4. Провести измерения по п. 2 для электродов острие–острие, шар – шар, коронирующие кольца.
5. Рассчитать разрядные напряжения и напряженность поля для электродов острие–плоскость, острие – острие, шар – шар.

3. Содержание отчета

1. По опытным и расчетным данным построить зависимости $U_p = f(S)$ для различных систем электродов.
2. По опытным и расчетным данным построить зависимости $E_{\text{ср}} = f(S)$.
3. Объяснить зависимости $U_p = f(S)$ и $E_{\text{ср}} = f(S)$.
4. Объяснить расхождение между опытными и расчетными данными.
5. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 1

Форма электродов	S , см	Опытные данные			Расчетные данные	
		U_p , кВ	$U_{\text{ср}}$, кВ	$E_{\text{ср}}$, кВ/см	U_p , кВ	$E_{\text{ср}}$, кВ/см

	1	2	3				
Острие–плоскость							
Острие–острие							
Шар–шар							
Коронирующие кольца						–	–

4. Контрольные вопросы

1. Для каких целей вводится поправка на относительную плотность воздуха?
2. Почему в однородном поле отсутствует коронная форма разряда?
3. Какие параметры электродной системы влияют на максимальную и среднюю напряженность электрического поля?
4. Как классифицируется и чем определяется степень неоднородности электрического поля?

2. РАЗРЯД В СЛАБНЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Цель работы: изучение влияния неоднородности электрического поля на разрядное напряжение между электродами в слабонеоднородном поле.

1. Краткие сведения

Атмосферный воздух является самым распространенным диэлектрическим “материалом” для создания внешней изоляции энергетического оборудования и электрических аппаратов. Изолируемые электроды располагаются на определенных расстояниях друг от друга и от земли и укрепляются в заданном положении с помощью изоляторов. Разрядное напряжение воздушного промежутка зависит от конфигурации электрического поля между электродами и давления, температуры и влажности воздуха. В связи с этим знание процессов, сопровождающих нарушение электрической прочности воздуха, является весьма важным.

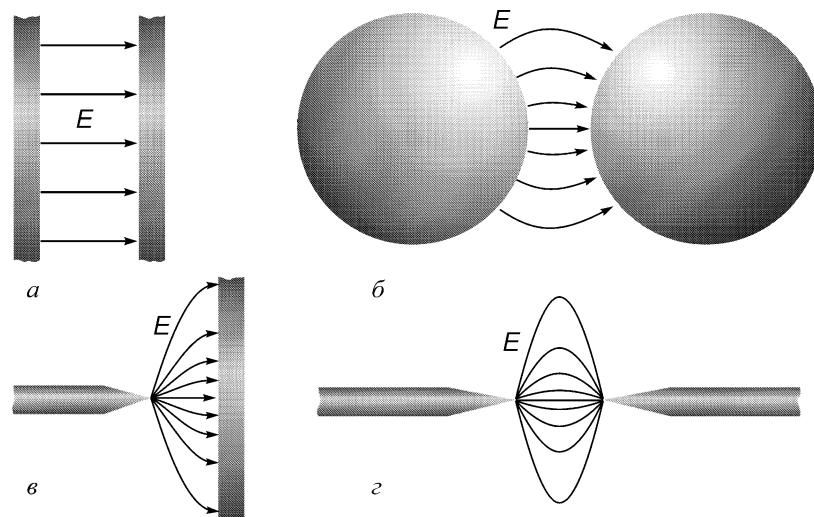


Рис. 1. Различные конфигурации электрического поля:
 а – однородное; б – слабонеоднородное; в, г – резконеоднородное

Электрические поля разделяют на однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные (рис. 1). В однородном поле его напряженность постоянна вдоль силовых линий. Слабонеоднородным можно назвать поле, в котором напряженность изменяется вдоль силовых линий не более чем в 2–3 раза. При бóльших значениях изменения напряженности электрического поля имеем резконеоднородное поле. Степень неоднородности электрического поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности K_n , который равен отношению максимальной напряженности $E_{\text{макс}}$ к средней напряженности $E_{\text{ср}}$ поля между электродами:

$$K_n = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}}. \quad (1)$$

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

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S}. \quad (2)$$

Максимальная напряженность зависит от формы, размеров электродов, способа их подключения и расстояния между ними.

Рассмотрим промежуток между двумя электродами в газе с однородным полем. Если в этом промежутке появился электрон, то, двигаясь

к аноду, при достаточной напряженности электрического поля он может при столкновении ионизировать молекулу газа. В результате этого появляется новый свободный электрон, который вместе с начальным ионизирует новые молекулы, и число свободных электронов непрерывно нарастает. Процесс роста числа электронов, движущихся к аноду, получил название лавины электронов. Интенсивность размножения электронов в лавине количественно характеризуется коэффициентом ударной ионизации α , численно равным числу ионизаций, производимых электронами на пути в 1 см по направлению электрического поля.

В однородном поле число электронов в лавине:

$$n = e^{\alpha x}, \quad (3)$$

где n – число электронов в лавине; x – расстояние, пройденное лавиной; α – коэффициент ударной ионизации.

$$\alpha = \frac{0,2}{\delta} (E - 24,5\delta)^2, \quad (4)$$

где δ – относительная плотность воздуха,

$$\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \quad (5)$$

где P и T – давление и температура в условиях опыта, P_0 и T_0 – нормальные атмосферные условия, $P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 293$ К.

Под действием внешних ионизаторов (космические частицы, радиоактивное излучение земли, ультрафиолетовое излучение солнца) в промежутке между электродами непрерывно возникают свободные первичные электроны, которые дают начало лавинам электронов. После достижения лавиной анода процесс может прекратиться, особенно при небольшой длине промежутка. Для поддержания лавинного процесса должен появиться хотя бы один вторичный эффективный электрон, вызывающий появление новых лавин. Такой электрон может образоваться вновь в результате действия внешнего ионизатора, в этом случае разряд называется несамостоятельным. Если же вторичный эффективный элек-

трон возникает даже в отсутствие внешнего ионизатора, разряд называется самостоятельным. При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку сама первичная лавина создает условия для его возобновления:

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

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

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

Условие самостоятельности разряда в однородном поле можно записать

$$\gamma \cdot e^{\alpha S} \geq 1, \quad (6)$$

где S – расстояние между электродами; γ – коэффициент вторичной ионизации.

Напряжение, при котором в промежутке выполняется условие самостоятельности разряда, называют начальным напряжением. В процессе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов, при этом напряженность электрического поля на фронте лавины возрастает, а в хвосте лавины уменьшается (рис. 2). При прохождении лавиной некоторого критического пути $x_{кр}$ напряженность в хвосте лавины уменьшается настолько, что становится невозможной ударная ионизация. Находящиеся в хвосте лавины отставшие электроны вместе с положительными ионами создают плазменное образование, дающее начало возникновению стримерного канала. В зависимости от условий стример может быть связан с электродом или не связан. Характерной его особенностью, в любом случае, является наличие избыточного заряда на конце, создающего местное усиление электрического поля и обеспечивающего непрерывное удлинение плазменного канала.

Критерием перехода лавины в стример является соизмеримость напряженности электрического поля, создаваемого лавиной электронов

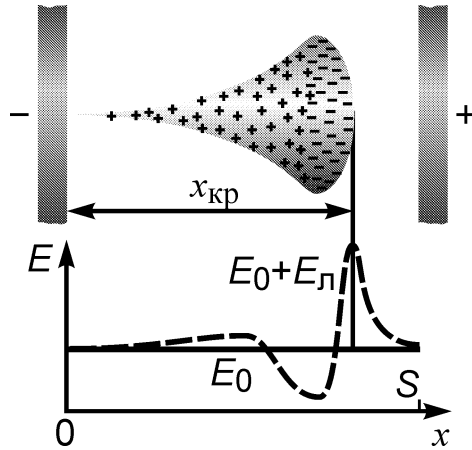


Рис. 2. Искажение электрического поля в промежутке между электродами, создаваемое лавиной:

E_0 – напряженность внешнего поля; $E_л$ – напряженность поля, создаваемая лавиной

или положительными ионами в ее следе, и напряженности внешнего поля, создаваемого приложенным между электродами напряжением.

Ионизация прекращается ($\alpha \leq 0$), если $E \leq b\delta$ (для воздуха $b = 24,5$ кВ/см, см. (4)).

Напряженность в хвосте лавины равна

$$E = E_0 - E_л, \quad (7)$$

где E_0 – напряженность внешнего поля; $E_л$ – напряженность, создаваемая лавиной.

Тогда критерий перехода лавины в стример запишется как

$$(E_0 - E_л) \leq b\delta. \quad (8)$$

Напряженность $E_л$ определяется по формуле

$$E_л = \frac{e \cdot n}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}, \quad (9)$$

где e – заряд электрона; n – число электронов в лавине;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;
 r – радиус лавины.

В однородном поле условие самостоятельности разряда выполняется при начальном напряжении, которое всегда совпадает со статистическим разрядным напряжением. В слабонеоднородных полях эффективный коэффициент ударной ионизации $\alpha_{\text{эфф}} > 0$ практически по всей длине промежутка, поэтому при выполнении самостоятельности разряда промежуток пробивается, и начальное напряжение также равно разрядному.

Типовым промежутком со слабонеоднородным полем является промежуток между двумя шарами, который получил широкое распространение в мировой практике как универсальный прибор для измерения амплитудных значений постоянного, переменного и импульсного напряжения. Установлено, что для соблюдения точности измерений в пределах $\pm 3\%$ максимально допустимое значение отношения S/D (D – диаметр шара) при измерениях не должно превышать 0,5. В этом случае неоднородность поля невелика и в первом приближении его можно считать квазиоднородным ($K_n \approx 1$). При увеличении расстояния между шарами ($S/D > 0,5$) неоднородность поля (и соответственно K_n) возрастает и заметно влияет на величину разрядного напряжения, что позволяет оценить коэффициент неоднородности электрического поля. Напряженность поля в этом случае имеет максимальное значение на поверхности электродов, а минимальное – в середине промежутка.

2. Порядок работы

1. Ознакомиться с устройством испытательной установки, схема которой представлена на рисунке 3.
2. Установить в держатели электродов шары диаметром $D = 12,5$ см.
3. Между шарами поочередно устанавливая расстояния S (1–5 см), включать установку и плавно увеличивать напряжение до тех пор, пока не произойдет разряд в промежутке. В этот момент фиксировать разрядное напряжение U . Для каждого расстояния S провести три измерения и результаты занести в табл. 1. Рассчитать среднее значение разрядного напряжения $U_{\text{ср}}$ для каждого расстояния S . Во время измерений по п. 3 необходимо выполнять условие $S/D < 0,5$, чтобы поле между шарами оставалось квазиоднородным. Тогда, при некотором допущении, можно принять, что

$$E_{\text{макс}} \cong E_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{S}. \quad (10)$$

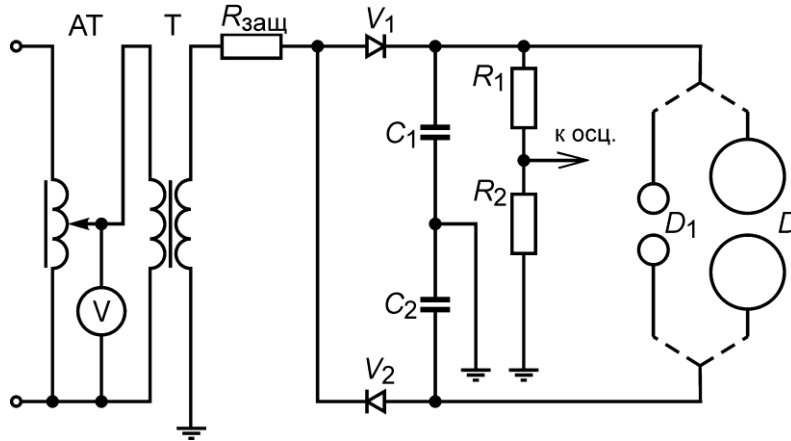


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

AT – автотрансформатор; T – высоковольтный трансформатор; $R_{\text{защ}}$ – защитное сопротивление; V_1, V_2 – выпрямители; C_1, C_2 – фильтр; R_1, R_2 – высоковольтный омический делитель; V – вольтметр; D, D_1 – электроды

4. В испытательной установке заменить шары диаметром 12,5 см на шары диаметром $D_1=5$ см. Установить расстояние между шарами на 1–3 см больше величины S в первом опыте п. 3. Включить установку и плавно увеличить напряжение до значения $U_{\text{ср}}$, рассчитанного для первого опыта п. 3, а затем сближать шары до получения между ними разряда. Измерить длину разрядного промежутка S_1 . Измерения повторять три раза для каждого из расстояний S п. 3.
5. Рассчитать среднее значение расстояния $S_{1\text{ср}}$ для каждого разрядного напряжения $U_{\text{ср}}$. Учитывая, что $E_{\text{ср}} = U_{\text{ср}}/S_{1\text{ср}}$, определить коэффициент неоднородности электрического поля $K_{\text{н}} = E_{\text{макс}}/E_{\text{ср}}$.

Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

S, см	$D = 12,5$ см					$D = 5$ см					
	U , кВ			$U_{\text{ср}}$, кВ	$E_{\text{макс}}$, кВ/см	S_1 , см			$S_{1\text{ср}}$, см	$E_{\text{ср}}$, кВ/см	$K_{\text{н}}$
	1	2	3			1	2	3			
1											
2											

3											
4											
5											

3. Содержание отчета

1. Построить на одном графике зависимости $U = f(S)$, $U = f(S_1)$.
2. Построить зависимости $K_n = f(S_1)$.
3. Объяснить ход зависимостей $U = f(S)$ и $U = f(S_1)$.
4. Ответить на контрольные вопросы.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент неоднородности электрического поля?
2. Что называется лавиной электронов?
3. В чем заключается условие самостоятельности разряда в газах?
4. Что называется коэффициентом ударной ионизации?
5. Почему при измерении напряжения используются электроды шар–шар, а не плоскость–плоскость?

3. ЭФФЕКТ ПОЛЯРНОСТИ И ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Цель работы: исследование влияния полярности электродов и влияния барьеров на пробивное напряжение воздушного промежутка острие–плоскость.

1. Краткие сведения

Воздушная изоляция играет важную роль в различных высоковольтных конструкциях, поэтому оценка величин разрядных напряжений в воздушных промежутках имеет большое значение в создании высоковольтной изоляции. Разрядные напряжения при данном расстоянии между электродами зависят от степени неравномерности электрического поля, времени воздействия напряжения, полярности электродов, атмосферных условий и других факторов. В слабонеоднородных полях, где максимальный и средний градиенты мало отличаются друг от друга, влияние полярности невелико. В резконеоднородном поле коронное напряжение намного ниже разрядного, полярность при несимметричных электродах существенно влияет на величину разрядного напряжения. В

промежутке острие – плоскость формирование разряда зависит от полярности острия.

При положительной полярности острия имеющиеся в промежутке электроны, двигаясь к острию в область сильного поля, совершают ударную ионизацию и образуют лавину электронов. Когда лавина доходит до острия, электроны лавины нейтрализуются на аноде, а положительные ионы вследствие малой скорости движения остаются у острия и создают положительный объемный заряд, который обладает собственным электрическим полем. Взаимодействуя с внешним полем в промежутке, положительный объемный заряд ослабляет поле вблизи острия и усиливает его во внешнем пространстве (рис. 1).

Если напряжение между электродами достаточно велико, то возникает лавина электронов справа от объемного заряда, электроны которой, смешиваясь с положительными ионами объемного заряда, создают анодный стример, заполненный плазмой. Положительные заряды этой лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве. Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера, постепенно удлиняя его. Стример прорастает к катоду, вызывая пробой промежутка при сравнительно малой величине разрядного напряжения.

При отрицательной полярности острия электрическое поле непосредственно у острия приводит к эмиссии электронов с катода, которые сразу попадают в сильное поле и производят ударную ионизацию, образуя большое число лавин. Электроны лавин, перемещаясь в слабое поле у анода, теряют скорость, захватываются нейтральными молекулами, становятся отрицательными ионами, рассеянными в пространстве.

Положительные ионы лавин образуют объемный заряд у острия, который, взаимодействуя с внешним полем, будет увеличивать напряженность непосредственно у острия и уменьшать во внешнем пространстве (рис. 2). Усиленное поле у острия приводит к усилению эмиссии электронов с поверхности катода, которые, смешиваясь с положительным объемным зарядом, образуют у катода катодный стример. Следовательно, коронный разряд у катода зажигается при напряжении несколько меньшем, чем при положительной полярности острия.

Вследствие большого числа начальных лавин у катода плазменный канал здесь представляет собой узкий слой высокой напряженности поля, где осуществляется лавинный процесс и рождаются электроны, выносимые во внешнее пространство.

Уменьшение напряженности электрического поля во внешнем пространстве приводит к тому, что для дальнейшей ионизации в этой части

промежутка необходимо значительно увеличить разность потенциалов между электродами.

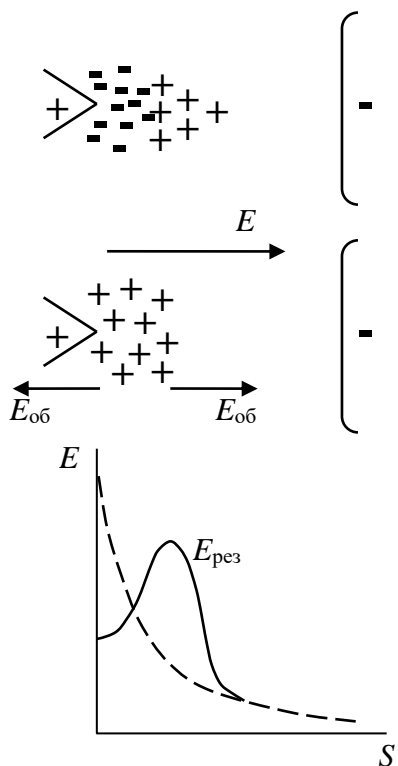


Рис. 1. Образование анодного стримера

E – напряженность внешнего поля; $E_{об}$ – напряженность объемного положительного заряда; $E_{рез}$ – результирующая напряженность в промежутке после ионизации

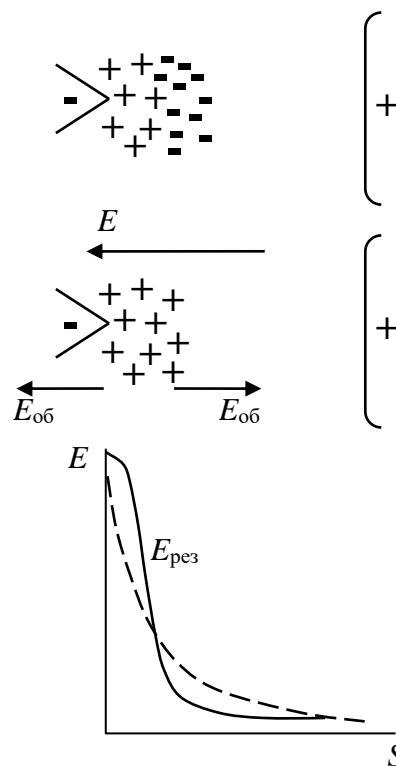


Рис. 2. Образование катодного стримера

При дальнейшем увеличении напряжения происходит ионизация справа от плазменного слоя, большое число образующихся лавин приводит к удлинению стримера. Средняя скорость продвижения катодного стримера меньше, чем анодного.

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

На практике увеличение разрядных напряжений изоляционных промежутков достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика (электрокартон, гетинакс и др.). При положительном острине положительные ионы оседают на барьер и растекаются по его

поверхности тем равномернее, чем дальше от острия расположен барьер. Это приводит к более равномерному распределению напряженности в промежутке между барьером и плоскостью и, следовательно, к значительному увеличению разрядного напряжения (рис. 3).

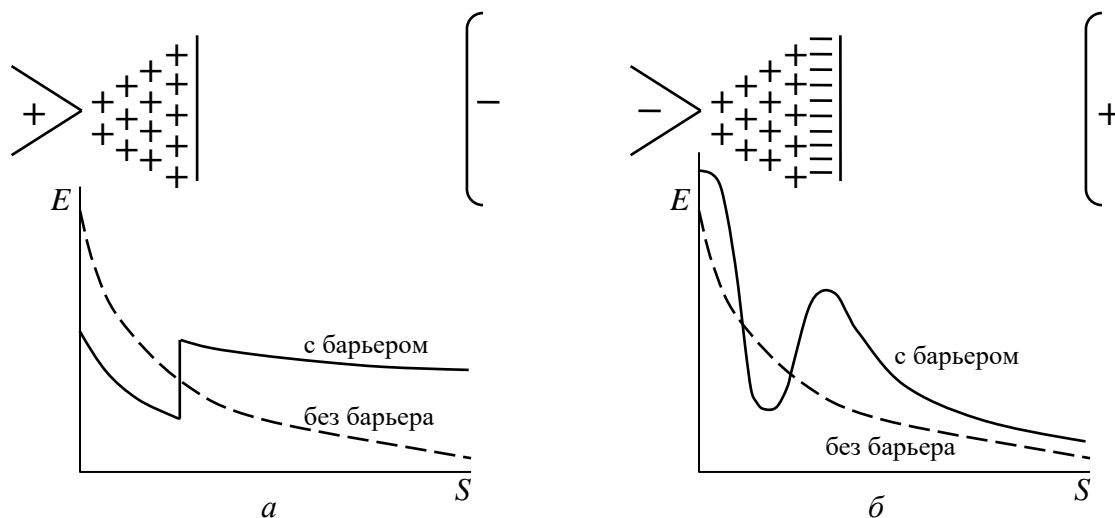


Рис. 3. Распределение напряженности поля в промежутке при наличии барьера:

а – положительная полярность острия; *б* – отрицательная полярность острия

При отрицательной полярности острия электроны, двигаясь от острия, попадают на барьер, теряют скорость, и большинство из них становятся отрицательными ионами. На барьере в этом случае появляется концентрированный отрицательный заряд, увеличивающий напряженность поля не только между положительным объемным зарядом у острия и барьером, но и во внешнем пространстве. Степень влияния отрицательного концентрированного заряда будет тем больше, чем дальше от острия установлен барьер.

Поэтому при отрицательной полярности острия увеличение разрядного напряжения в промежутке при наличии барьера будет незначительным, а если барьер установлен ближе к плоскости, то разрядное напряжение будет даже меньше, чем в промежутке без барьера. При расположении барьера в средней части промежутка разрядные напряжения при отрицательной и положительной полярностях близки.

Таким образом, барьеры в промежутке устанавливаются на таком оптимальном расстоянии от острия, при котором разрядные напряжения максимальны ((0,15 - 0,3) длины промежутка между электродами). Причем при положительной полярности острия разрядное напряжение может увеличиться в 2 – 2,5 раза по сравнению с промежутком без барьера, а при отрицательной полярности коронирующего электрода – в 1,2 – 1,3 раза.

Если могут коронировать оба электрода разрядного промежутка, то барьеры устанавливаются вблизи обоих электродов.

При расположении барьера в непосредственной близости от положительного острия роль его уменьшается вследствие резкой неравномерности распределения зарядов на барьере. Напряженность поля оказывается достаточной для того, чтобы ионизационные процессы проходили по другую сторону барьера.

Упрочняющий эффект барьеров имеет место при постоянном, переменном и импульсном напряжениях. Однако при импульсных напряжениях барьерный эффект выражен слабее, так как барьер не успевает за короткое время зарядиться.

Барьеры широко используются в высоковольтных конструкциях, работающих как в воздухе, так и в масле (высоковольтные вводы, трансформаторы и др.).

2. Порядок работы

1. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 4).

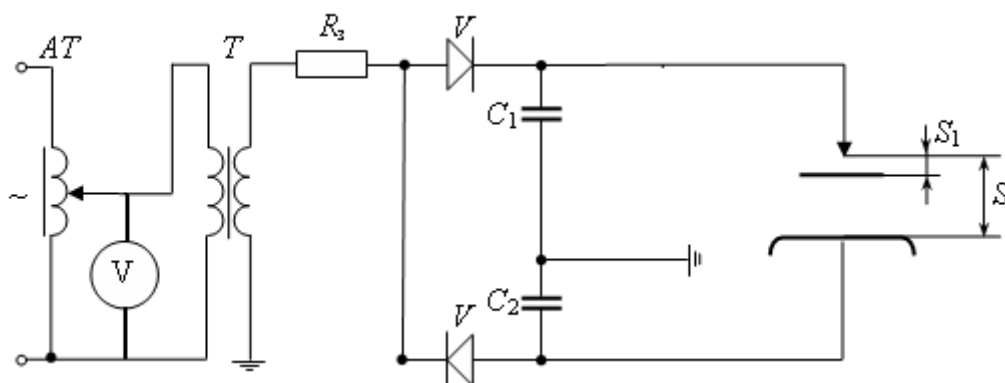


Рис. 4. Электрическая схема установки:

AT – автотрансформатор; *T* – высоковольтный трансформатор; R_3 – защитное сопротивление; *V* – выпрямитель; *C* – конденсатор; *R* – токоограничивающее сопротивление; μA – прибор для измерения высокого напряжения

2. Для 4 – 6 значений межэлектродного расстояния S измерить величину разрядного напряжения U_P для каждой полярности электродов. Опыты повторить по 3 раза на каждое расстояние. Данные заносят в табл. 1.

3. Для 4–6 значений расстояния между барьером и острием S_1 определяют величину разрядного напряжения между электродами в промежутке с барьером. Опыты повторяют по 3 раза на каждое расстояние и каждую полярность электродов, и данные заносят в табл. 2.

Расстояние между электродами постоянное ($S = \text{const}$).

3. Содержание отчета

1. Построить на графике зависимости $U_p = f(S)$ при положительном острие и $U_p = f(S)$ при отрицательном острие.
2. Построить на графике зависимости $U_p = f(S_1)$ при положительном острие и $U_p = f(S_1)$ при отрицательном острие. На этом же графике провести линии, соответствующие разрядному напряжению для неизменного расстояния между электродами ($S = \text{const}$) без барьера в промежутке S для каждой полярности острия.
3. Объяснить влияние полярности электродов на разрядное напряжение.
4. Объяснить влияние барьеров при разной полярности электродов на разрядное напряжение.

Таблица 1

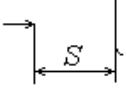
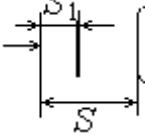
S , см				Полярность острия
	U_p , кВ			
	1	2	3	$U_{p. \text{ ср}}$

Таблица 2

S_1 , см				Полярность острия
	U_p , кВ			
	1	2	3	$U_{p. \text{ ср}}$

4. Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависят разрядные напряжения промежутков?
2. В каких промежутках полярность электродов влияет на величину разрядного напряжения?
3. Как можно увеличить разрядные напряжения изоляционных промежутков?
4. Из какого материала выполняется барьер?
5. На каком оптимальном расстоянии от острия устанавливается барьер в межэлектродном промежутке?

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Цель работы: экспериментальное изучение разряда по поверхности твердого диэлектрика в зависимости от конфигурации электрического поля, расстояния между электродами и толщины диэлектрика.

1. Краткие сведения

Необходимость изучения разрядов по поверхности твердого диэлектрика в воздухе связана с тем, что они в значительной мере обуславливают разрядные характеристики внешней изоляции.

Напряжение разряда вдоль поверхности твердых диэлектриков в воздухе всегда ниже разрядного напряжения воздушного промежутка такой же длины и конфигурации электрического поля. Величина напряжения поверхностного разряда определяется длиной разрядного канала, конфигурацией электрического поля в промежутке, электрофизическими характеристиками и состоянием поверхности твердого диэлектрика, температурой, давлением и влажностью воздуха. Все многообразие электрических полей изоляционных конструкций с твердым диэлектриком может быть сведено к трем характерным случаям.

1. Равномерное поле (рис. 1). Поверхность раздела двух диэлектрических сред расположена вдоль силовых линий электрического поля.

2. Неоднородное поле с преобладанием тангенциальной составляющей напряженности поля во всех точках поверхности диэлектрика (рис. 2, а).

3. Неоднородное поле с преобладанием нормальной составляющей напряженности электрического поля (рис. 2, б).

Диэлектрик, помещенный в равномерное поле, нарушает его однородность, и разряд происходит всегда по поверхности диэлектрика, при напряжении более низком, чем в воздушном промежутке.

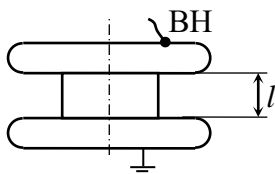


Рис. 1. Система электродов с равномерным полем

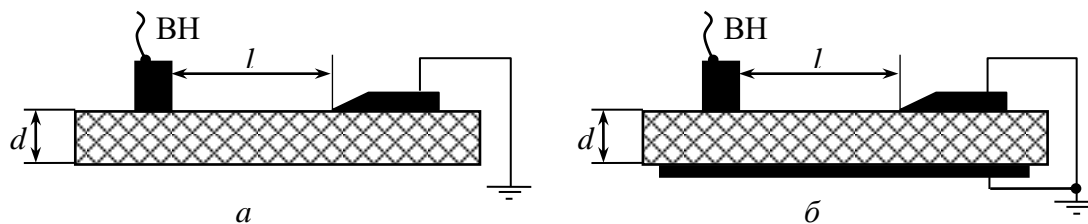


Рис. 2. Система электродов с преобладающей тангенциальной (а) и преобладающей нормальной (б) составляющей электрического поля

Значительную роль в снижении разрядных напряжений играет адсорбция диэлектриком влаги. Материалы, обладающие большой поверхностной гигроскопичностью (стекло, эбонит, оргстекло, бакелизированная бумага), дают большее снижение разрядных напряжений, чем малогигроскопичные материалы (парафин, винипласт). Под действием приложенного к электродам напряжения диссоциированные ионы, содержащиеся в адсорбированной диэлектриком влаге, перераспределяются по поверхности диэлектрика, искажая градиент потенциала вдоль его поверхности. В результате разрядное напряжение уменьшается. На импульсах поле в промежутке не успевает существенно исказиться из-за инерционности процесса перераспределения зарядов, поэтому разрядное напряжение снижается в меньшей мере. Кроме увлажнения поверхности диэлектрика, на величину разрядного напряжения существенное влияние оказывают воздушные прослойки между диэлектриком и электродами. В этих прослойках из-за отличия диэлектрических проницаемостей воздуха и твердого диэлектрика создается локальное увеличение напряженности поля и, возможно, возникновение ионизационных процессов. Следовательно, в реальных изоляционных конструкциях твердый диэлектрик очень редко располагается в однородном поле. Чистота поверхности диэлектрика также является фактором, оказывающим влияние на разрядное напряжение. Наличие загрязнений снижает разрядное напряжение поверхностного разряда.

Неоднородное поле с преобладанием тангенциальной составляющей (рис.2, а) характерно для опорных изоляторов. Влияние гигроскопических свойств диэлектрика на величину разрядных напряжений в этом случае будет меньшим, так как искажения поля, обусловленные процессами на поверхности диэлектрика, лишь незначительно увеличивают и без того значительную неоднородность поля.

Конфигурация электрического поля с преобладанием нормальной составляющей напряженности (рис.2, б) характерна для конструкции проходного изолятора. Неоднородность поля в межэлектродном промежутке в этом случае выше, чем в рассмотренных ранее, и, следовательно, разрядные напряжения ниже.

Поверхностный разряд по мере увеличения приложенного напряжения проходит несколько стадий.

1. При относительно низких напряжениях на электродах возникает коронный разряд в виде полосы ровного неяркого свечения.

2. Увеличение напряжения приводит к расширению области коронирования и образованию на твердом диэлектрике многочисленных слабо светящихся каналов (стримеров), направленных к противоположному электроду. Характер разрядных процессов определяется величиной токов, текущих в разрядных каналах.

При дальнейшем увеличении напряжения ток возрастает настолько, что становится возможной термическая ионизация в стримерных каналах. Эта форма стримерного разряда, называемая скользящим разрядом, характеризуется интенсивным свечением канала, резким уменьшением сопротивления канала и, следовательно, выносом потенциала в глубь промежутка.

3. Длина скользящих разрядов очень быстро увеличивается с повышением напряжения, и процесс завершается перекрытием промежутка между электродами.

Величина тока в любом разрядном канале в основном определяется емкостью канала по отношению к противоположному электроду. В качестве величины, характеризующей емкость канала, принимается удельная поверхностная емкость, т.е. емкость единицы поверхности, по которой развивается разряд, по отношению к противоположному электроду.

Очевидно, что чем выше удельная поверхностная емкость C , тем больше ток, протекающий по каналу на зарядку этой емкости, поэтому выше проводимость стримерного канала и потенциал на его конце, тем быстрее растет длина скользящего разряда и ниже напряжение разряда по поверхности.

Для приближенного расчета напряжения поверхностного разряда можно использовать следующие эмпирические выражения. Начальное напряжение возникновения скользящих разрядов описывается выражением:

$$U_{н.ск.р} = \frac{1,35 \times 10^{-4}}{C^{0,45}} \text{ кВ} \quad (1)$$

Разрядное напряжение по поверхности твердого диэлектрика для плоского диэлектрика описывается выражением:

$$U_{\text{ПОВ.Р}} = k \times \left(\frac{d}{\varepsilon} \right)^{0,45} \times l^{0,2}, \text{ кВ} \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость (для стекла $\varepsilon = 6$); d – толщина диэлектрика, см., l – длина канала скользящего разряда, k – коэффициент, определяемый опытным путем и зависящий от состояния поверхности диэлектрика, атмосферных условий и типа электродной системы, вида диэлектрика. Для электродной системы используемой в данной лабораторной работе параметр k принимается равным 0,81 для случая преобладания нормальной составляющей и 1,08 для случая преобладания тангенциальной составляющей напряженности электрического поля.

Появление скользящего разряда на изоляционной конструкции энергетических установок при рабочем напряжении недопустимо, особенно для органических диэлектриков, вследствие неблагоприятного воздействия на них повышенной температуры, коротковолнового излучения, а также химически активных продуктов разряда, образующихся в результате диссоциации и ионизации молекул газа (в воздухе озон, атомарный кислород, окислы азота). Указанные воздействия приводят к ускоренному старению, эрозии и образованию науглероженных дорожек (треков), потере изолирующих свойств диэлектрического материала и последующему пробою.

Для увеличения длины пути утечки тока по поверхности твердого диэлектрика и увеличения разрядного напряжения применяют ребристую поверхность.

В данной работе разрядные напряжения по поверхности диэлектрика в неоднородном поле исследуются на конструкциях, приведенных на рис. 2, *а* и *б*. В качестве диэлектрика используется силикатное стекло.

3. Порядок работы

Перед началом работы ознакомиться со схемой установки (рис. 3), расположением ее элементов и объектов испытания, с порядком проведения измерений и правилами безопасности при работе на данной установке.

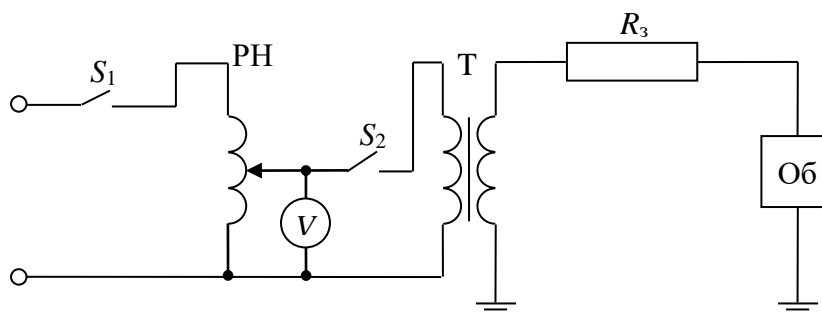


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема установки:
 РН – регулятор напряжения, Т– высоковольтный трансформатор, R_3 – защитное сопротивление; S_1, S_2 – выключатели

Определить напряжение появления короны, скользящих разрядов и полного перекрытия промежутков с преобладающей тангенциальной составляющей для 4–6 значений межэлектродного расстояния при воздействии переменного напряжения промышленной частоты. Результаты занести в таблицу 1.

3. Определить напряжение появления короны, скользящих разрядов и напряжения перекрытия для 8-10 значений межэлектродного расстояния при воздействии переменного напряжения в промежутке с преобладающей нормальной составляющей электрического поля. Для изменения удельной поверхностной емкости необходимо изменять толщину диэлектрика.

4. Построить графики $U_{\text{короны}} = f(l), U_{\text{р}} = f(l), U_{\text{ск.р.}} = f(l), U_{\text{пер}} = f(l)$, по результатам опытов.

5. Используя формулу (2) рассчитать значения напряжения перекрытия для межэлектродных расстояний, использованных в эксперименте и построить графики $U_{\text{расчет.пер}} = f(l)$.

6. Проанализировать полученные зависимости, сопоставить экспериментальные и расчетные данные и сделать выводы о характере разрядных процессов.

Таблица 1.

№ п/п	l , см	d , см	$U_{\text{короны}}$, кВ	$U_{\text{ск.р.}}$, кВ	$U_{\text{перекрытия}}$, кВ	$U_{\text{перекрытия}}$ расчет, кВ

4. Контрольные вопросы

1. С чем связано искажение электрического поля при помещении диэлектрика в равномерное поле?
2. Какое влияние оказывает неплотное прилегание электродов на разрядное напряжение вдоль поверхности диэлектриков?
3. Для каких изоляционных конструкций характерно электрическое поле с преобладающей тангенциальной составляющей, для каких конструкций с нормальной?
4. Что делается в реальных условиях работы электроэнергетических систем для увеличения разрядных напряжений по поверхности изоляторов?

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОНЫ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Цель работы: ознакомиться с основными характеристиками короны на переменном напряжении и методикой их определения.

1. Краткие сведения

Коронный разряд, или **корона**, – один из видов самостоятельного разряда в газе достаточно высокой плотности. Обязательным условием существования короны является значительная неоднородность электрического поля, возникающего в разрядном промежутке при приложении к его электродам напряжения.

Процессы ионизации сопровождаются излучением как в видимой части спектра, так и в коротковолновой. Светящемуся ореолу вблизи поверхности коронирующих электродов и обязан рассматриваемый вид газового разряда своим названием – корона.

Зона вблизи поверхности коронирующего электрода, в которой происходят процессы ионизации, называется чехлом короны.

Образующиеся в зоне ионизации носители электрического заряда под действием сил поля движутся в этом поле, т.е. возникает электрический ток коронного разряда. Носители зарядов, знак которых совпадает со знаком зарядов коронирующих электродов, выносятся из зоны ионизации во внешнюю по отношению к ней темную часть пространства, получившую название внешней зоны короны.

При прочих равных условиях при изменении межэлектродных расстояний будут изменяться и значения начального напряжения короны. При этом градиенты потенциала электрического поля у поверхности с малыми радиусами кривизны будут одинаковыми, что позволяет по их

величинам находить и соответствующие начальные напряжения короны для тех или иных систем электродов. Таким образом, начальные градиенты короны, т.е. градиенты потенциала у поверхности электродов с малыми радиусами кривизны, по достижении которых и возникает корона, являются более общей характеристикой коронирующих электродов.

Для определения начальных градиентов короны переменного тока применительно к гладким, цилиндрическим проводам предложены несколько эмпирических формул, основанных на анализе и обобщении опытных данных.

Наиболее известны и распространены формулы Ф. Пика:

для коаксиальных цилиндров

$$E_0 = 31 \cdot \delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r_0 \cdot \delta}} \right), \quad (1)$$

для параллельных проводов одинаковых радиусов r_0

$$E_0 = 29,8 \cdot \delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r_0 \cdot \delta}} \right). \quad (2)$$

Так же, как и на постоянном напряжении, при достижении напряжения зажигания короны на проводах линий электропередачи переменного напряжения возникают объемные заряды того же знака, что и заряд провода. Вследствие непрерывного изменения полярности провода, объемный заряд каждой фазы удаляется от провода только в течение полупериода и при перемене полярности начинает притягиваться к проводу.

Считая, что напряженность на поверхности коронирующего провода в течение всего полупериода неизменна и равна критической, наибольшее удаление объемного заряда от оси провода можно оценить по формуле

$$r_{\max} = \sqrt{k \cdot T \cdot E_k \cdot r_0}, \quad (3)$$

где k – подвижность ионов; T – период; E_k – напряженность зажигания короны; r_0 – радиус коронирующего провода.

Например, при $r_0 = 1,25 \text{ см}$ $k = 1,8 \frac{\text{см/с}}{\text{В/см}}$, $E_k = 36 \text{ кВ/см}$; $T = 0,02 \text{ с}$ максимальное удаление объемного заряда от провода составит 40 см , что значительно меньше расстояния между фазами в реальных ЛЭП.

Следовательно, при переменном напряжении промышленной частоты объемные заряды каждой фазы можно представлять независимо друг от друга, хотя теоретические расчеты и измерения показывают, что наряду с пульсирующим вокруг каждого провода зарядом имеется небольшая доля заряда, постепенно перемещающаяся к противоположному электроду. Так как величина этого заряда невелика, его можно не учитывать, и коронный разряд на высоковольтных ЛЭП допустимо рассматривать только для одной фазы.

Положим, что линия подключается к источнику синусоидального напряжения в момент t_0 при $U=0$ (рис. 1, а), синусоида в различных масштабах соответствует напряжению источника U , напряженности поля на поверхности провода $E_{\text{пр}}$ и заряду $Q_{\text{пр}} = U \cdot C_0$, где C_0 – емкость ЛЭП на единицу длины при отсутствии короны.

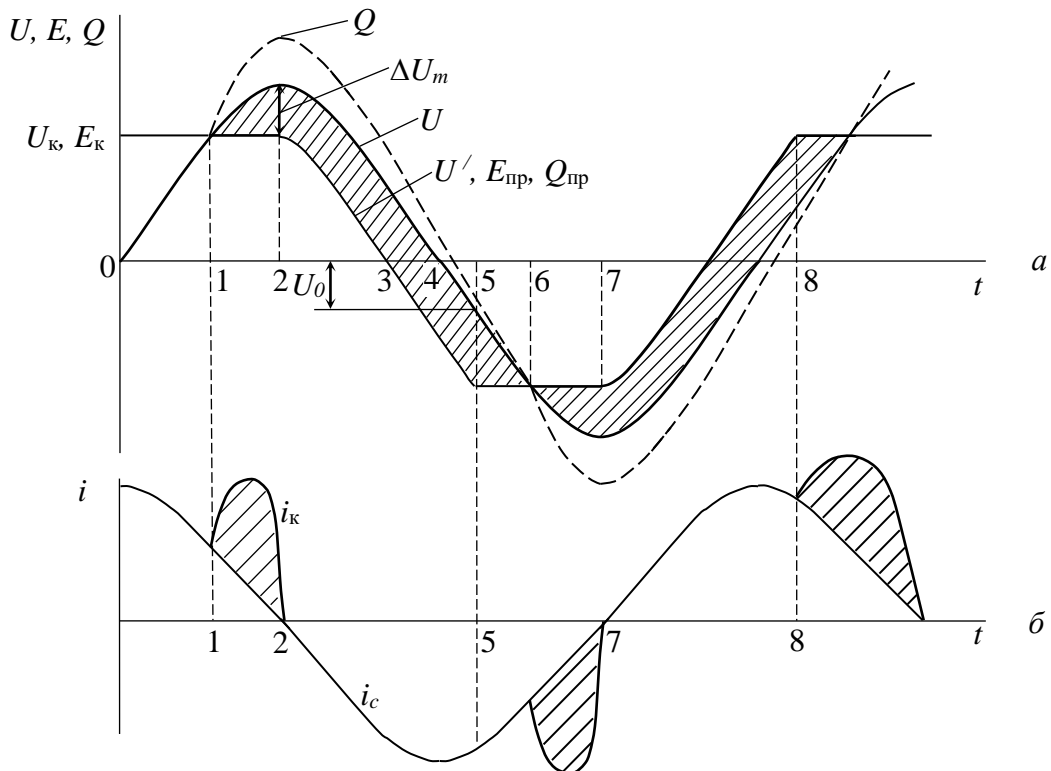


Рис. 1. Корона на проводах при переменном напряжении:

а – изменение во времени напряжения и напряженности электрического поля на проводе и суммарный заряд; б – емкостный ток (i_c) и ток короны (i_k)

В момент времени t_1 , когда напряжение на проводе достигнет значения U_k (соответственно и $E = E_k$), загорится корона (рис. 2, а). По мере роста напряжения от U до U_m ($t_1 - t_2$) часть заряда с провода по образующимся стримерам под действием электрического поля перемещается в окружающее пространство, где создается избыточный положительный заряд (рис. 1, а). При этом наличие тока в каналах стримера высокой проводимости обуславливает сохранение неизменной критическую напряженность E_k на поверхности провода, а следовательно, неизменным и заряд на проводе $Q_{пр} = 2\pi\epsilon r_0 E_k = \text{const}$. Создаваемое этим зарядом напряжение $U' = Q_{пр}/C_0$ также будет неизменным. Разница напряжений $\Delta U = U - U'$ поддерживается объемным зарядом $Q_{об}$, который с ростом напряжения постепенно увеличивается. Одновременно увеличивается и суммарный заряд $Q_{\Sigma} = Q_{пр} + Q_{об}$. После максимального значения напря-

жения источника (t_2) суммарный заряд с уменьшением напряжения уменьшается, в первую очередь, на проводе. Как только напряженность на проводе станет меньше критической, ионизация в чехле короны прекращается, каналы стримеров постепенно теряют свою проводимость, и объемный заряд оказывается отрезанным от провода (рис. 2, б).

В момент времени t_3 (рис. 1, а) заряд на проводе $Q_{пр}$ будет равен нулю, а напряжение ΔU сохраняется положительным за счет влияния объемного заряда и только в момент времени t_4 , когда на проводе появится отрицательный заряд, создающий напряжение ΔU_m , результирующее напряжение станет равным нулю (рис. 2, в).

В момент времени t_5 напряженность на проводе достигнет критической, и загорится «отрицательная корона» при $U = U_0$. Отрицательные частицы из чехла короны, двигаясь навстречу положительным частицам, будут рекомбинировать, уменьшая положительный объемный заряд (рис. 2, г).

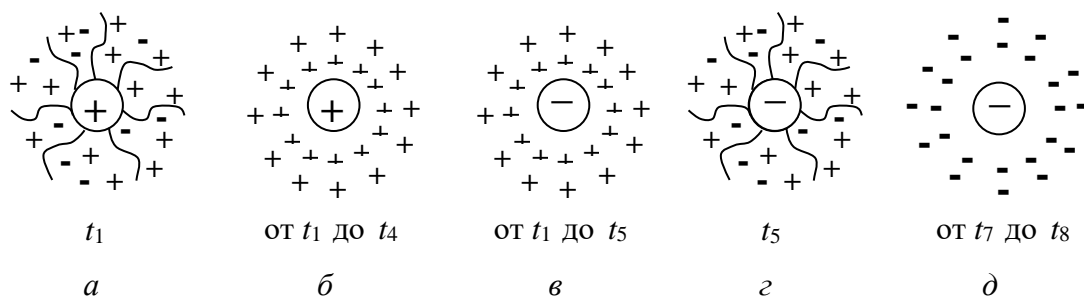


Рис. 2. Объемные заряды в окрестности провода в различные моменты времени

Потери энергии при коронировании как раз и связаны с процессом движения и рекомбинации заряженных частиц. Этот процесс будет длиться до момента времени t_6 , после чего начнется накопление отрицательного объемного заряда до момента времени t_7 , когда погаснет «отрицательная корона» (рис. 1, *a* и рис. 2, *d*).

Во время горения короны той или иной полярности ток короны накладывается на синусоидальный емкостный ток линии, определяемый напряжением источника и геометрической емкостью линии, т.е.

$$i_c = C_0 \cdot \frac{dU}{dt}. \quad (4)$$

(рис. 1, *b*). Изменение формы кривой емкостного тока при загорании короны можно наблюдать на экране осциллографа.

При снятии вольт-амперной характеристики короны на проводах ЛЭП переменного напряжения с помощью осциллографа о появлении короны можно судить также по возникновению всплеска тока. Типичная картина вольт-амперной характеристики приведена на рис. 3, *a*.

Когда короны на проводе нет, потери энергии отсутствуют, так как энергия, затраченная источником на создание электрического поля в течение одного полупериода, в течение следующего полупериода полностью возвращается источнику.

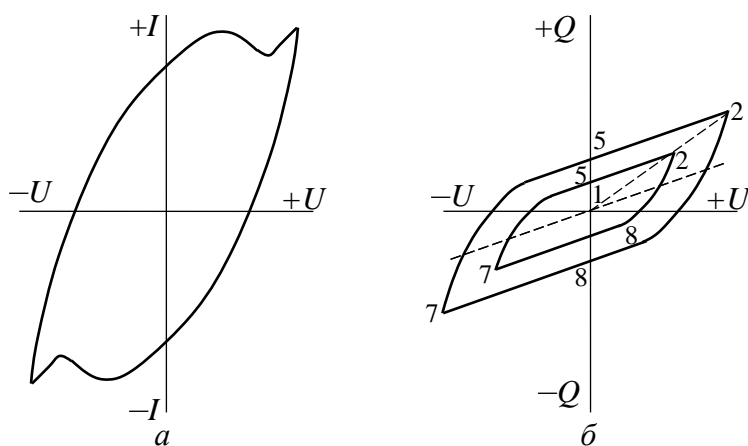


Рис. 3. Характеристики короны:

a— вольт-амперная характеристика короны; *б*— вольт-кулоновая характеристика короны (цифры соответствуют моменту времени на рис. 1, *a*)

При наличии короны источнику возвращается только часть этой энергии, определяемая зарядом на проводе, а энергия, связанная с объ-

емным зарядом вблизи провода, примерно равная $\Delta U \cdot Q_{0\phi} / 2$, сохраняется в виде остаточного электрического поля, которое затем компенсируется зарядом противоположного знака в последующий полупериод.

Таким образом, потери энергии на корону при переменном напряжении связаны с непрерывной перезарядкой чехла короны, которая происходит несинхронно с изменением напряжения. Потери энергии за один период можно определить как $P_0 = \int_0^t U \cdot i \cdot dt$ или $P = \oint U dQ$, т. е.

потери пропорциональны площади так называемой вольт-кулоновой характеристики.

Вольт-кулоновая характеристика представляет собой зависимость мгновенного значения заряда от мгновенного значения напряжения источника.

Вольт-кулоновые характеристики при различных амплитудах приложенного напряжения в стилизованном виде приведены на рис. 3, б, где цифрами отмечены характерные точки, соответствующие отдельным моментам времени на рис. 1, а. Прямолинейные участки вольт-кулоновой характеристики соответствуют интервалам времени, когда корона не горит, изменяется только заряд на проводе и, следовательно, наклон вольт-кулоновой характеристики определяется геометрической емкостью линии.

Потери за единицу времени подсчитываются как

$$P = f \cdot \oint U dQ, \quad (5)$$

т.е. представляют собой площадь вольт-кулоновой характеристики, умноженную на частоту.

Обсуждавшиеся выше формулы для начального градиента короны переменного тока относятся к цилиндрическим проводам с гладкой поверхностью. На линиях электропередачи используются почти исключительно витые провода, на которых величины начального напряжения короны ниже, чем на цилиндрических проводах.

Это обстоятельство принято учитывать введением так называемого коэффициента гладкости витого провода, который представляет собой отношение начального напряжения короны на витом проводе к начальному напряжению короны на гладком цилиндрическом проводе равного радиуса при прочих равных условиях (одинаковые межэлектродные расстояния, одинаковая плотность воздуха, отсутствие осадков).

Критическое напряжение короны для хорошей погоды определяется плотностью воздуха, геометрией провода и коэффициентом гладкости его поверхности m_1 .

Для всех проводов независимо от их диаметров была получена величина коэффициента гладкости $0,85 - 0,9$.

Различные атмосферные условия – дождь, снег, туман, повышенная влажность воздуха, иней, изморозь и гололед – существенно влияют на коронирование проводов линии электропередачи, приводя к повышению уровня потерь мощности на корону (по сравнению с этим уровнем для условий хорошей погоды).

Начальные градиенты короны при дожде, как показали лабораторные исследования, меняются с интенсивностью дождя, что учитывается коэффициентом погоды.

Результаты определения коэффициента погоды m_2 при дожде для одиночных витых и расщепленных проводов нескольких радиусов и для различных значений относительной плотности воздуха приведены на рис. 4.

Рекомендовано разделить все многообразие погодных условий на четыре группы: хорошая погода (без осадков), дождь (включая мокрый снег и морось), сухой снег и изморозь (включая гололед и иней).

Среднегодовые потери на корону для линий электропередачи определяются суммированием потерь по группам погоды с учетом продолжительности каждого вида погоды вдоль трассы проектируемой линии:

$$\Delta P_{\text{к}} = \sum_{i=1}^4 \Delta P_{\text{к}i} \psi_i, \quad (6)$$

где ψ_i – относительная продолжительность i -й группы погоды за год;
 $\Delta P_{\text{к}i}$ – среднегодовая мощность потерь при i -й группе погоды.

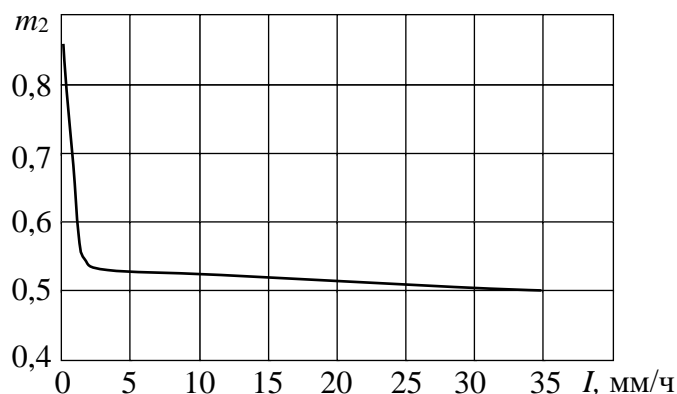


Рис. 4. Зависимость коэффициента погоды от интенсивности дождя

Из многочисленных эмпирических формул для определения мощности потерь на корону при переменном напряжении наиболее часто используют формулу Пика (7):

$$P_k = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_\phi - U_0)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км на фазу} \quad (7)$$

где f – частота, Гц;

δ – относительная плотность воздуха;

r_0 – радиус провода, см;

S – расстояние между проводами, м;

U_ϕ – действующее значение фазного напряжения, кВ;

U_0 – некоторая расчетная величина напряжения, близкая к критическому значению напряжения короны, кВ.

$$U_0 = 21,2 \cdot \delta \cdot r_0 \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \quad (8)$$

где m_1 – коэффициент гладкости провода;

m_2 – коэффициент погоды.

На рис. 5 приведены зависимости потерь на корону от отношения \bar{U}_ϕ / \bar{U}_k при неизменном значении фазового напряжения линии класса 750 кВ ($\bar{U}_\phi = 433$ кВ) и при переменной величине \bar{U}_k , откуда видно, что темп роста потерь при общей короне ($\bar{U}_\phi / \bar{U}_k > 1$) (участок 2) значительно больше, чем при местной короне (участок 1).

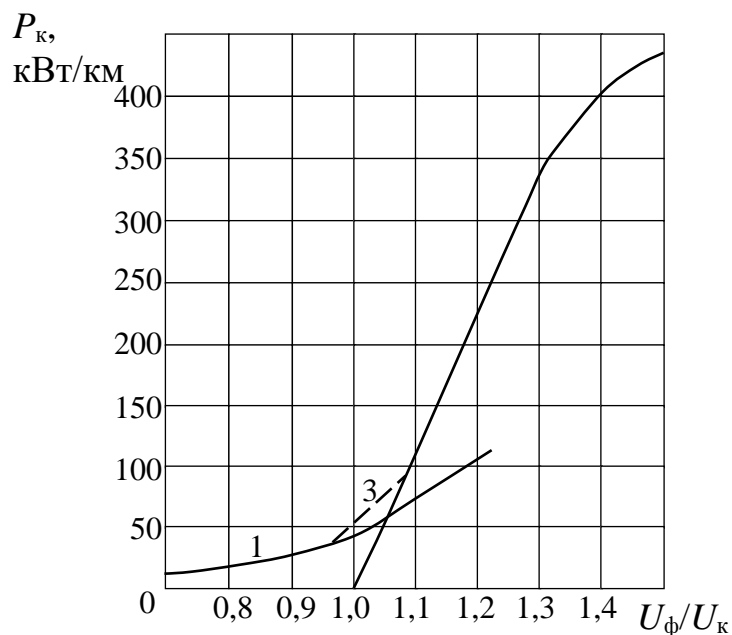


Рис. 5. Зависимость потерь на корону на линии класса 750 кВ от отношения U_ϕ/U_k :

1 – потери при местной короне; 2 – потери при общей короне; 3 – переходная область

На рис. 6 представлена схема соединений, используемая в настоящей работе.

2. Порядок работы

5. Ознакомиться с экспериментальной установкой и правилами ТБ при выполнении данной работы.
6. Определить напряжение зажигания короны для 4-х проводников различного диаметра (r_1, r_2, r_3, r_4), расположенных в цилиндре:
 - а) по кривой тока;
 - б) по вольт-амперной характеристике;
 - в) по вольт-кулоновой характеристике.
 Данные занести в табл. 1.

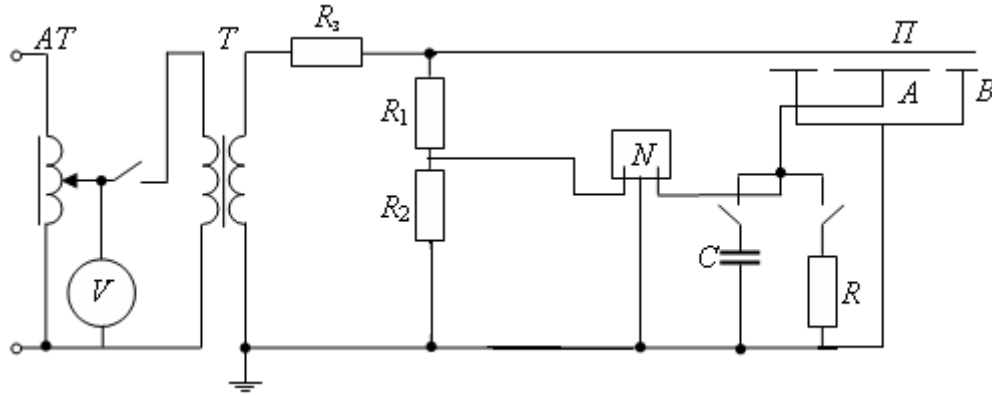


Рис. 6. Схема проведения опытов:

AT – автотрансформатор; *T* – высоковольтный трансформатор; R_3 – защитное сопротивление; R_1 – R_2 – высоковольтный омический делитель; C_1 – C_2 – высоковольтный емкостный делитель; *N* – осциллограф; *C* – емкость для снятия вольт-кулоновой характеристики; *R* – сопротивление для снятия характеристик по кривой тока и вольт-амперной характеристике; *Ц* – металлический цилиндр; *П* – провод

Таблица 1

Методика регистрации напряжения зажигания короны	Радиус провода, мм			
	$r_1=$	$r_2=$	$r_3=$	$r_4=$
По кривой тока				
По вольт-амперной характеристике				
По вольт-кулоновой характеристике				

7. Снять вольт-кулоновую характеристику (с экрана осциллографа на кальку) для одного из проводов при различных напряжениях на коронирующем проводе.

Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

Величина напряжения на коронирующем электроде U , кВ	$U_1=$	$U_2=$	$U_3=$	$U_4=$	$U_5=$
$P_{отн.ед.}$, по вольт-кулоновым характеристикам	$P_1=$	$P_2=$	$P_3=$	$P_4=$	$P_5=$

3. Содержание отчета

1. По данным п. 2 построить зависимость напряжения зажигания короны от радиуса провода.
2. По данным п. 2 построить зависимость потерь на корону от напряжения (в относительных единицах).
3. Пояснить, как влияет интенсивность осадков на потери энергии при короне.
4. Пояснить, какой благоприятный эффект оказывает корона на ЛЭП в случае возникновения волн перенапряжений.

4. Контрольные вопросы

1. Какой вид разряда представляет корона?
2. Какие неблагоприятные эффекты вызывает корона?
3. Чем определяются потери энергии при коронировании на переменном напряжении?
4. Что характеризует коэффициент гладкости провода и коэффициент погоды?
5. На какие виды делится все многообразие погодных условий?
6. Какой вид погоды вызывает наибольшие потери энергии?
7. В чем отличие потерь энергии на местную корону и общую корону?
8. Чем определяется и какова величина $U_{\text{ф}}/U_{\text{к}}$ для хорошей погоды?
9. Возможные пути снижения потерь на корону на линиях электропередачи.

6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ГИРЛЯНДЕ ПОДВЕСНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Цель работы: изучить распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов, ознакомиться с применением высоковольтной измерительной штанги.

1. Краткие сведения

На линиях электропередачи ВН для подвески проводов применяются тарелочные и стержневые изоляторы.

Тарелочные изоляторы для подвески проводов соединяются в последовательные цепочки (гирлянды).

Электрические характеристики изоляторов непосредственно зависят от размеров и формы изолирующей тарелки. Тарельчатая форма кон-

струкции подвесных изоляторов предусмотрена для увеличения пути поверхностного электрического разряда. Форма тарелки определяется требованиями к электрическим характеристикам изоляторов и технологией производства изолирующих деталей. Нижняя поверхность тарелки для

увеличения длины пути тока утечки, равной расстоянию по поверхности изолятора от одного электрода к другому, и повышения мокроразрядного напряжения выполняется ребристой. Верхняя часть тарелки имеет гладкую поверхность, наклоненную под углом $5 - 10^\circ$ к горизонтали для того, чтобы обеспечить стекание воды во время дождя.

В процессе конструирования изоляторов прежде всего обеспечивается достаточно малая вероятность его пробоя при воздействии перенапряжений различного рода. Чтобы электрический разряд обязательно проходил по поверхности изоляторов или по воздуху, отношение между пробивным напряжением и сухоразрядным напряжением изолятора должно быть не менее 1,5.

Изолирующие свойства поверхности изоляторов определяются величиной удельной поверхностной проводимости, зависящей от степени увлажнения, загрязнения и способности самоочищения. Механическая прочность изоляторов проверяется на растяжение, изгиб и сжатие.

Изоляторы должны также обладать химической стойкостью по отношению к агрессивным внешним воздействиям в виде дымов и паров, содержащих в себе кислоты и щелочи или отложения морской соли, и не разрушаться при резких изменениях температуры.

Напряжение по элементам гирлянды подвесных изоляторов распределяется неравномерно, т.е. на первом от провода элементе падение напряжения будет больше, чем на любом из следующих. При включении гирлянды изоляторов на переменное напряжение каждый элемент гирлянды можно представить некоторой емкостью $C = 50 \div 70$ пкФ (рис. 1).

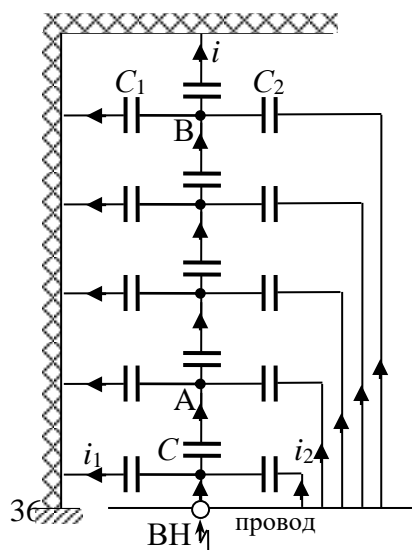


Рис. 1. Схема замещения гирлянды подвесных изоляторов

Кроме того, каждый изолятор будет обладать некоторой емкостью по отношению к земле $C_1 = 4 \div 5$ мкФ и емкостью к проводу $C_2 = 0,5 \div 1$ пкФ. Токи, идущие через емкости C_1 и C_2 , можно назвать поперечными, а ток по цепочке емкостей C – продольным током. Если наложить продольные и поперечные емкостные токи гирлянды, то нетрудно видеть, что в ближайшем к проводу узле А величина тока, ответвляющегося на землю че-

рез емкость C_1 , будет больше величины тока, протекающего от провода через емкость C_2 .

Поэтому продольный ток во втором от провода изоляторе гирлянды будет меньше продольного тока, протекающего в первом изоляторе. В последних, ближайших к траверсе, изоляторах гирлянды соотношение величины емкостных токов на землю и на провод может оказаться другим: поперечные токи на землю, оттекающие от узла В через емкость C_1 , могут оказаться меньше поперечных токов от провода через емкость C_2 ; разность их увеличит продольный ток, протекающий через емкость изолятора, ближайшего к траверсе.

Степень неравномерности распределения напряжения ΔU_i по элементам гирлянды зависит главным образом от отношения C_1/C . Чем меньше это отношение, тем, очевидно, равномерней будут нагружены изоляторы, т.е. ослабляется влияние поперечных емкостных токов гирлянды на ее продольный емкостный ток по цепочке изоляторов.

Отношение C_2/C оказывает значительно меньшее влияние на распределение напряжения по элементам из-за меньшего значения C_2 по сравнению с C_1 ; но в длинных гирляндах влияние C_2 проявляется более отчетливо, и величина ΔU_i на элементах гирлянды, ближайших к траверсе, увеличивается. Чем больше емкость C изолятора гирлянды, тем равномернее распределение напряжения по ее элементам.

Разрядные напряжения гирлянд изоляторов в загрязненном и увлажненном состоянии зависят от длины пути утечки, формы юбок, диаметра тарелки и других геометрических параметров изоляторов.

Исследования механизма разряда по загрязненной и увлажненной поверхности изоляторов показали, что разрядное напряжение гирлянды значительно повышается с увеличением пути утечки. Поэтому в современных конструкциях грязестойких изоляторов, изготавливаемых из фарфора и закаленного стекла, предусматривается повышенное отношение длины пути утечки к строительной высоте изолятора и в большинстве случаев одновременное уменьшение отношения строительной высоты к диаметру тарелки.

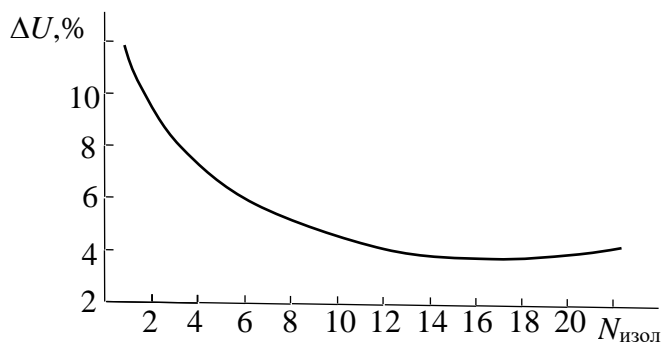


Рис. 2. Распределение напряжения (в %) вдоль гирлянды из изоляторов ПС-12 линии класса 500 кВ

На рис. 2 приведено относительное (в %) распределение напряжения вдоль гирлянды из изоляторов типа ПС-12 для линии класса 500 кВ. Видно, что наибольшее падение напряжения приходится на ближайшие к проводам изоляторы и в некоторых случаях оно может достигать значений, недопустимых для нормальной эксплуатации.

Высокие напряженности поля на изоляторах вблизи провода могут приводить к коронированию, вызывающему старение изоляционного тела изолятора, окислительные процессы на металлической арматуре и радиопомехи.

Имеется несколько путей улучшения распределения напряжения по элементам гирлянды:

- а) применяют изоляторы большой собственной емкости, например, стеклянные;
- б) используют изоляторы, покрытые полупроводящей глазурью, что увеличивает активную составляющую продольного тока гирлянды и снижает влияние поперечных емкостных токов;
- в) применяют защитную арматуру в виде экранных колец, рогов, восьмерок, которые монтируют на обоих или только на линейном конце гирлянды;
- г) расщепление фазы линии;
- д) расщепление гирлянды изоляторов;
- е) изменение расстояния от нижнего изолятора до верхних составляющих расщепленного провода.

Измерение распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов в эксплуатации производится с помощью высоковольтных контрольных или измерительных штанг. На электроды изолятора накладываются щупы, к которым подсоединен измерительный прибор или регулируемый искровой промежуток, которые крепятся на измерительной штанге. Перенося щупы штанги с одного изолятора на другой, поочередно измеряют напряжение ΔU ; на изоляторах гирлянды

Существует несколько типов штанг.

Наиболее совершенной является универсальная измерительная штанга, на конструкции которой мы остановимся подробнее, поскольку она используется в данной работе (рис. 3).

Основными элементами штанги являются: изоляционные бакелитовые свертываемые трубки 1 и 2 и измерительная головка 3. Головка штанги представляет собой короткую изоляционную трубку, на которой закреплены два съемных щупа 4. Внутри этой трубки находится сопротивление 50 МОм. На бакелитовой трубке закреплен милливольтметр. Данная штанга предназначена для контроля изоляторов. При измерении

напряжения на изоляторе переключатель прибора должен быть всегда в положении «5».

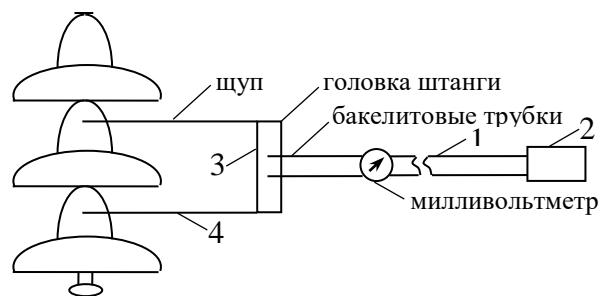


Рис. 3. Общий вид измерительной штанги

Тогда напряжение на изоляторе в кВ можно найти по уравнению (1)

$$\Delta U_i = \text{показание прибора} \times 5. \quad (1)$$

Как контрольные, так и измерительные штанги позволяют установить наличие дефектных изоляторов, но не дают точного значения падения напряжения на каждом элементе гирлянды.

Распределение напряжения вдоль гирлянды изучается экспериментально с помощью шаровых разрядников с малым диаметром шаров (чтобы емкость разрядника была значительно меньше собственной емкости изолятора).

Для контроля состояния гирлянд изоляторов могут быть использованы различные методы:

1. Распределение падения напряжения по элементам гирлянды.
2. Высокочастотная дефектоскопия.
3. Электроакустический метод.

1. Порядок работы

1. С помощью шарового разрядника исследовать распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов. Для этого шаровой разрядник укрепляется на первом от провода изоляторе и на гирлянду подается напряжение от высоковольтного испытательного трансформатора. Напряжение, подводимое к гирлянде, постепенно повышается до появления пробоя в разряднике Р. Контроль за напряжением, подводимым к гирлянде, производится по вольтметру V_2 со стороны высокого напряжения (рис. 4). У применяемого шарового разрядника нельзя изменять расстояние между шарами под напряжением и, следовательно, измерять распределение напряжения в абсолютных единицах.

Поэтому, не изменяя расстояния между шарами разрядника, следует поочередно переставлять его с первого от провода элемента до конца гирлянды, повышая напряжение, подаваемое на гирлянду, до возникновения разряда между шарами. Для каждого элемента гирлянды напряжение брать как среднее из трех значений. Результаты занести в таблицу.

Относительную величину напряжения, приходящуюся на данный элемент, можно найти по уравнению (2):

$$\Delta U'_i = \frac{\Delta U}{U_2} \cdot 100, \% , \quad (2)$$

где ΔU – пробивное напряжение на шаровом разряднике ($\text{kB}_{\text{макс}}$), определяемое по таблицам МЭК для нормальных условий;

U_2 – напряжение, подаваемое на гирлянду, измеренное вольтметром V_2 (рис. 4).

При определении напряжения с помощью шарового разрядника необходимо учесть влияние относительной плотности воздуха δ по уравнениям (3, 4):

$$\Delta U_i = \Delta U'_i \cdot \delta; \quad (3)$$

$$\delta = 0,386 \frac{P}{273 + t}, \quad (4)$$

где P – атмосферное давление в мм рт. ст.;

t – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

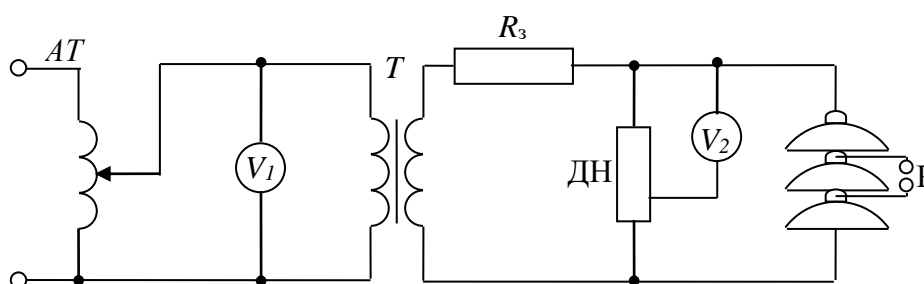


Рис. 4. Схема для изучения распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов:

AT – автотрансформатор; T – высоковольтный трансформатор; $R_{\text{защ}}$ – защитное сопротивление; V_1 и V_2 – вольтметры; P – разрядник; ДН – делитель напряжения

Критерием правильности полученных результатов является выполнение уравнения (5):

$$\sum_1^n \Delta U_i = \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где n – число элементов в гирлянде.

2. Укрепить на линейном конце гирлянды экранное кольцо и произвести измерение падения напряжения по элементам гирлянды в порядке, описанном в п. 1. Результаты занести в таблицу.

3. В порядке, изложенном в п.п. 1 и 2, измерить распределение напряжения по гирлянде с дефектным изолятором. Результаты измерений занести в таблицу.

3. Содержание отчета

1. По данным таблицы построить на одном графике три кривые относительного падения напряжения на элементах гирлянды в процентах от приложенного напряжения в зависимости от номера элемента (по пунктам 1, 2, 3): $\Delta U_i = f(i)$.

2. Определить в кВ потенциал на шапке каждого изолятора гирлянды в измерениях по п. 1. Потенциал на шапке каждого изолятора определяется по формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= U_i - \Delta U_1 \cdot U_i \\ \varphi_2 &= \varphi_1 - \Delta U_2 \cdot U_i \\ &\dots\dots\dots \\ \varphi_n &= \varphi_{n-1} - \Delta U_n \cdot U_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ – потенциалы на шапках изоляторов.

U_i – напряжение, приложенное к гирлянде (задается преподавателем или выбирается студентом).

Таблица

Номер элемента	Показания вольтметра на стороне высокого напряжения трансформатора, $U_2, \text{кВ}_{\text{макс}}$				Напряжение на элементе, $\Delta U, \text{кВ}_{\text{макс}}$ по табл. МЭК	Относительная величина напряжения на элементе, $\Delta U'_i, \%$	Относительная величина напряжения на элементе с поправкой, $\Delta U_i, \%$	Примечания
	1	2	3	среднее				
1								
...								
n								

3. По уравнению (5) проверить правильность результатов экспериментов, полученных в п. 1.
2. На основании анализа результатов сделать выводы по работе.
5. Ответить на контрольные вопросы.

4. Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на неравномерное распределение напряжения по длине гирлянды?
2. Какие недостатки следуют из неравномерного распределения напряжения по длине гирлянды?
3. Какие существуют методы регулирования распределения напряжения по длине гирлянды?
4. Почему увеличение собственной емкости изоляторов выравнивает распределение напряжения по длине гирлянды?
5. Каким образом можно уменьшить падение напряжения на первом изоляторе?
6. Какие методы применяются для контроля состояния изоляторов в гирлянде?
7. Достоинства и недостатки шарового разрядника при исследовании распределения напряжения по длине гирлянды.

7. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: знакомство с методами профилактических испытаний и приборами для испытаний изоляции высоковольтного трансформатора.

1. Краткие сведения

В процессе эксплуатации в изоляции электрических аппаратов возникают дефекты (увлажнение, загрязнение, возникновение трещин, воздушных включений и т.д.), постепенно приводящие к необратимому ухудшению свойств и характеристик изоляции, т.е. к старению изоляции.

Старение электрической изоляции может быть разделено на следующие четыре категории:

- Химическое – изменение химических свойств и структуры материала, образование новых продуктов под действием влаги, кислорода, озона и т.п.;
- Термическое – изменение свойств материала под действием высоких температур, а также вследствие местных перегревов диэлектрическими потерями;
- Механическое – потеря механической прочности под действием ударов, гололеда, динамических усилий при коротких замыканиях;
- Электрическое – уменьшение электрической прочности под действием длительно приложенного рабочего напряжения, а также от атмосферных и внутренних перенапряжений.

Процесс образования дефектов и разрушения изоляции протекает вначале весьма медленно, но на последних стадиях имеет скачкообразный характер и заканчивается пробоем изоляции.

Для характеристики состояния изоляции составляется схема замещения; отклонение в величинах тех или иных элементов схемы позволяет определить характер возникающих в изоляции дефектов при помощи различных методов профилактических испытаний. Элементарная схема замещения изоляции приведена на рис.1. Она состоит из четырех ветвей, определяющих основные характеристики изоляции.

1. $C_1 - C_0 - C_2$ – ветвь, определяющая емкость изоляции при наличии частичных разрядов; C_0 – емкость воздушного включения; C_2 – емкость той части изоляции, которая пересекается силовыми линиями, проходящими через воздушное включение; C_1 – емкость остальной части изоляции.

2. $C - R$ – ветвь, характеризующая степень неоднородности изоляции, наличие расслоений, увлажнений, загрязнений и т.д. Эта ветвь определяет начальное значение и постоянную времени спада тока абсорбции, а также диэлектрические потери в изоляции.

3. R_1 – ветвь, определяющая сопротивление изоляции постоянному току сквозной проводимости.

4. S – ветвь, определяющая разрядное напряжение изоляции. При приложении напряжения электрического поля в изоляции происходят процессы поляризации, обусловленные смещением электрических зарядов к электродам противоположных знаков. В результате этих процессов на поверхности накапливаются заряды разных знаков.

Ток, возникающий при накоплении зарядов до момента установления равновесного (установившегося) состояния, называется током абсорбции (рис. 2).

При приложении напряжения электрического поля в изоляции происходят процессы поляризации, обусловленные смещением электрических зарядов к электродам противоположных знаков. В результате этих процессов на поверхности накапливаются заряды разных знаков.

Ток, возникающий при накоплении зарядов до момента установления равновесного (установившегося) состояния, называется током абсорбции (рис. 2).

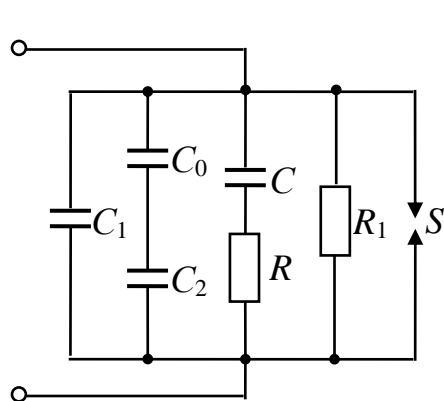


Рис. 1. Схема замещения изоляции

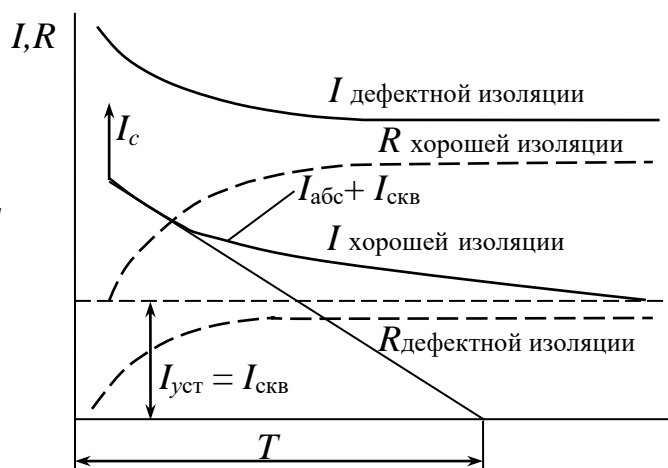


Рис. 2. Зависимость тока и сопротивления изоляции от времени приложения напряжения

Этот ток, обусловленный переходным процессом, изменяется во времени по закону

$$I_{\text{абс}} = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

где T – постоянная времени ветви $C - R$.

Помимо тока смещения I_c , протекающего в изоляции в начальный момент после включения постоянного напряжения, и тока абсорбции $I_{\text{абс}}$, в изоляции протекает ток сквозной проводимости $I_{\text{скв}}$ (ток установившегося режима), обусловленный перемещением имеющихся в диэлектрике свободных зарядов

$$I_{\text{скв}} = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

Этот ток имеет очень малую величину по сравнению с токами смещения и абсорбции.

Задачей профилактических испытаний изоляции является обнаружение и оценка степени развития дефектов в изоляции, возникающих в процессе эксплуатации оборудования. Своевременное проведение профилактических испытаний позволяет выявить различные дефекты в начальной стадии их развития, с помощью комплекса профилактических мероприятий устранить их или прекратить дальнейшее их развитие.

2. Измерение сопротивления изоляции обмоток

Сопротивление изоляции между обмотками, а также сопротивление изоляции отдельных обмоток относительно земли является одним из важнейших показателей качества изоляции трансформатора.

Сопротивлением изоляции $R_{\text{из}}$ называется отношение приложенного напряжения к данному участку изоляции постоянного напряжения U к протекающему при этом току I :

$$R_{\text{из}} = \frac{U}{I}. \quad (3)$$

Из рис. 2 видно, что ток со временем уменьшается и затем принимает установившееся значение. В практике профилактических испытаний принято сопротивление изоляции оценивать по напряжению и току, протекающему по изоляции спустя 1 мин от момента приложения напряжения. При этом ток еще не достигает установившегося значения.

Резкое уменьшение сопротивления изоляции или возрастание тока проводимости наблюдается только лишь при возрастании проводимости изоляции между электродами, т.е. метод позволяет определить распределенные дефекты, например, общее увлажнение изоляции, загрязнение поверхности, наличие сквозных проводящих каналов и т.п. С ростом температуры сопротивление изоляции уменьшается, как это видно из табл. 1.

Измерение сопротивления изоляции обмоток производят по схемам (рис. 3) с помощью мегаомметров типа МС-05, М-1101, МОМ-5 и др.

С помощью мегаомметра можно также обнаружить недоброкачественную пайку, плохие контакты, обрыв провода в обмотке (прибор показывает резкое возрастание сопротивления).

Измеренное значение $R_{из}$ сравнивают с данными табл. 1, на основании чего можно сделать вывод о качестве изоляции.

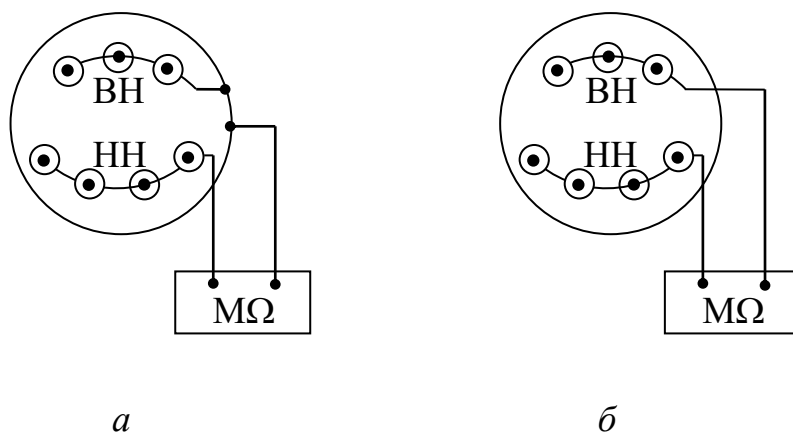


Рис. 3. Схема измерения сопротивления изоляции обмоток трансформатора:

3. Определение тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$)

Величина $\operatorname{tg} \delta$, определяющая диэлектрические потери в изоляции на переменном напряжении, является одной из самых распространенных характеристик, значение которой используется как для оценки качества электроизоляционного материала, так и для оценки состояния изоляционного изделия. Для реально используемых изоляционных конструкций величина $\operatorname{tg} \delta$ в большинстве случаев позволяет сделать вывод о причинах ухудшения изоляции из-за ее общего увлажнения или загрязнения.

При приложении к изоляции напряжения по ветвям $C - R$ и R_1 протекает абсорбционный ток и ток сквозной проводимости, вызывающие разогрев изоляции. Энергия, затрачиваемая на нагрев, получила назва-

ние диэлектрических потерь. Полный ток I , протекающий через изоляцию, сдвинут по отношению к напряжению на угол φ и раскладывается на активную I_a и реактивную I_c составляющие (рис. 4).

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ представляет собой отношение активной составляющей тока к реактивной составляющей

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c}. \quad (4)$$

Мощность потерь энергии в изоляции равна

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (5)$$

Появление в изоляции дефекта вызывает уменьшение его сопротивления и, следовательно, увеличение активного тока, реактивный ток (I_c) при этом почти не изменяется. Это вызовет увеличение $\operatorname{tg} \delta$ (рис.4).

Поскольку диэлектрические потери в изоляции зависят от геометрических размеров, то принято измерять не сами потери, а тангенс угла диэлектрических потерь, т.к. $\operatorname{tg} \delta$ – это характеристика материала, не зависящая от размеров объекта, и ее можно измерить непосредственно прибором. При этом $\operatorname{tg} \delta$ выражается в относительных единицах или в процентах.

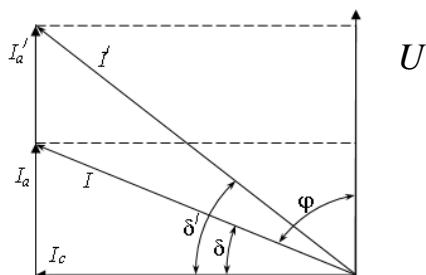


Рис. 4. Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями

Для измерения $\operatorname{tg} \delta$ применяются мосты переменного тока типа МД-16, Р-507, Р-521, Р-595, Р-5026 и др. Диэлектрические потери в изоляции обмоток трансформатора измеряют между каждой обмоткой и корпусом при заземленных свободных обмотках. Измеренные диэлектрические потери составляют сумму диэлектрических потерь твердой изоляции и масла. Допустимые значения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток трансформатора в эксплуатации приведены в табл. 2.

На рис. 5 представлена принципиальная электрическая схема измерения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции обмоток трансформатора при помощи моста переменного тока высокого напряжения.

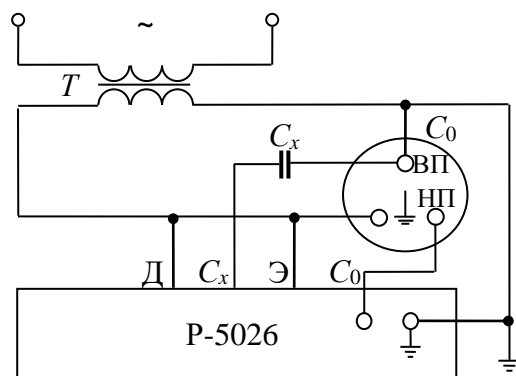


Рис. 5. Схема моста для определения тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$):

C_0 – эталонный конденсатор; C_x – испытуемый объект; T – высоковольтный трансформатор; D , C_x , \mathcal{E} , C_0 – кабели для подсоединений; $P-5026$ – мост переменного тока; $ВП$, $НП$ – высокопотенциальный и низкопотенциальный выводы

4. Определение относительной влажности изоляции

Увлажненность изоляции исследуют путем измерения емкости обмоток на двух частотах при неизменной температуре $10 - 20$ °С (метод «емкость – частота»).

Емкость объекта при неизменных температуре и частоте приложенного напряжения есть величина постоянная. При увеличении частоты емкость уменьшается. Эта зависимость является следствием процессов медленной поляризации.

При переменном напряжении процесс накопления зарядов ограничен длительностью одного полупериода напряжения. Чем выше частота, тем в меньшей степени успевают развиваться процессы поляризации, тем меньше емкость. Появление больших по объему и хорошо проводящих включений, шунтирование или пробой изоляции увеличивают разность емкостей при низких и высоких частотах.

Большое влияние на зависимость емкости от частоты оказывает увлажненность изоляции. Чем больше увлажнена изоляция, тем быстрее протекают процессы поляризации, тем больше емкость изоляции. Изменение емкости для увлажненной изоляции с ростом частоты носит круто падающий характер (рис. 6, кривая 2).

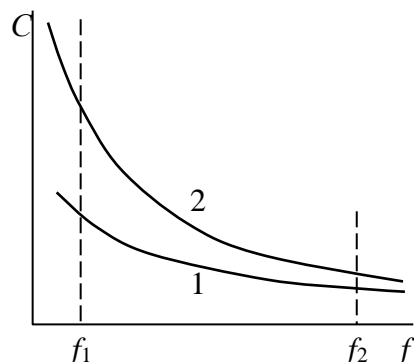


Рис. 6. Зависимость емкости изоляции от частоты:
1 – сухая изоляция; 2 – увлажненная изоляция

В сухой изоляции поляризация протекает медленнее, длительность процессов больше полупериода приложенного напряжения.

Поэтому у сухой изоляции емкость меньше, чем у влажной во всем диапазоне частот, а характер изменения ее от частоты носит более плавный характер (рис. 6, кривая 1).

Указанные дефекты приводят к тому, что отношение емкостей увлажненной изоляции при двух разных частотах существенно больше, чем у сухой изоляции, на чем и основан принцип оценки степени

увлажненности изоляции.

ГОСТом предусмотрено проведение измерений при двух частотах: 2 Гц и 50 Гц.

Для волокнистых органических материалов степень увлажнения является недопустимой (опасной), если отношение величин емкости изоляции при вышеуказанных частотах $\frac{C_2}{C_{50}} \geq 1,2 - 1,3$. Схема прибора кон-

троля изоляции по методу «емкость – частота» представлена на рис. 7 (прибор типа ПКВ-7, ПКВ-13).

С помощью переключателя П образец C_x периодически подключается к источнику постоянного напряжения U_0 (C_x заряжается), а затем к цепи с гальванометром Г (C_x разряжается).

Ток I , протекающий в разрядной цепи через гальванометр, пропорционален емкости образца при заданной частоте, т.е. $I_f = U_0 \cdot C_f \cdot \omega$. Тогда отношение емкостей при заданных частотах переключателя

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50}{2} \cdot \frac{I_2}{I_{50}}. \quad (6)$$

Измерение емкости производят при помощи приборов контроля влажности типа ПКВ-13, ПКВ-7 (рис. 8).

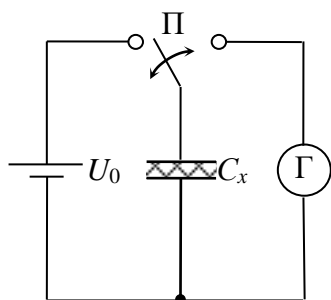


Рис. 7. Упрощенная схема прибора контроля влажности изоляции по методу «емкость – частота»

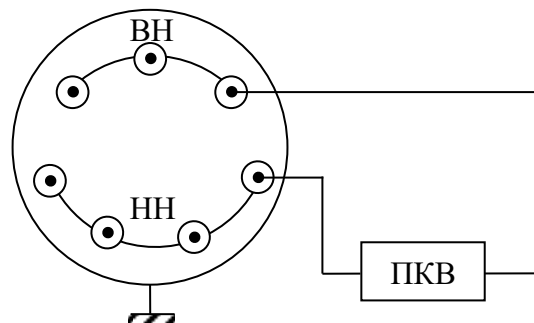


Рис. 8. Схема измерения увлажненности изоляции обмоток трансформатора

3. Испытание пробы масла

Отбор масла из трансформатора и его испытание позволяет оценить состояние самого масла и в некоторой степени состояние остальной изоляции, находящейся в масле.

Трансформаторное масло, находясь в соприкосновении с окружающим воздухом, активно поглощает из него влагу и окисляется кислородом и озоном, что уменьшает его электрическую прочность. Кроме того, влага в масле легко переходит в гигроскопические материалы изоляции (бумажная и картонная изоляция), снижая ее электрическую прочность.

Для испытания масла на пробой используют специальные аппараты типа АИИ-70, АМИ-90.

Аппарат АИИ-70 имеет фарфоровый сосуд емкостью 0,5 л. В нем укреплены латунные электроды диаметром 25 мм на расстоянии друг от друга 2,5 мм. Уровень залитого в сосуд масла должен быть не меньше, чем на 15 мм выше верхнего края электрода.

Пробой отмечается по образованию в масле между электродами сплошной искры и по спаданию до нуля стрелки вольтметра. Затем напряжение снижают и дают маслу отстояться в течение 1 мин. Такие пробы делают 5 раз и затем берут среднее арифметическое значение пробивного напряжения.

Электрическая прочность трансформаторного масла, заливаемого в электрооборудование, определяется классом номинального напряжения: при $U_n = 15$ кВ и ниже $U_{пр} = 25$ кВ, при $U_n = 15-35$ кВ – $U_{пр} = 30$ кВ, при $U_n = 60 \div 220$ кВ – $U_{пр} = 40$ кВ, при $U_n = 330$ кВ – $U_{пр} = 50$ кВ.

6. Испытание электрической прочности изоляции обмоток трансформатора повышенным напряжением

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты является заключительным этапом профилактических испытаний изоляции трансформатора. Оно проводится с целью определения запаса электрической прочности изоляции, а также для обнаружения дефектов, не выявленных с помощью предыдущих испытаний.

Величина испытательного напряжения определяется из учета возможных внутренних и атмосферных перенапряжений в действующих установках. Приложение повышенного напряжения создает в испытываемой изоляции увеличенную, по сравнению с рабочей, напряженность электрического поля, что позволяет обнаруживать дефекты в изоляции, вызывающие снижение электрической прочности.

Величина пробивного напряжения изоляции зависит от времени приложения напряжения, поэтому испытательное напряжение прикладывается в течение 1 мин. Более длительное приложение напряжения может вызвать тепловой пробой и при отсутствии дефектов. Изоляция считается выдержавшей испытание, если не было слышно разрядов или колебания стрелки вольтметра и амперметра не указали на наличие разрядов.

Испытанию электрической прочности изоляции повышенным напряжением подвергаются обмотки напряжения по схеме, приведенной на рис. 9.

Один вывод испытательного трансформатора заземляют. Согласно ГОСТ 1516 –76 скорость подъема напряжения до 40 % испытательного может быть произвольной. Затем подъем напряжения производят со скоростью около 30 % от испытательного в 1 с. Напряжение выдерживают в течение 1 мин и затем снижают.

7. Порядок работы

1. Измерить сопротивление изоляции обмоток трансформатора мегаомметром МС-05 или Ф4102/2.
2. Определить увлажненность изоляции методом «емкость – частота» прибором контроля влажности ПКВ-7.
3. Определить тангенс угла диэлектрических потерь прибором Р-5026.
4. Определить электрическую прочность масла прибором АИМ-90.

5. Провести испытание обмоток трансформатора повышенным напряжением промышленной частоты.

Примечание. Всем измерениям должно предшествовать ознакомление с описаниями и схемами применяемых приборов.

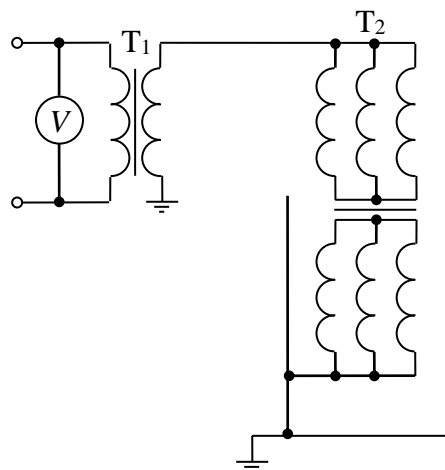


Рис. 9. Электрическая схема испытания изоляции повышенным напряжением:

T_1 – испытательный трансформатор; T_2 – испытуемый трансформатор;
 V – вольтметр

8. Содержание отчета

1. Привести схемы включения приборов, используемых в измерениях.
2. Результаты измерений по пунктам 1 – 3 и 5 занести в табл. 4, а результаты испытаний, полученные при исследовании электрической прочности масла, занести в табл. 5.
3. Сделать соответствующие выводы о качестве изоляции испытуемого трансформатора на основе измерений по пунктам 1 – 5.

Таблица 1

Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции обмоток трансформатора, МОм

Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Температура обмотки, °C			
	10	20	30	40
до 10 кВ	2150	1000	570	240
35 кВ	3250	1700	810	450

Таблица 2

$$t\delta = f(T, ^\circ C), \%$$

Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Температура обмотки (градусы)					
	10	20	30	40	50	60
35 кВ и ниже	2,5	3,5	5,5	8,0	11	15

Таблица 3

Величины испытательных напряжений в эксплуатации, кВ

Вид испытания	Номинальное напряжение, кВ							
	3	6	10	20	35	60	80	110
Испытательное напряжение, кВ	15	21	30	47	72	105	140	195

Таблица 4

Результаты испытаний изоляции трансформатора

Вид испытания	Обмотка ВН		Обмотка НН		Между обмотками	
	опытное	контрольное	опытное	контрольное	опытное	контрольное
Сопротивление изоляции, МОм						

Таблица 5

Испытание масла

№ опыта	1	2	3	4	5	среднее
Пробивное напряжение, кВ						

9. Контрольные вопросы

1. В чем суть профилактических испытаний изоляции?
2. Какие мероприятия необходимо провести после того, как изоляция забракована по одному или нескольким показателям качества?
3. Какое влияние могут оказать воздушные включения на сопротивление и $\text{tg } \delta$ изоляции?
4. Как изменится $\text{tg } \delta$ при увлажнении изоляции? Дать объяснения.
5. Объяснить увеличение емкости изоляции при ее увлажнении.
6. С какой целью производится испытание изоляции электрооборудования высоким напряжением?

8. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: исследование перенапряжений в обмотках трансформатора, возникающих при воздействии на него импульсных волн.

1. Основы теории волновых процессов в обмотках трансформаторов

Волны грозового происхождения, набегающие по линии электропередачи на подстанцию, приводят к возникновению импульсных напряжений, воздействующих на обмотки трансформаторов. В трансформаторе под действием напряжения возникает сложный электромагнитный процесс, приводящий к перенапряжениям между катушками и между обмотками и заземленными частями.

Суммарная длина проводов в обмотках трансформаторов высокого напряжения достигает нескольких километров, поэтому при включении толчком к источнику напряжения в обмотке возникают волновые процессы, имеющие аналогию с волновыми процессами в линиях электропередачи. Схема замещения обмотки трансформатора, даже если опустить в ней активные сопротивления и проводимости, значительно сложнее схемы замещения линии. На рис. 1, б представлена схема замещения для однофазной катушечной обмотки.

Вследствие того, что провод обмотки навивается вокруг магнитопровода, появляются два дополнительных параметра схемы замещения: емкость между соседними витками или катушками K (продольная емкость) и взаимная индуктивность $M(x)$ каждого витка со всеми остальными витками обмотки.

Как правило, под величинами L , C , K понимают *средние значения индуктивности, емкости относительно земли и продольной емкости на единицу длины обмотки*. Представляют трансформатор в виде схемы с распределенными параметрами.

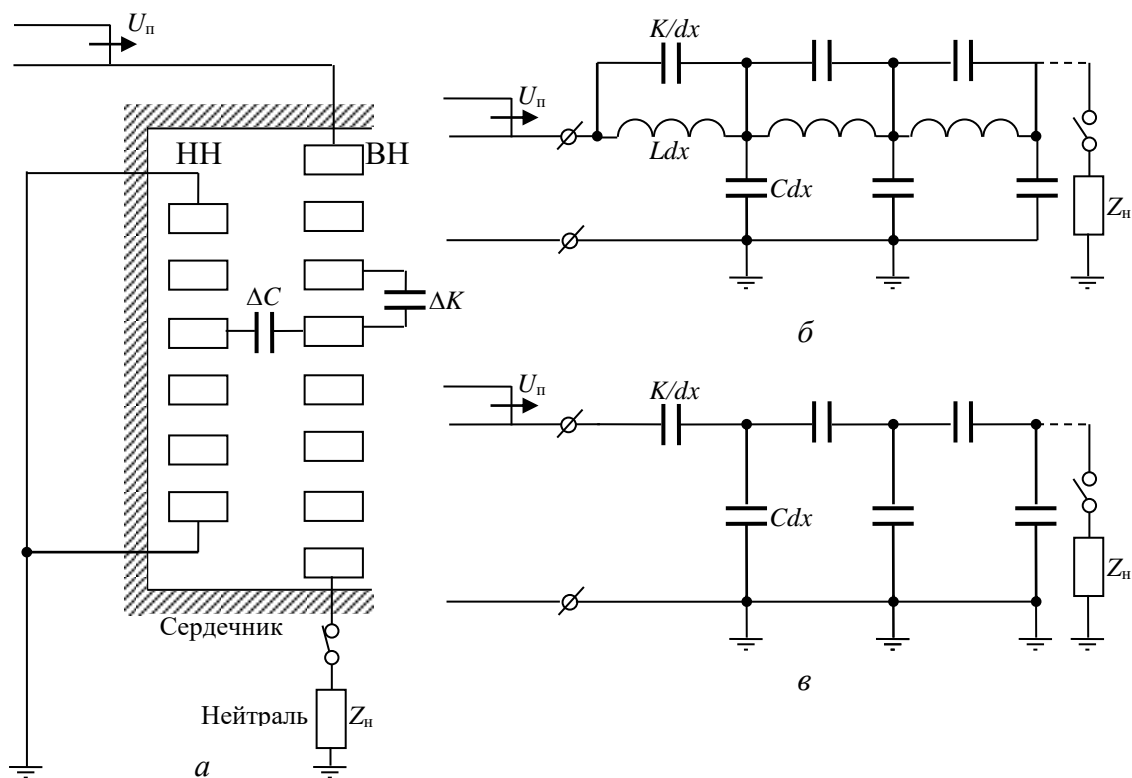


Рис. 1. Схема замещения однофазной катушечной обмотки:

а – взаимное расположение обмоток и магнитопровода; *б* – схема с распределенными параметрами; *в* – схема замещения в начальном режиме

Это является определенным приближением, так как в действительности схема замещения трансформатора должна была бы представлять цепочку с ограниченным числом элементов, равным числу витков обмотки.

Наибольшие трудности, которые встречаются при анализе переходных процессов в обмотках трансформаторов, связаны с правильным учетом взаимоиндукции, который осуществлен в достаточно полном виде только в самое последнее время. При этом требуется решение системы интегрально-дифференциальных уравнений. Так как такой анализ весьма сложен, мы ограничимся качественным рассмотрением переходных процессов в трансформаторах.

Импульс $U_{\text{п}}$, воздействующий на одну из обмоток трансформатора, приводит к возникновению в трансформаторе электромагнитного поля, связанного со всеми обмотками.

В условиях эксплуатации обмотки низкого напряжения, как правило, приключены к отходящим кабельным или воздушным линиям. Учитывая, что в большинстве случаев волновое сопротивление обмоток

трансформатора (тысячи – десятки тысяч Ом) во много раз больше волнового сопротивления линий электропередачи (десятки – сотни Ом), будем считать обмотку низкого напряжения закороченной и заземленной.

Протекание электромагнитного переходного процесса в трансформаторе зависит от ряда факторов: схемы соединения обмоток, режима работы нейтрали, конструкции обмоток, падения волн по одной, двум или трем фазам присоединенной ЛЭП. Рассмотрим вначале основные закономерности переходных процессов в трансформаторах на простейшей однофазной схеме катушечной обмотки для случая падения на нее прямоугольной бесконечно длинной волны.

Весь электромагнитный процесс разобьем на три стадии:

- а) начальный процесс $t = 0$;
- б) установившийся режим $t \rightarrow \infty$;
- в) переходный процесс (свободные колебания) $0 < t < \infty$.

2. Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора

В первый момент времени, благодаря большой крутизне фронта волны (эквивалентной высокой частоте), индуктивность обмотки не пропускает ток, поэтому распределение напряжений по обмотке при $t = 0$ будет определяться только емкостными элементами C и K . Схема замещения обмотки трансформатора для этого момента времени представлена на рис.1, в.

При падении на эту схему бесконечно длинной прямоугольной волны напряжение вдоль обмотки трансформатора может быть представлено в виде:

для заземленной нейтрали:

$$U_{\text{нач}} = U_{\text{п}} \frac{e^{al(-x/l)} - e^{-al(1-x/l)}}{e^{al} - e^{-al}}, \quad (1)$$

для изолированной нейтрали:

$$U_{\text{нач}} = U_{\text{п}} \frac{e^{al(1-x/l)} + e^{-al(1-x/l)}}{e^{al} + e^{-al}}. \quad (2)$$

Из этих формул видна большая роль параметра:

$$\alpha l = l \sqrt{\frac{C}{K}} = \sqrt{\frac{C \cdot l}{K/l}} = \sqrt{\frac{C_{об}}{K_{об}}}, \quad (3)$$

который определяется отношением суммарной емкости обмотки относительно земли к суммарной продольной емкости (т. е. емкости между крайними витками обмотки).

Для современных трансформаторов среднее значение $\alpha l_{ср} \approx 10$ и во всяком случае $\alpha l > 5$. Поэтому в формулах (1) и (2) всегда $e^{\alpha l} \gg e^{-\alpha l}$.

Для большей части обмотки ($l < 0,8$) справедливо также неравенство $e^{\alpha l(1-x/l)} \gg e^{-\alpha l(1-x/l)}$. Поэтому для значительной части обмотки, примыкавшей к началу, распределение напряжения практически одинаково как для изолированной нейтрали, так и для заземленной нейтрали и приближенно может быть выражено формулой

$$U_{нач} = U_{п} \cdot e^{-\alpha l(x/l)}. \quad (4)$$

На рис. 2, *a* показано начальное распределение напряжения, построенное для частного случая $\alpha l = 5$. В начальный момент времени напряжение прикладывается в основном к первым элементам обмотки и распределение напряжения вдоль обмотки крайне неравномерно.

В связи с этим изоляция между первыми витками и первыми катушками обмотки выполняется обычно с повышенной прочностью. Как показывает опыт эксплуатации, у таких трансформаторов не исключена возможность пробоя продольной изоляции в других частях обмотки. Это объясняется тем, что наряду с рассмотренными градиентными перенапряжениями в начале обмотки при $t = 0$, имеют место градиентные перенапряжения в других частях обмотки в течение переходного режима при $t > 0$.

3. Установившееся распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора

В принужденном режиме через обмотку протекает «сквозной» принужденный ток $i_{пр}$. Емкостные токи равны нулю. Напряжения на витках определяются ЭДС, наводимой в витках суммарным магнитным потоком. Поскольку обмотка однородна, то распределение напряжения по виткам равномерно и зависит от режима нейтрали.

В случае заземленной нейтрали напряжение $U_{пр}$ равномерно падает от $U_{п}$ на входе до нуля на нейтрали (рис. 2, *a*), что может быть выражено уравнением

$$U_{\text{пр}(x)} = U_{\text{п}}(1-x/l). \quad (5)$$

Для изолированной нейтрали $i_{\text{пр}} = 0$ и, следовательно, принужденное распределение напряжения выражается линией, параллельной оси абсцисс (рис. 2, б). Принужденное распределение напряжения является осью свободных колебаний, развивающихся в обмотке.

4. Свободные колебания обмотки

Как видно из изложенного, в каждой точке обмотки имеется определенное несоответствие между значением напряжения в момент $t = 0$ и напряжением в установившемся режиме. Это несоответствие и является причиной возникновения свободных колебаний обмотки, связанных с прохождением тока в схеме замещения трансформатора. Схема замещения трансформатора представляет собой сложную колебательную систему, обладающую спектром собственных частот $\omega_1 - \omega_{\infty}$, а напряжение

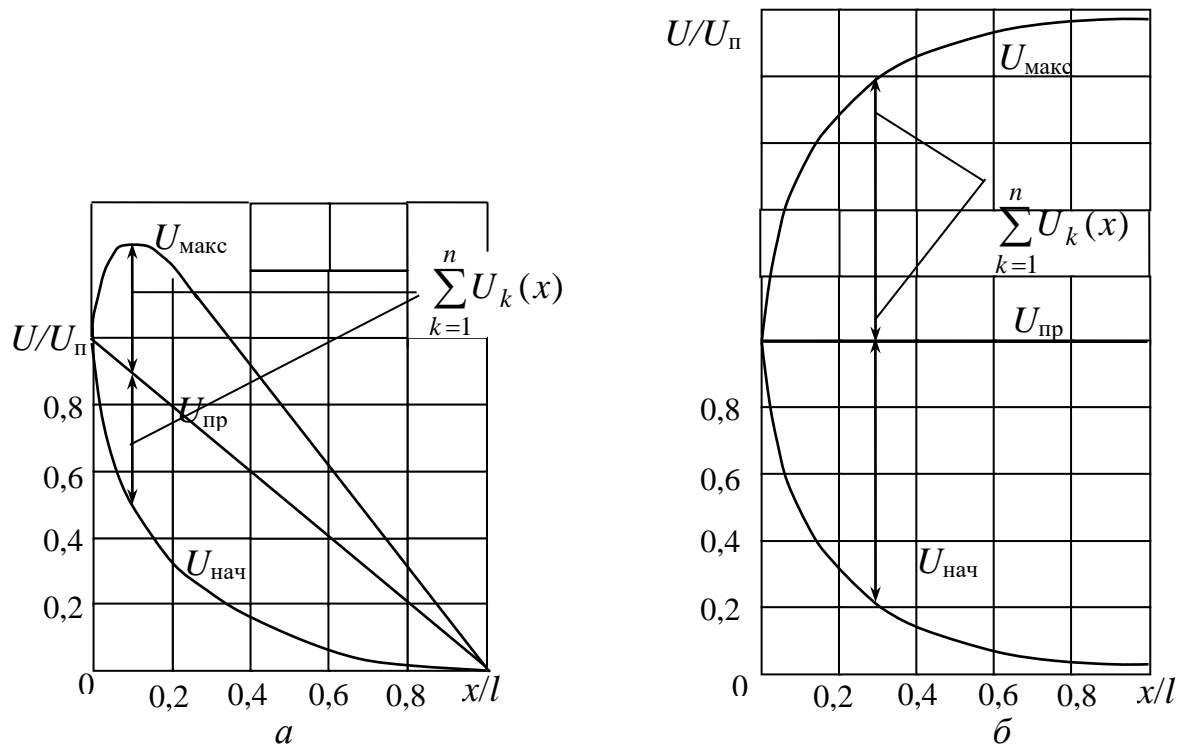


Рис. 2. Распределение напряжения по обмотке трансформатора в начальном, принужденном режимах и в режиме свободных колебаний

в произвольной точке X обмотки в произвольный момент времени t может быть представлено в виде

$$U_{(k,t)} = U_{\text{пр}(x)} + \sum_{k=1}^n U_{k(x)} \cdot \text{Cos}\omega_{kt}, \quad (6)$$

где U_k – амплитуда колебаний k -й гармоники.

Колебания обмотки имеют характер стоячих волн, амплитуда которых зависит от номера гармоники и тем быстрее уменьшается по величине, чем выше номер гармоники.

Поскольку колебания происходят вокруг установившегося режима, то в обмотке в переходном режиме могут быть достигнуты максимальные потенциалы, равные

$$U_{\text{макс}(x)} = U_{\text{пр}(x)} + \sum_{k=1}^n U_{\text{кол}(x)}, \quad (7)$$

где $\sum_{k=1}^n U_{\text{кол}(x)}$ – свободная составляющая колебаний, определяемая как сумма ординат всех гармоник в данной точке обмотки.

Максимальные потенциалы вдоль обмотки описываются огибающей максимальных потенциалов и величина их зависит от режима нейтрали.

При заземленной нейтрали трансформатора наибольший потенциал не превышает $(1,2 - 1,3)U_{\text{п}}$ и приходится на начальные витки обмотки (рис. 2, а).

При изолированной нейтрали трансформатора наибольшее напряжение в переходном режиме появляется на конце обмотки и приближается к $2U_{\text{п}}$ (рис. 2, б).

1. Особенности волновых процессов в трехфазных трансформаторах

Рассмотренные выше закономерности относятся к симметричным воздействиям волн на все три фазы, когда они соединены в звезду. Реальные условия исключают такую симметрию. Для трансформатора с заземленной нейтралью при несимметричных воздействиях волн анализ процессов не отличается от рассмотренных ранее, т. к. фазы независимы друг от друга. В трехфазном трансформаторе с изолированной нейтралью распределение потенциалов определяется несколько иначе. Рассмотрим 2 случая.

1. Воздействие волн на 1 фазу.
2. Воздействие волн на 2 фазы.

В обоих случаях начала свободных фаз подключены к проводу линии электропередачи, следовательно, начала их можно считать заземленными, т. к. волновые сопротивления проводов пренебрежимо малы по сравнению с волновыми сопротивлениями фаз трансформатора.

Таким образом, распределение потенциалов вдоль обмотки в начальном, переходном и установившемся режимах осуществляется также, как и для трансформатора с заземленной нейтралью. Особенность состоит в том, что в этих случаях трансформатор имеет как бы удлиненную неоднородную обмотку, последовательно соединенную из одной фазы и двух параллельно сложенных фаз. Поэтому нейтраль трансформатора будет находиться под напряжением, достигающим в первом случае $\sim 1/3U_{\text{п}}$, а во втором случае – $\sim 2/3U_{\text{п}}$.

Представляет интерес распределение напряжения по обмотке трансформатора при соединении фаз в треугольник и при падении волны по двум или по трем фазам (рис.3, а). Величины потенциалов вдоль обмотки в этих случаях определяются наложением кривых распределения напряжения от волн в начале и в конце фазы (рис.3, б). Максимальные потенциалы, достигающие 200% по сравнению с $U_{\text{п}}$, возникают в середине

фазы. Если мысленно рассечь фазу пополам, то процессы в каждой половине обмотки соответствуют режиму однофазной обмотки с изолированной нейтралью.

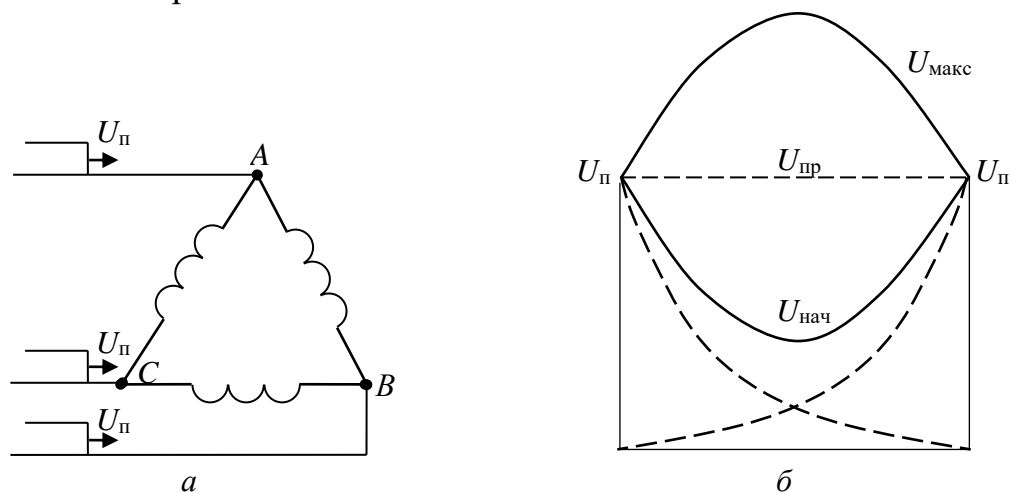


Рис . 3. Распределение потенциалов в обмотке трансформатора, соединенного в треугольник при симметричном падении волн:
 а – падение волн по трем фазам обмотки, соединенных в треугольник;
 б – распределение напряжения в одной из фаз

В настоящей работе исследование волновых процессов в обмотках трансформатора производится на установке, которая включает в себя:

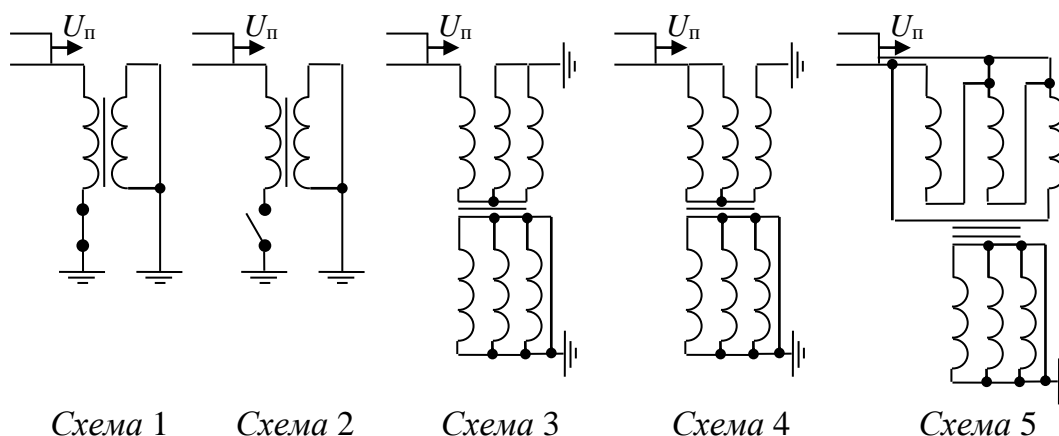
1. Источник прямоугольных импульсов с амплитудой 100 В, регулируемой длительностью (10 – 80 мкс) и фронтом 0,2; 15 и 40 мкс. Частота следования импульсов – 50 импульсов в секунду.
2. Трехфазный трансформатор с катушечными обмотками, причем начало и конец каждой катушки выведены на специальную панель.
3. Осциллограф со ждущей разверткой
4. Набор соединительных проводов.

6. Порядок работы

1. Ознакомиться с испытательной установкой.
2. Используя схемы 1 – 5, определить с помощью осциллографа распределение напряжения по обмотке трансформатора в начальном ($U_{нач}$) и в переходном режиме ($U_{макс}$). Результаты измерений занести в табл.1.

Таблица 1

x/l	0	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6	7/6	8/6	9/6	10/6	11/6	12/6	Схема
$U_{нач}$														
$U_{макс}$														



7. Содержание отчета

1. Привести схему замещения обмотки трансформатора.
2. Привести экспериментальные схемы и графики распределения напряжения $U_{нач}$, $U_{макс}$ (табл.1).
3. На графиках 1– 5 привести теоретические кривые $U_{пр}$ и $U_{макс}$.
4. Дать анализ полученных результатов:

- а) влияние режима нейтрали и схемы соединения обмоток на перенапряжения в обмотках;
 - б) сравнить теоретические и экспериментальные кривые $U_{\text{макс}}$;
5. Ответить на контрольные вопросы.

8. Контрольные вопросы

1. Почему начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора весьма неравномерно?
2. Какая изоляция трансформатора подвержена воздействию перенапряжений в начальной стадии переходного процесса?
3. Какие меры можно предложить для выравнивания распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора в начальной стадии переходного процесса?
4. Как найти максимальные потенциалы вдоль обмотки, имея начальное и установившееся распределение напряжения?
5. Как защитить изоляцию изолированной нейтрали трансформатора от опасных перенапряжений?

Литература:

1. Техника высоких напряжений /И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова и др.; под редакцией Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, 2003.- 608с.
2. Техника высоких напряжений /под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. – 700 с.
3. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения/ перевод с немецкого М. Байер, В. Бек и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
4. Техника высоких напряжений /под ред. М.В. Костенко. –М.: Высшая школа. 1973. – 528 с.
5. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
6. Техника высоких напряжений /под ред. Д.В. Разевига. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
7. Баженов С.А., Воскресенский В.Ф. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.

8. ГОСТ 1516.3 – 96. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
9. ГОСТ 1516.2 – 76. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.
10. Ашнер А.М. Получение и измерение импульсных высоких напряжений. – М.: Энергия, 1979. – 120 с.
11. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1983. – 262 с.
12. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – Л.: Энергия, 1980. – 136 с.
13. Болотин И.Б., Эйдель Л.Э. Измерения в переходных режимах короткого замыкания. – Л.: Энергия, 1981. – 192 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Амплитудные значения разрядного напряжения шаровых измерительных разрядников для нормальных условий (один шар заземлен)

Таблица 1

50 %-е разрядное напряжение для переменных синусоидальных и полных стандартных импульсов отрицательной полярности, кВ

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см				
	2	5	12,5	25	50
0,05	2,8				
0,10	4,7				
0,15	6,4				
0,20	8,0	8,0			
0,25	9,6	9,6			
0,30	11,2	11,2			
0,40	14,4	14,3			
0,50	17,4	17,4	16,8		
0,60	20,4	20,4	19,9		
0,80	25,8	26,3	26,0		
0,90	28,3	29,2	28,9		
1,0	30,7	32,0	31,7	31,7	

1,2	(35,1)	37,6	37,4	37,4	
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	
1,5	(40,0)	45,5	45,5	45,5	
1,6		48,1	48,1	48,1	
1,8		53,0	53,5	53,5	
2,0		57,5	59,0	59,0	59,0
2,2		61,5	64,5	64,5	64,5
2,4		65,5	70,0	70,0	70,0
2,6		(69,0)	75,0	75,5	75,5
2,8		(72,5)	80,0	81,0	81,0
3,0		(75,5)	85,0	86,0	86,0
3,5		(82,5)	97,0	99,0	99,0
4,0		(88,5)	108	112	112
4,5			119	125	125

Продолжение табл. 1

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см				
	2	5	12,5	25	50
5,0			129	137	138
5,5			138	149	151
6,0			146	161	164
6,5			(154)	173	177
7,0			(161)	184	189
7,5			(168)	195	202
8,0			(174)	206	214
9,0			(185)	226	139
10			(195)	244	263

Таблица 2

50% - е разрядное напряжение для переменных синусоидальных и
полных стандартных импульсов положительной полярности, кВ

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см				
	2	5	12,5	25	50
0,30	11,2	11,2			
0,40	14,4	14,3			
0,50	17,4	17,4	16,8		
0,60	20,4	20,4	19,9		
0,70	23,2	23,4	23,0		

0,80	25,8	26,3	26,0		
0,90	28,3	29,2	28,9		
1,0	30,7	32,0	31,7	31,7	
1,2	(35,1)	37,8	37,4	37,4	
1,4	(38,5)	43,3	42,9	42,9	
1,5	(40,0)	46,2	45,5	45,5	
1,6		49,0	48,1	48,1	
1,8		54,5	53,5	53,5	
2,0		59,5	59,0	59,0	59,0
2,2		64,0	64,5	64,5	64,5
2,4		69,0	70,0	70,0	70,0
2,6		(73,0)	75,5	75,5	75,5
2,8		(77,0)	80,5	81,0	81,0

Продолжение табл.2

Расстояние между ша- рами, см	Диаметр шаров, см				
	2	5	12,5	25	50
3,0		(81,0)	85,5	86,0	86,0
3,5		(90,0)	98,0	99,0	99,0
4,0		(97,5)	110	112	112
4,5			122	125	125
5,0			134	138	138
5,5			145	151	151
6,0			155	163	164

Таблица 3

50 % -е разрядное напряжение для постоянного,
переменного и импульсных напряжений, кВ

Расстояние между шарами, см	Диаметр шаров, см			Расстояние между шарами	Диаметр шаров, см	
	2	5	12,5		5	12,5
1	2	3	4	5	6	7
0,2	8,2	8,0	-	2,5	69,4	72,6
0,3	11,6	-	-	3,0	79,3	85,4
0,4	14,9	14,3	-	3,5	88,3	97,7
0,5	18,1	-	16,7	4,0	96,4	100
0,6	21,2	20,4	-	4,5	-	121

0,7	24,1	-	-	5,0	-	132
0,8	26,9	26,4	-	5,5	-	142
0,9	29,5	-	-	6,0	-	152
1,0	32,0	32,2	31,5	6,5	-	161
1,4	41,2	43,3	-	7,0	-	170
1,5	-	-	45,7	7,5	-	179