

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского  
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 17:31:57

Уникальный программный ключ:  
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «Техника высоких напряжений»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

## Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	3
1.	Практическая работа №1 Характеристики электрического поля и общий метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов	4
2.	Практическая работа №2 Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов	15
3.	Практическая работа №3 Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей	29
4.	Практическая работа №4 Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде	40
5.	Практическая работа №5 Основные формы разрядов в газах и их использование	51
6.	Практическая работа №6 Перекрытие твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности	71
7.	Практическая работа №7 Тепловой и электрической пробой	79
8.	Практическая работа №8 Расчет заземляющих устройств	85
9.	Практическая работа №9 Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты	92

## **Введение**

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «Техника высоких напряжений», использование специального лабораторного оборудования и технических средств. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

## ***Практическая работа №1***

***Тема:*** Характеристики электрического поля и общий метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов

***Цель:*** Изучить метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– характеристики электрического поля

***уметь:***

– проводить расчет емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости расчета емкости и напряженности электрического поля.

***Теоретическая часть:***

Напряжённость электрического поля ( $E$  В/м) есть векторная величина, определяемая отношением силы, действующей в поле на электрический заряд, к величине заряда. Под действием напряжённости может происходить пробой или перекрытие изолирующей среды.

Вектор напряжённости электрического поля на границе раздела двух изолирующих сред при переходе в смежную среду преломляется, раскладываясь на нормальную ( $E_n$ ) и тангенциальную ( $E_t$ ) составляющие.

Потенциал электрического поля ( $\phi$ ) является скалярной величиной. Точки электрического поля имеют положительный, отрицательный или нулевой потенциалы.

Положительный потенциал данной точки электрического поля равен энергии, которую приобретает единичный положительный заряд при его перемещении внешними силами из точки с нулевым потенциалом в данную точку против действия сил электрического поля.

Нулевым потенциалом условно обладают точки, удалённые в бесконечность от заряда или заземлённые.

Отрицательный потенциал характеризует расход энергии поля на перемещение единичного положительного заряда из точки с нулевым потенциалом в данную точку по направлению действия сил электрического поля.

Точки электрического поля, имеющие одинаковый потенциал, образуют эквипотенциальные поверхности.

Разность потенциалов двух точек электрического поля называется напряжением  $U$  между этими точками и измеряется в вольтах:

$$U = \phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi$$

Из определения потенциала как энергии единичного заряда, внесённого в данную точку поля, следует, что разность потенциалов между двумя точками поля  $\Delta\phi$  есть приращение или убыль этой энергии. Для заряда, по величине отличного от единицы, это приращение энергии можно рассматривать как работу  $\Delta A$ , произведенную силой  $qE$  на отрезке пути  $\Delta a$ .

При совпадении направления действия силы  $qE$  с направлением перемещения заряда работа отрицательна, т. е. производится за счёт сил поля, а при несовпадении — работа положительна, так как производится за счёт внешних сил:

$$-A = qE\Delta a$$

Отсюда может быть получена математическая связь между потенциалом и напряжённостью:

$$-d\varphi = -\frac{dA}{a} = E da$$

Или

$$E = -\frac{d\varphi}{da} [\text{В/М}]$$

Используя зависимость (1), дадим новое определение напряжённости: напряжённость электрического поля есть скорость убывания (знак минус) потенциала по направлению силовых линий поля.

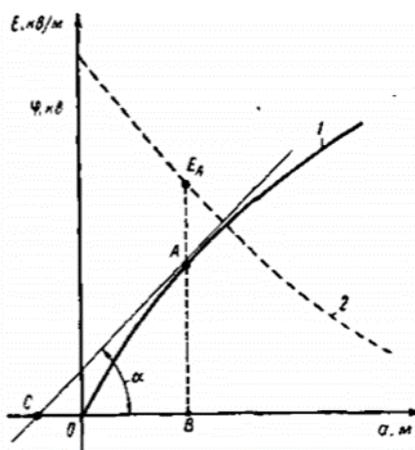


Рисунок 1.1 – Графическая связь между потенциальной кривой и кривой напряженности

Пусть изменение потенциала между какими-либо точками электрического поля изображено графически (рис. 1.1), В этом случае величина напряжённости электрического поля, выраженная зависимостью 1), приобретает геометрический смысл и может быть определена, как тангенс угла наклона  $\text{tg } \alpha$  касательной к потенциальной кривой 1 в точке касания А, с учётом масштабов потенциала и перемещения там(мм.). Математически напряжённость электрического поля для точки А (на кривой 2) выразится

$$E = \left| \frac{d\varphi}{da} \right| = \lim \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta a} \right| = \lim \frac{m_\varphi AB}{m_a BC} = \frac{m_\varphi}{m_a} \text{tg } \alpha$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{AB}{BC}, \quad AB = \frac{\Delta\varphi}{m_\varphi}, \quad BC = \frac{\Delta a}{m_a}$$

Допустим, что характер изменения потенциала в изолирующей среде задан графически. Тогда, используя формулу, по точкам строим кривую изменения напряжённости электрического поля.

С другой стороны, из соотношения имеем  $d\varphi = -E da_1$ , откуда по заданной аналитической зависимости изменения напряжённости электрического поля  $E = f(a)$  получим потенциал в

любой точке электрического

поля, суммируя произведения напряжённости электрического поля на бесконечно

малые приращения координаты движущейся точки на участке от бесконечности до заданной:

$$\varphi_a = - \int_{\infty}^a E da = \int_a^{\infty} E da [\text{В}]$$

В соответствии с зависимостью (3) дадим потенциалу новое определение.

Потенциал в заданной точке электрического поля есть линейный интеграл напряжённости в пределах от бесконечности до заданной точки поля.

Градиент потенциала ( $G$  в/м) — характеристика электрического поля, численно равная напряжённости электрического поля, отличающаяся от нее только противоположным знаком.

Градиент есть вектор, определяющий скорость нарастания потенциала в направлении против сил поля:

$$G = \text{grad } \varphi = -\bar{E} = \frac{d\varphi}{da} [\text{В/м}]$$

Диэлектрическая проницаемость (в ф/м) — основная характеристика электрических свойств изолирующего материала, физически характеризующая интенсивность процессов поляризации в среде диэлектрика, происходящих под действием внешнего электрического поля.

Математически она может быть представлена произведением двух величин:

$$e = e_0 e' [\text{В/М}]$$

где  $e_0 = 8,886 \cdot 10^{-12} [\text{Ф/М}]$  — электрическая постоянная, установленная опытным путем;

$e'$  — относительная диэлектрическая проницаемость материала (величина безразмерная).

Значения относительных диэлектрических проницаемостей для различных материалов даны в П-1\*.

Электрическое смещение ( $D$  к/м<sup>2</sup>) — характеристика, определяющая действие электрического поля на диэлектрик — есть векторная величина, равная произведению вектора напряженности электрического поля в рассматриваемой точке на диэлектрическую проницаемость среды:

$$D = E \varepsilon [\text{к/м}^2]$$

Электрическое смещение представляет собой плотность электрических зарядов на поверхности заряженного тела либо заряд, индуцируемый на каждом квадратном метре проводящей поверхности, внесенной в электрическое поле нормально к его силовым линиям.

Электрическая емкость (С ф) — понятие, применяемое к конструкциям, представляющим собой проводящие тела (электроды), разделенные слоем диэлектрика. Конструкции, использованные для накопления или сохранения зарядов, называются конденсаторами.

Если электроды конденсатора соединить с источником напряжения, то они приобретут соответствующие равные по величине и противоположные по знаку потенциалы:

$$U = \varphi_1 - (-\varphi_2) = 2\varphi$$

По мере протекания процесса поляризации в диэлектрике на поверхности электродов накапливаются заряды. Опыт показывает, что между величиной накопившегося заряда  $Q$  и величиной напряжения  $U$  между электродами существует связь, зависящая от геометрических размеров

конденсатора и рода диэлектрика. Эту связь с количественной стороны характеризует емкость  $C$ .

Емкость есть отношение заряда к напряжению:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Единицей емкости в системе СИ является фарада (ф). Так как эта величина практически очень велика, то в расчетах используют ее дольные единицы (см. П-2).

Расчетам емкости и напряженности электрического поля в ТВН придается исключительно важное значение, так как большинство высоковольтных конструкций состоит из проводящих поверхностей, разделенных слоем диэлектрика.

$$C = \frac{I * 10^6}{U 2\pi f} \text{ [мкф]}$$

Для измерения емкости используются мостовые схемы различной конструкции. Расчет емкости может быть произведен по результатам измерения тока и напряжения при заданной частоте

Если расчет емкости производится в процессе конструирования изделия, то сложная форма проводящих поверхностей приводится к геометрически правильной системе: плоскость—плоскость, цилиндр — цилиндр, сфера — сфера, для которых можно установить единую математическую последовательность расчета емкости и напряженности. Исходным соотношением такого расчета является теорема Гаусса\*.

Теорема Гаусса: поток вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую поверхность равен заряду, заключенному в части пространства, ограниченного этой поверхностью, деленному на величину диэлектрической проницаемости исследуемой среды.

Математически теорема Гаусса выражается зависимостью

$$\oint E dS = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon}$$

где  $Q$  — заряд, к;

$E$  — напряженность электрического поля, в/м;

$\varepsilon_0 \varepsilon'$  — диэлектрическая проницаемость среды, ф/м.

При расчетах целесообразно использовать эквипотенциальные поверхности  $S_a$ , которые с одной стороны геометрически правильны, а с другой выбраны так, что напряженность электрического поля во (Всех точках неизменна. Это позволяет вынести величину напряженности за знак интеграла. Части поверхности, не пересекаемые потоком вектора напряженности электрического поля, например торцевые части цилиндрической поверхности, следует исключить из рассмотрения.

Электрического поля и величиной заряда, называемое теоремой Гаусса.

1. Применяя теорему Гаусса, мысленно ограничим один из электродов заданной системы замкнутой эквипотенциальной поверхностью, для которой выразим математическую связь между напряженностью электрического поля, зарядом и диэлектрической проницаемостью среды:

$$E \oint dS = \frac{Q}{\varepsilon}$$

так как

$$\oint dS = S_a$$

То

$$E = \frac{Q}{\varepsilon S_a}$$

2. Используя соотношения (3) и (9), установим, что напряжение между электродами математически выражается через определенный интеграл вектора напряженности электрического поля по пути убывания потенциала (знак минус) вдоль направления силовых линий:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = - \int_l^2 E da = - \frac{Q}{\varepsilon} \int_l^2 \frac{da}{S_a} [\text{В}]$$

Здесь положительно заряженному электроду присвоен индекс 1. Пользуясь формулой (6), согласно которой емкость есть отношение заряда к напряжению, и зависимостью (10), получим после перемены пределов

интегрирования соотношение, определяющее в общем виде емкость рассматриваемой конструкции:

$$C = \frac{\varepsilon}{\int_2^1 \frac{da}{S_a}}$$

В соответствии с изложенной последовательностью расчета емкости одним из промежуточных действий было определение напряженности (9), однако полученная зависимость не может быть практически использована, так как величина заряда  $Q$  обычно не задается.

Для получения практически пригодной формулы расчета напряженности электрического поля любой точки между электродами, следует, рассчитав емкость конденсатора по формуле (11) и зная напряжение, приложенное к электродам, выразить в зависимости (9) заряд как произведение емкости на напряжение:

$$E_x = \frac{CU}{\varepsilon S_x} [\text{В/м}]$$

где  $C$  — емкость конденсатора;

$S_x = S_a$  — эквипотенциальная поверхность, проведенная через точку с искомой напряженностью электрического поля,  $\text{м}^2$ ;

$U$  — напряжение, действующее между электродами, в;

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды, ф/м.

### ***Задания:***

#### ***Задание №1***

Определить электрическое смещение в точке электрического поля напряженностью 10 кВ/см, если изолирующей средой является воздух.

#### ***Задание №2***

Определить величину связанного заряда, индуктированного на проводящей пластинке в  $1 \text{ см}^2$ , внесенной в электрическое поле

перпендикулярно силовым линиям. Напряженность электрического поля 12 кв/см. Изолирующей средой является трансформаторное масло с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 2,5.

### ***Задание №3***

Определить среднюю напряженность электрического поля на участке протяженностью 0,4 мм, если разность потенциалов между точками, ограничивающими участок, 600 В.

### ***Задание №4***

Потенциалы электродов изолированного от земли конденсатора равны  $\pm 2000$  В. Определить напряжение, действующее между его выводами.

### ***Задание №5***

Определить величину заряда конденсатора емкостью 2 мкф, если напряжение между его выводами 100 в.

### ***Задание №6***

Плоский конденсатор с воздушной изоляцией имеет емкость 100 пф и заряжен до напряжения 2 кВ. Определить напряженность электрического поля между его электродами, имеющими площадь  $625 \text{ см}^2$ .

### ***Задание №7***

Одиночная сфера в воздухе имеет емкость 20 пф и заряжена до напряжения 30 кВ. Определить напряженность электрического поля у поверхности сферы, если ее радиус 20 см.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Почему проводящие тела имеют эквипотенциальные поверхности?

2. Перечислить известные способы графического и аналитического выражения напряженности электрического поля.
3. Как по заданному графику потенциала построить график напряженности электрического поля?
4. Как определить пределы линейного интеграла для расчета напряжения по напряженности электрического поля?
5. Какая форма условной поверхности, охватывающей заряд, будет наиболее рациональной при использовании теоремы Гаусса?
6. Почему зависимость, полученная для расчета напряженности электрического поля через заряд, оказывается практически непригодной?
7. Как пересчитать емкость, выраженную в фарадах, в пикофарады?
8. Что такое электрическое смещение?
9. Какова величина относительной диэлектрической проницаемости воды и проводников?
10. Что показывает и что характеризует величина относительной диэлектрической проницаемости?
11. В какой из двух сред при той же величине напряженности электрического поля будет больше электрическое смещение — в фарфоре или слюде?
12. В чем заключается закон преломления вектора напряженности электрического поля на границе раздела двух изолирующих сред и как практически он используется?

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

### *Перечень дополнительной литературы*

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

## ***Практическая работа №2***

***Тема:*** Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов

***Цель:*** Изучить основные методы расчета плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– понятие плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов

***уметь:***

– проводить расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости расчета плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.

***Теоретическая часть:***

Для расчета емкости и напряженности электрического поля между электродами конденсатора воспользуемся схемой рис. 3 и вышеизложенной последовательностью расчета.

Емкость конденсатора определится из зависимости

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S_a}{a}$$

В том случае, если напряжение, приложенное к конденсатору, задано, можно получить формулу для расчета напряженности электрического поля в изоляции

$$E = \frac{Q}{\varepsilon S_a} = \frac{UC}{\varepsilon S_a} = \frac{U\varepsilon S_a}{\varepsilon S_a a} = \frac{U}{a} \text{ [кВ/см]}$$

Изменение потенциала и напряженности в слое диэлектрика можно изобразить графически.

Расчет емкости и напряженности электрического поля в изоляции слоистого конденсатора производится согласно двум основным положениям:

а) -напряжение, приложенное к внешним обкладкам конденсатора, равно сумме напряжений, приходящихся -на каждый слой:

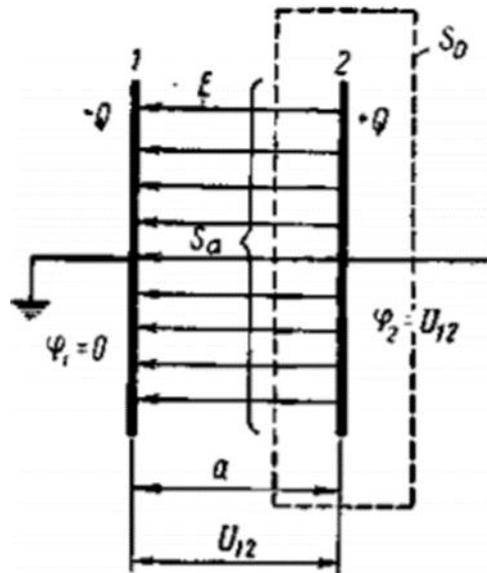


Рисунок 3-1--Расчетная схема плоского конденсатора:

$S_0$ -условная замкнутая поверхность;

$S_a$ -активная часть замкнутой поверхности

б) электрическое смещение и заряд в плоскости любого слоя постоянны

$$D = E_1 \varepsilon_1 = E_2 \varepsilon_2 = E_n \varepsilon_n$$

$$Q = CU = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_n U_n$$

Расчетные формулы емкости двух и трехслойного конденсатора имеют вид:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}$$

Кроме того, из равенства зарядов следует:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

Напряжения между смежными слоями плоского и любого другого конденсатора распределяются обратно пропорционально емкостям этих слоев.

Для вывода расчетной формулы напряженности электрического поля в диэлектрике плоского конденсатора используем зависимости, откуда для двухслойного конденсатора получим:

$$U = E_1 a_1 + E_2 a_2 = E_1 a_1 + E_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} a_2 = E_1 \left( \frac{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)$$

$$E_1 = \frac{U \varepsilon_2}{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}$$

Зависимость можно видоизменить

$$E_1 = \frac{U}{a_1} \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \frac{a_2 \varepsilon_1}{a_1}} \right) = \frac{U}{a_1 \left( 1 + \frac{\varepsilon_1 S a_2}{a_1 \varepsilon_2 S} \right)} = \frac{U}{a_1 \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right)}$$

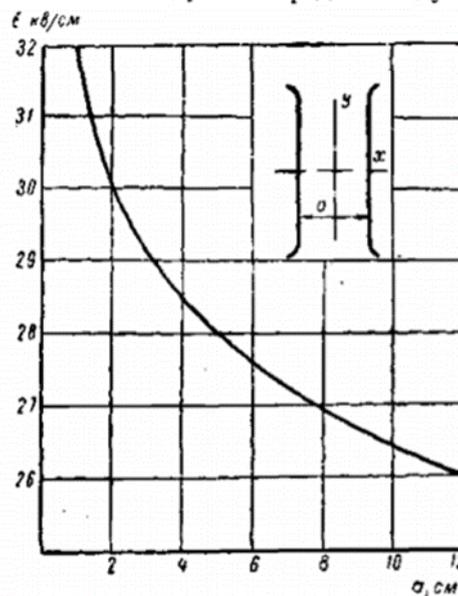


Рисунок 2.2 – Опытная характеристика зависимости пробивной прочности воздуха от расстояния между плоскими электродами при нормальных атмосферных условиях

Регулирование напряжения «а слое конденсатора можно осуществлять подбором его толщины и величины относительной диэлектрической проницаемости-материала.

Опыт показывает, что величина средней пробивной напряженности воздушной среды между электродами плоского конденсатора зависит при прочих равных условиях от расстояния между электродами (рис.2.2). Это объясняется нарушением однородности поля у краев электродов.

Поле цилиндрического конденсатора плоскопараллельное и характеризуется осевой симметрией, причем эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

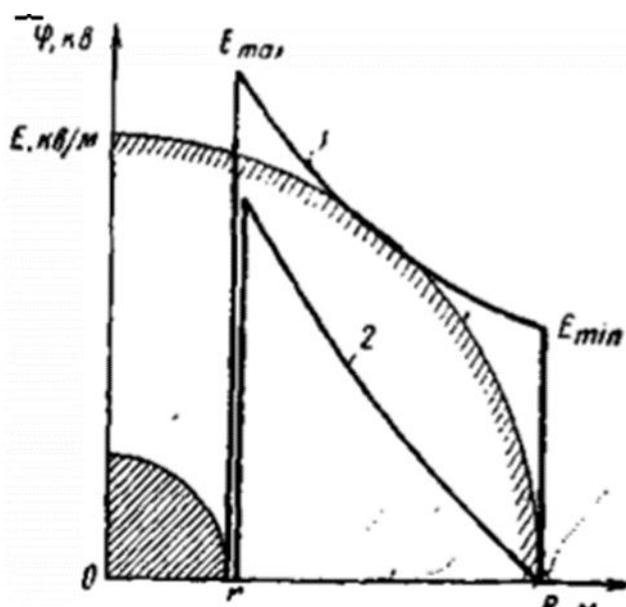


Рисунок 2.3 – Изменение напряженности (1) и потенциала (2) в слое изоляции цилиндрического конденсатора

Поле цилиндрического конденсатора плоскопараллельное и характеризуется осевой симметрией, причем эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

Последовательность расчета:

1. В соответствии с теоремой Гаусса:

$$E_x = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon 2\pi r_x l} \text{ [В/см]}$$

Переменная величина  $r_x$  в знаменателе зависимости определяет гиперболический закон изменения напряженности электрического поля.

2. Используя зависимость, выразим напряжение, приложенное к конденсатору, через напряженность электрического поле  $E_x$ :

$$U = - \int_R^r E_x dx = - \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon 2\pi r_x l} \int_R^r \frac{dx}{r_x}$$

откуда

$$U = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon 2\pi l} \ln \frac{R}{r} \text{ [В]}$$

3. В соответствии с определением емкости как отношения заряда к напряжению имеем

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln \frac{R}{r}} \text{ [Ф]}$$

При замене выражении заряда через, произведение емкости и напряжения после соответствующих преобразований получим уравнение для напряженности электрического поля, пригодное для практических расчетов:

$$E_x = \frac{U}{2.3x \lg \frac{R}{r}} \text{ [В/см]}$$

В большинстве случаев важны максимальная и минимальная величины напряженности электрического поля, получаемые из общей зависимости:

$$E_{max} = \frac{U}{2.3x \lg \frac{R}{r}} \text{ [В/см]}$$

$$E_{min} = \frac{U}{2.3R \lg \frac{R}{r}} \text{ [В/см]}$$

Для расчета характеристики изменения потенциала в слое изоляции воспользуемся формулами, предположив, что потенциал уменьшается при изменении координаты точки от  $x$  до  $R$ , получим

$$\varphi_x = - \int_r^x E_x dx = - \frac{U}{2.3 \lg \frac{R}{r}} \int_r^x \frac{dx}{x} = \frac{U}{\lg \frac{R}{r}} \lg \frac{R}{x}$$

Характеристики изменения потенциала и напряженности электрического поля вдоль радиуса цилиндрического конденсатора приведены на рис. 2.4, Напряженность электрического поля у поверхности с меньшим радиусом имеет максимальное значение.

Таким образом, если вблизи внутреннего электрода материал напряжен до предела, то у внешней поверхности он недогружен.

Математическое исследование зависимости на минимум позволяет выбрать наиболее рациональные радиусы, при которых изоляция загружена более равномерно и имеет минимальную толщину. Для анализа берут первую производную от знаменателя в выражении и приравнивают ее нулю

$$\frac{d}{dr} \left( r \ln \frac{R}{r} \right) = \frac{d}{dr} (r \ln R - r \ln r) = \ln R - \ln r - 1 = 0$$

Откуда

$$\ln \frac{R}{r} = 1$$

Т.е

$$\frac{R}{r} = e = 2.718$$

Максимальная напряженность электрического поля вблизи поверхности внутреннего цилиндра минимальна, если отношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров равно основанию натурального логарифма ( $e=2,718$ ).

$$E_{max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{U}{r \ln e} = \frac{U_0}{r} \text{ [кВ/см]}$$

Пусть цилиндрический конденсатор состоит из трех различных слоев изоляции, внутренние радиусы которых  $r_1, r_2, r_3$ , а наружный  $r_4$ . Такую конструкцию можно представить как три последовательно соединенных конденсатора  $C_1, C_2$  и  $C_3$ , емкость каждого из которых определяется формулой

$$C_n = \frac{\epsilon_0 \epsilon 2\pi l}{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}$$

Напряженность электрического поля цилиндрического конденсатора со слоистой изоляцией на границе раздела двух смежных сред меняет свою величину скачкообразно.

Напряженность электрического поля в пределах слоя изменяется по гиперболической кривой, а в целом образует пилообразную кривую (рис. 7) с разной величиной «пиков» напряженности электрического поля.

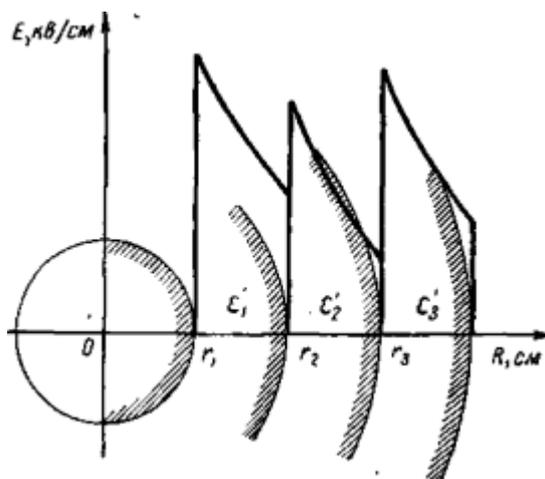


Рисунок 2.4 – Изменение напряженности электрического поля в изоляции многослойного цилиндрического конденсатора

Для расчета напряженности электрического поля в слоях многослойного конденсатора пользуются формулой:

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{r_{x+1}}{r_x} \left( \frac{C_x}{C_1} + \frac{C_x}{C_2} + \frac{C_x}{C_3} + \dots + \frac{C_x}{C_n} \right)}$$

где  $C_x$  – емкость слоя, в котором определяется напряженность электрического поля;

$r_x$  – внутренний радиус исследуемого слоя;

$r_{x+1}$  – внешний радиус исследуемого слоя.

Например, для первого слоя трехслойного цилиндрического конденсатора напряженность электрического поля в любой точке с радиусом  $x$  определяется из выражения

$$E_1 = \frac{U}{x \ln \frac{r_2}{r_1} \left( \frac{C_1}{C_1} + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_1}{C_3} \right)}$$

Сферический конденсатор в высоковольтных конструкциях встречается сравнительно редко. В большинстве случаев его форма только приближается к сферической или является ее частью. Примером служит конструкция подвесного изолятора в части между полусферической шапкой и пестиком. Иногда в ТВН используются одиночные сферы, для которых вторым электродом бесконечно большого радиуса служит земля или стены помещения.

Электрическое поле между обкладками сферического конденсатора обладает сферической симметрией.

Последовательность расчета:

1. В соответствии с теоремой Гаусса

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 4\pi r_x^2}.$$

2. Используя зависимость (10), выразим напряжение, приложенное к электродам, через напряженность электрического поля:

$$U = - \int_R^{r_1} E_x dr = - \frac{Q}{\varepsilon 4\pi} \int_R^{r_1} r_x^{-2} dr = \frac{-Q}{\varepsilon 4\pi} \left[ -\frac{1}{r_1} - \left( -\frac{1}{R} \right) \right] = \frac{Q(R - r_1)}{\varepsilon 4\pi R r_1}.$$

3. В соответствии с определением емкости как отношения заряда к напряжению имеем

$$C = \frac{4\pi\varepsilon R r_1}{R - r_1} [\Phi].$$

Используя выражения (38), (6) и (40), получим расчетную формулу напряженности электрического поля в произвольной точке

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 4\pi r_x^2} = \frac{U 4\pi\varepsilon R r_1}{(R - r_1)\varepsilon 4\pi r_x^2} = U \frac{R r_1}{r_x^2 (R - r_1)} [\text{кВ/см}].$$

При расчете точек потенциальной кривой в пространстве между сферами условимся, что наружная сфера заземлена, тогда потенциал в любой точке среды радиуса  $r_x$  получим из соотношения

$$\varphi_x = \int_{r_1}^R E_x dr = U \frac{R r_1}{R - r_1} \int_{r_1}^R \frac{dr}{r_x^2} = U \frac{r_1 (R - r_x)}{r_x (R - r_1)}.$$

Зависимости (41) и (42) графически изображены на рис. 2.5.

В практических расчетах используются значения максимальной и минимальной напряженностей электрического поля, получаемые из зависимости (41) с текущими радиусами внутренней и наружной сфер:

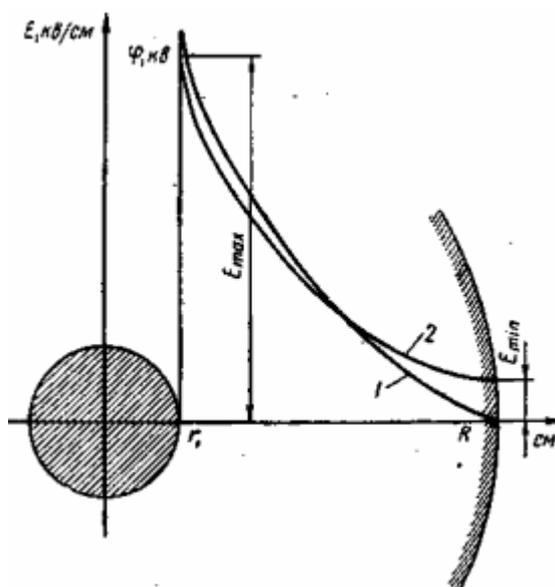


Рисунок 2.5 – Потенциальная кривая (1) и характеристика изменения напряженности электрического поля (2) в среде сферического конденсатора

Предположим, что радиус внешней сферы конденсатора останется неизменным, а внутренний радиус плавно увеличится от  $r_1$  до  $R$ , тогда значение максимальной напряженности электрического поля изменится по гиперболической кривой, имеющей точку минимума. Эта закономерность имеет практический интерес, так как при соотношении радиусов, соответствующих точке перегиба, обеспечивается наиболее полное использование изоляции.

Математически координату точки перегиба кривой максимальной напряженности электрического поля получают, по формуле (43), приравняв нулю первую производную от знаменателя дроби, откуда

$$r_1 = \frac{R}{2},$$

или

$$E_{max} = \frac{4U}{R}.$$

Как уже говорилось, одиночную сферу, достаточно удаленную от заземленных частей, представляют как сферический конденсатор с радиусом  $R = \infty$ . В этом случае расчетные формулы (40) и (43) примут вид:

$$C = 4\pi\varepsilon'\varepsilon_0 r_1 [\text{Ф}],$$

$$E_{max} = \frac{U}{r_1} [\text{кВ/см}].$$

### ***Задания:***

#### ***Задание №1***

Для измерения напряжения 110 кВ применена схема емкостного делителя, состоящая из двух последовательно соединенных конденсаторов  $C_1$  и электростатического вольтметра на напряжение 10 кВ, шунтированного конденсатором емкостью  $C_2 = 100$  пФ. Определить емкость каждого из конденсаторов  $C_1$  если емкость вольтметра  $C_B = 20$  пФ

#### ***Задание №2***

Плоский конденсатор с воздушной изоляцией и дисковыми электродами с закругленными краями имеет расстояние между электродами 2 см. Определить напряженность электрического поля в изоляции, если приложенное напряжение равно 40 кВ. Расчет повторить для случая, когда между электродами том же расстоянии введена стеклянная пластинка толщиной 1 см с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 6.

Одиночная сфера с радиусом  $r_x$  см расположена в воздушной среде. Выразить емкость одиночной сферы в пикофарадах.

#### ***Задание №3***

Определить емкость одножильного маслонаполненного кабеля на 110 кВ, длиной 1000 м, с внешним диаметром его полый жилы 22,7 мм и

наружным диаметром бумажной изоляции 46,7 мм при относительной диэлектрической проницаемости 3,5.

#### ***Задание №4***

Плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами  $a = 0,5$  см заряжен до напряжения  $U_0 = 10$  кВ. Определить изменение напряжения между электродами, если развести пластины на  $a_1 = 5$  см, предположив, что заряд при этом не изменит своей величины.

Прочной цилиндрический изолятор имеет сечение токоведущего стержня  $4\text{см}^2$ . Изоляция — текстолит ( $E_{\text{пр}} = 80$  КВ/см). Напряжение между стержнем и фланцем 140 кВ. Коэффициент запаса прочности  $K=1,4$ . 3

1. Определить внутренний радиус крепящего фланца.
2. Произвести расчет радиусов стержня и фланца, исходя из минимальной толщины слоя изоляции, при сохранении прочих заданных условий.

#### ***Задание №5***

Определить напряжение на выводах трехслойного плоского конденсатора, если напряженности электрического поля в его слоях 20 кВ/см; 10 кВ/см; 5 кВ/см при толщинах слоев, соответственно равных 2, 4 и 6 мм.

#### ***Задача № 6***

Определить напряженности электрического поля в слоях плоского трехслойного конденсатора, заряженного до напряжения 10 кВ, если емкости его слоев соответственно равны 6 ; 3; 1,5 мкФ при толщинах слоев 1,2 и 4 мм

#### ***Задание №7***

Одножильный кабель имеет радиус свинцовой защитной оболочки, равный 10 см, радиус токоведущей жилы — 1 см. Определить потенциалы в толще его изоляции для точек с радиусами 1, 2, 4, 6 и 10 см, если

напряжение, приложенное между жилой и оболочкой, равно 100 кВ, а защитная оболочка заземлена.

### ***Задание №8***

При конструировании кабеля задан радиус его токоведущей жилы 5 мм. Определить радиус его наружной защитной оболочки и запас прочности для изоляции, если напряжение, приложенное к кабелю, -30 кВ, а пробивная прочность материала 30 кВ/мм.

### ***Задание №9***

Одиночная сфера радиусом 10 см опущена в бак с трансформаторным маслом, имеющим относительную диэлектрическую проницаемость 2,5 и заряжена в таком состоянии до 30 кВ. Определить напряженность электрического поля у поверхности сферы и ее потенциал при извлечении ее из масла.

### ***Задание №10***

Построить по точкам с радиусами 3, 6, 12, 20 и 30 см потенциальную и градиентную характеристики в поле сферического конденсатора, заряженного до напряжения 20 кВ, если радиус внешнего электрода 30 см, внутреннего 3 см.

### ***Задание №11***

К обкладкам сферического конденсатора приложено напряжение 100 кВ. Определить радиусы внешнего и внутреннего электродов при условии наименьшей толщины изоляции между сферами и наименьшей величиной, равной 20 кВ/см у поверхности внутреннего электрода.

### ***Контрольные вопросы:***

1. От каких геометрических параметров и как зависит емкость плоского конденсатора?
2. В чем опасность воздушных включений между слоями многослойного конденсатора?
3. Какими параметрами следует задаться при расчете емкости плоского конденсатора?
4. Почему средняя пробивная напряженность электрического поля воздуха уменьшается при увеличении расстояния между электродами?
5. Как устраняется влияние краевого эффекта у плоских и цилиндрических электродов?
6. Как изменяется емкость плоского конденсатора при постепенном заполнении трансформаторным маслом воздушного промежутка между электродами?
7. Как регулировать напряженность электрического поля в слоях многослойного плоского конденсатора?
8. Как выглядят графики потенциала и напряженности электрического поля трехслойного плоского конденсатора, у которого средний слой пробит, а один из электродов заземлен?
9. Опишите устройство цилиндрического конденсаторного ввода.
10. Какое соотношение соблюдается между напряженностями электрического поля на границе раздела двух смежных слоев?
11. По какому математическому закону изменяется напряженность электрического поля в однородном слое цилиндрического конденсатора?
12. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?
13. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?

14. Как изменяется емкость цилиндрического воздушного конденсатора при возникновении короны у центрального электрода?

15. Почему при расчете изоляции цилиндрического конденсатора по условиям ее оптимального использования иногда приходится центральный электрод изготавливать полым?

16. При каких соотношениях между радиусами цилиндрических электродов максимальная напряженность электрического поля минимальна?

17. Как определяется емкость одиночной сферы?

### ***Список литературы:***

#### ***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

#### ***Перечень дополнительной литературы***

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

### ***Практическая работа №3***

***Тема:*** Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей

***Цель:*** Изучить методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– частные методы расчета конденсаторов и напряженности

***уметь:***

– проводить расчет емкости и напряженности сложных электрических цепей

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости применения частных методов расчета емкости и напряженности.

***Теоретическая часть:***

Пусть два цилиндра с равными и разноименными зарядами расположены параллельно друг другу на расстоянии, по сравнению с которым их радиусы пренебрежительно малы (например, два провода линии электропередачи). Так как радиусы малы, можно считать, что заряды сосредоточены не на поверхности, а вдоль геометрических или так называемых электрических осей проводов.

Рассмотрим электрическое поле в контрольной точке 1 рис. 10, расположенной на расстояниях  $a$  и  $b$  от соответствующих осей  $A$  и  $B$ .

Применив к электрическому полю точки 1 положение 1 для расчета сложных систем, получим

$$\varphi_1 = \varphi_1' + \varphi_1''$$

где  $\varphi_1'$  — потенциал условной цилиндрической поверхности в точке 1 от действия положительного заряда на оси А

$$\varphi_1' = - \int_{\infty}^a E dr = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{\infty}{a};$$

$\varphi_1''$  — потенциал в точке 1 от действия отрицательного заряда на оси В;

$$\varphi_1'' = \int_{\infty}^b E dr = \frac{-Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{\infty}{b},$$

где  $l$  — длина заряженной оси;

$a, b$  — радиусы условных цилиндрических поверхностей.

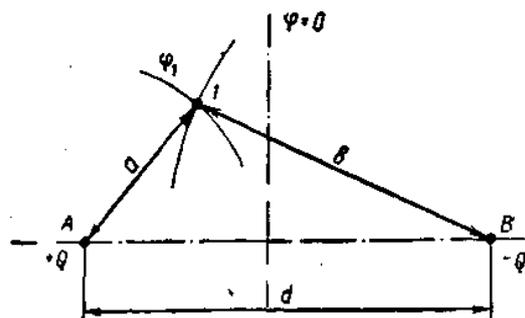


Рис. 10. Схема расположения электрических осей

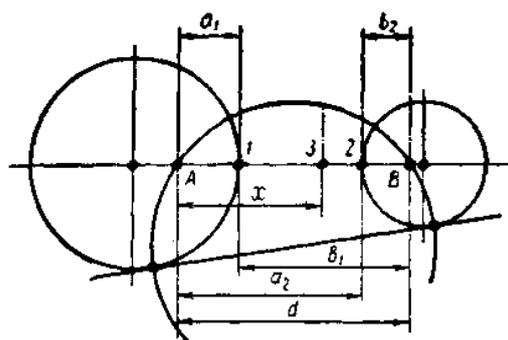


Рисунок 3.1 – Графическое определение положения электрических осей двух заряженных цилиндров

Таким образом, результирующий потенциал определится из зависимости

$$\varphi_1 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b}{a} = aQ,$$

где  $a = \frac{\ln \frac{b}{a}}{\varepsilon 2\pi l}$  — потенциальный коэффициент.

Формулу можно применить и к цилиндрам, радиусами которых не пренебрегают. В этом случае предварительно следует аналитически или графически определить положение электрических осей (рис. 3.1).

Электрические оси двух разноименно заряженных цилиндров находятся в точках пересечения прямой, соединяющей их геометрические центры, и вспомогательной окружности, с диаметром, равным отрезку между точками касания касательной, проведенной к поверхностям рассматриваемых цилиндров.

Пусть задано расположение двух параллельных цилиндров и определено положение их электрических осей, в этом случае проводящие поверхности цилиндров оказываются эквипотенциальными поверхностями поля двух заряженных осей. Возьмем на линии центров две контрольные точки 1 и 2, определяющие расстояние между цилиндрами, и найдем в них потенциалы:

$$\varphi_1 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b_1}{a_1},$$

$$\varphi_2 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b_2}{a_2},$$

где  $b_1$  и  $b_2$  — расстояния от отрицательно заряженной оси В до соответствующих точек;

$a_1$  и  $a_2$  — расстояния от положительно заряженной оси А до соответствующих точек.

Действующее напряжение между цилиндрами равно разности потенциалов между рассматриваемыми точками.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b_1 a_2}{a_1 b_2},$$

откуда в соответствии с определением емкости имеем

$$C = \frac{\varepsilon 2\pi}{\ln \frac{b_1 a_2}{b_2 a_1}} [\phi / \text{м}].$$

Для расчета напряженности электрического поля, созданного зарядами цилиндров, рассмотрим точки поля, лежащие на линии, соединяющей центры цилиндров, так как напряженности электрических полей на этой линии имеют наибольшие значения и определяются алгебраической суммой напряженностей электрических полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$E = E_A + (-E_B).$$

Напряженность электрического поля в любой из точек линии центров получим из теоремы Гаусса

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right).$$

Используя выражение для потенциала в любой точке поля, найдем потенциал для точки 3, находящейся на расстоянии  $x$  от электрической оси А:

$$\varphi_x = \varphi_3 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{d-x}{x},$$

где  $d = a_1 + b_1 = a_2 + b_2$  — расстояние между центрами электрических осей.

Напряженность электрического поля для точки 3 на линии центров между цилиндрами определится как первая производная от потенциала

$$E_3 = -\frac{d\varphi_3}{dx} = \frac{-Q}{\varepsilon 2\pi l} \cdot \frac{d}{dx} [\ln(d-x) - \ln x] = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \left[ \frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right].$$

Из выражения напряженности электрического поля можно найти ее максимальное значение, для чего следует за координату точки взять радиус цилиндра наименьшего диаметра, т. е, принять за  $x$  координату  $a_2$ , тогда

$$E_{\max} = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \left( \frac{1}{a_2} + \frac{1}{d-a_2} \right).$$

Выразив в выражении заряд через емкость и напряжение, получим зависимость, пригодную для практических расчетов:

$$E_{\max} = U \frac{\frac{1}{a_2} + \frac{1}{d - a_2}}{\ln \frac{b_1 a_2}{b_2 a_1}}$$

Этот случай характеризует электрическое поле двухпроводных линий с небольшим диаметром проводов по сравнению с расстоянием между проводами, поэтому считают, что заряды расположены вдоль геометрических осей.

Задаются напряжение и расстояние между проводами  $D_{12}$ ; изолирующей средой является воздух.

Двухпроводная линия кроме емкости между проводами  $C_{12}$ , имеет емкость каждого из проводов относительно земли  $C_{11}$  и  $C_{22}$ , называемую частичной.

Совокупность частичных емкостей образует общую емкость, которая определяется как отношение заряда на проводах к напряжению, действующему между ними (рис. 4.1, а):

$$C = C_{12} + \frac{C_{11}C_{22}}{C_{11} + C_{22}} \text{ при } C_{11} = C_{22},$$

$$C = C_{12} + \frac{C_{11}}{2}.$$

Различают еще рабочую емкость провода (рис. 3.2, б), которую определяют как отношение заряда на проводе к его потенциалу в нормальном режиме работы. Для расчета рабочей емкости надо знать эквивалентную емкость между проводами и поверхностью нулевого потенциала

$$C_{\text{раб}} = C_{11} + 2C_{12}$$

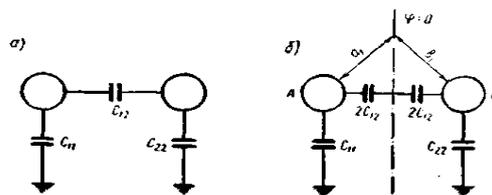


Рисунок 3.2 – Схема для расчета частичных емкостей двухпроводной линии:  $a$  — для расчета емкости линии;  $b$  — для расчета рабочей емкости провода

Расчет частичных емкостей производится на основании уравнений Максвелла, связывающих потенциалы с зарядами через потенциальные коэффициенты [Л-9].

Из анализа электрического поля между двумя заряженными осями следует, что точки, для которых расстояния от зарядов  $A$  и  $B$  равны, образуют поверхность нулевого потенциала. Поэтому электрическое поле между цилиндрами и землей, являющейся поверхностью нулевого потенциала, можно рассматривать как поле между цилиндрами и их зеркальными отображениями. Это положение носит название правила зеркального отображения. Применение уравнений Максвелла и правила *зеркального отображения* рассмотрено в [Л-9] и в задачах.

Для электрического поля двух проводов над землей можно рассчитывать только емкость  $C_{12}$ , так как из-за больших расстояний проводов от земли емкости  $C_{11}$  и  $C_{22}$  малы. Для расчета емкости между проводами используем зависимость (48), в которой за точки 1 и 2 примем точки пересечения образующих цилиндров с линией, соединяющей центры проводов. Тогда, пренебрегая смещением электрических осей, имеем:

$$C = \frac{\varepsilon 2\pi l}{\ln \frac{b_1 a_2}{b_2 a_1}} = \frac{\varepsilon_0 \pi l}{\ln \frac{D_{12}}{r}}$$

$$b_1 = a_2 = D_{12},$$

$$a_1 = b_2 = r,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0,$$

или после некоторого упрощения

$$C = \frac{12}{\lg \frac{D_{12}}{r}} n\phi / м.$$

Для расчета максимальной напряженности электрического поля вблизи поверхности любого из проводов используем выражение; произведя в нем соответствующую замену величин и пренебрегая достаточно малой величиной  $\frac{1}{D_{11}}$ , имеем

$$E_{\max} = U \frac{\frac{1}{D_{12}} + \frac{1}{r}}{2 \ln \frac{D_{12}}{r}} = \frac{U}{r \cdot 2,3 \lg \frac{D_{12}}{r}}.$$

Одиночный провод над землей

Этот случай характеризует передачу электроэнергии по схеме провод — земля в контактной сети электроподвижного состава, в передачах постоянного тока. Для расчета емкости и напряженности электрического поля, воспользуемся правилом зеркального отображения. При этом следует учесть, что если провод по отношению к земле имел потенциал  $\varphi$ , то после введения в расчет зеркального отображения провода потенциал и расстояние между проводами удваиваются.

Для расчета емкости между проводом и его зеркальным отображением воспользуемся формулой, а для получения емкости  $C_{11}$  удвоим полученный результат.

Таким образом, из зависимости

$$C_{11} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{2h}{r}}.$$

Для расчета напряженности электрического поля вблизи поверхности провода используем выражение. Откуда, удваивая заданный потенциал и считая его за  $U_0$ , имеем

$$E_{\max} = \frac{U_0}{2,3r \lg \frac{2h}{r}}.$$

Две сферы равного диаметра.

Данная система представляет собой распространенный в ТВН случай использования шарового разрядника. Электрическое поле между сферами близко к равномерному. Неравномерность учтена коэффициентом неравномерности  $y_1$  — для изолированных шаров и  $y_0$  — для заземленного шара (см. П-3). Для указанных случаев максимальная напряженность электрического поля определяется зависимостями:

$$E_{\max} = \frac{U}{a} y_1, )$$

$$E_{\max} = \frac{U}{a} y_0.$$

Коэффициенты неравномерности поля зависят от отношения расстояния между сферами к их радиусу и в пределах 0—1,5 определяются из зависимостей

$$y_1 = 0,9 + 0,45 \frac{a}{r},$$

$$y_0 = \frac{1}{2} \left[ \frac{a}{r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + 4} \right].$$

В П-4 и 5 приведены величины пробивных напряжений между сферами различных диаметров.

Емкость между сферическими электродами равного диаметра в воздушной среде определяется по полученной опытным путем зависимости

$$C = \frac{\varepsilon_0 \pi a}{y_1 - 1} [\phi].$$

где  $a$  — расстояние между сферами, см.

### **Задания:**

#### **Задание №1**

Два заряженных цилиндра диаметром 2 см и длиной в 1 м расположены в воздухе параллельно. Расстояние между осями цилиндров 100 см. Определить емкость между цилиндрами, пренебрегая влиянием земли. Для

решения воспользоваться формулой считая, что геометрические и электрические оси цилиндров совпадают.

### ***Задание №2***

Определить емкость между проводами двухпроводной телеграфной линии протяженностью 100 км при расстоянии между проводами 40 см, радиусе провода 2 мм. Влиянием земли на емкость провода пренебречь. Заряд проводов считать расположенным вдоль геометрической оси провода.

### ***Задание №3***

Определить пробивное напряжение между двумя изолированными шарами с радиусами 1 см, если расстояние между шарами 3 см, а значение пробивной напряженности электрического поля 30 кВ.

### ***Задание №4***

Определить емкость провода и напряженность электрического поля вблизи поверхности с радиусом 6 мм, протянутого на уровне 2 м над землей. Потенциал провода равен 20 кв. Повторить этот расчет для провода, находящегося на высоте 20 см от земли при прочих равных условиях. Емкость рассчитывать на единицу длины провода.

### ***Задание №5***

Два провода А-95 диаметром по 14 мм расположены на высоте 10 м над землей горизонтально и на расстоянии 3 м друг от друга. Определить частичную емкость  $C_{12}$  между проводами, емкость каждого из проводов  $C_{11} = C_{22}$  относительно земли, рабочую емкость, т. е. емкость провода относительно земли и нейтрали, а также суммарную емкость между проводами линии. Расчет произвести в  $\phi/\text{км}$  линии.

### ***Задание №6***

Определить пробивное напряжение между одиночной сферой, расположенной в воздухе, и заземленной плоскостью, если  $E_{пр}=30$  кв/см, радиус сферы 50 см, а расстояние до плоскости 40 см.

### ***Задание №7***

Определить: а) емкость между шаровыми электродами равного диаметра, находящимися в воздухе, если радиус их 10 см, а расстояние между ними 5 см, б) емкость между шаром и плоскостью при тех же условиях. В каждом случае один из электродов заземлен.

### ***Задание №8***

Определить максимальную напряженность электрического поля и емкость между шаровыми изолированными электродами равных диаметров, если подводимое напряжение 100 кв. макс., радиусы равны 12,5 см, расстояние между сферами 16 см.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Как можно объяснить увеличение неравномерности электрического поля шарового разрядника при заземлении одной из его сфер?
2. В каких пределах можно изменять расстояние между сферами шарового разрядника, сохраняя электрическое поле равномерным или близким к равномерному?
3. В чем заключается правило зеркального отображения?
4. На основании какого геометрического построения может быть найдено положение центров электрических осей двух заряженных цилиндров?
5. В чем заключается особенность выражения для потенциальных коэффициентов точек, принадлежащих поверхности нулевого потенциала?

6. На основании какого геометрического построения может быть найдено положение центров электрических осей двух заряженных цилиндров?

7. В чем заключается особенность выражения для потенциальных коэффициентов точек, принадлежащих поверхности нулевого потенциала?

8. Какое практическое применение имеет система из двух сфер?

9. Какие меры предосторожности и почему следует принять при работе монтеров на одной обесточенной цепи двухцепных линий электропередачи?

10. Поясните принцип осуществления «емкостного отбора» мощности от высоковольтной линии электропередачи?

11. Как изменится формула для рабочей емкости провода двухпроводной линии передачи при заземлении одного из проводов?

12. Сравните между собой рабочую емкость и емкость линии для двухпроводной системы. Какая из указанных емкостей больше?

### ***Список литературы:***

#### ***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

#### ***Перечень дополнительной литературы***

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>



## ***Практическая работа №4***

***Тема:*** Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде

***Цель:*** Изучить характеристику и закономерность электрических разрядов

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– основные характеристики возникновения электрических разрядов в газовой среде

***уметь:***

– рассчитывать расстояние между электродами, определять напряженность

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости изучения общей характеристики появления разрядов в газовой среде.

***Теоретическая часть:***

В нормальных условиях, для которых принято атмосферное давление в 760 мм рт. ст., температура 293° К (20° С) и содержание влаги 11 г/м<sup>3</sup>, воздух, являющийся смесью электрически нейтральных газов, представляет собой диэлектрик с объемным сопротивлением, равным бесконечности.

Ток сквозной проводимости через такой диэлектрик практически невозможен. Идеальным диэлектриком мог бы оказаться абсолютный вакуум, однако даже при технически достижимом разрежении в 10<sup>-6</sup> мм. рт.

ст. сохраняются еще достаточно большое количество газовых молекул и условия для образования заряженных частиц.

При воздействии на газовый промежуток электрического поля с достаточной напряженностью газ теряет свои изолирующие свойства и становится проводящим в узком канале или в определенной зоне.

Процесс кратковременной потери газом диэлектрических свойств под действием приложенного к газовому промежутку напряжения называется электрическим пробоем газа.

Величина средней напряженности электрического поля, при которой возникает пробой, называется пробивной напряженностью  $E_{пр}$ . Пробой - газовой среды объясняется рядом процессов, из которых основными являются процессы ударной ионизации, поверхностной ионизации, термоионизации и фотоионизации.

Процесс ударной ионизации, при котором в объеме газа происходит образование заряженных частиц за счет кинетической энергии соударяющихся электронов и нейтральных частиц. Протекание процесса ударной ионизации зависит от длины свободного пробега  $\lambda$  заряженной частицы, которая определяет число столкновений частиц  $\frac{1}{\lambda}$  — на единицу длины газового промежутка, что в свою очередь зависит от плотности газовых частиц в объеме, т. е. от давления газа  $p$  и величины  $A$ , характеризующей размеры сталкивающихся частиц. Математически эту зависимость можно выразить формулой

$$\frac{1}{\lambda} = A_p$$

Не каждое столкновение приведет к отрыву электрона с внешней орбиты нейтральной газовой частицы. Доля успешных столкновений зависит от постоянно действующей величины напряженности электрического поля и ионизационных свойств самого газа.

Ток в газовом промежутке в процессе ударной ионизации определяется формулой

$$I = I_0 e^{a\alpha},$$

где  $I_0 = ng$  — ток, вызванный действием внешнего ионизатора.

По Тоундсену, который первый предложил количественную теорию разряда в газах, процесс ударной ионизации характеризуется величиной коэффициента ударной ионизации

$$a = Ape^{\frac{-U_i}{\lambda E}},$$

где  $U_i$  — потенциал ионизации газа.

Коэффициентом ударной ионизации называется величина, определяющая число успешных соударений (приводящих к расщеплению газовой молекулы на электрон и положительный ион), на 1 см пути движения электрона вдоль поля. При напряженностях электрических полей, близких к пробивным, и давлении, близком к нормальному, величина  $a$  для воздуха составляет 10-15 см<sup>-1</sup>

Процесс поверхностной ионизации, при котором за счет кинетической энергии положительных ионов газа, бомбардирующих поверхность катода, происходит отрыв электронов. Эти электроны насыщают газовый промежуток и активно участвуют в процессе объемной ионизации.

Число электронов, освобожденных при бомбардировке одним положительным ионом с поверхности катода, принято называть коэффициентом поверхностной ионизации  $\gamma$ .

Величина коэффициента поверхностной ионизации зависит от рода газа, в котором формируется пробой, и от материала катода с учетом состояния его поверхности. Особую роль поверхностная ионизация играет при разрядах в сильно разреженной среде и в вакууме. При низких давлениях воздуха для катода, выполненного из железа  $\gamma = (0,02—0,04)$ , т. е. на каждые 100 соударений освобождаются с поверхности катода только 2—4 электрона.

Процесс термоионизации и фотоионизации, при которых образование заряженных частиц происходит за счет местного разогрева поверхности электродов или отдельных участков газовой среды, а также за счет квантов электромагнитной энергии, излучаемых в объеме газа при переходе возбужденных атомов в нормальное состояние.

Таким образом, пробой газа и любая другая форма газового разряда связана с движением в электрическом поле имеющихся и вновь образующихся электрических зарядов (электронов и ионов обоих знаков). Давление газа, температура, влажность и форма электродов, среди которых формируется пробой, определяют не только физические формы разряда, но и величины электрических характеристик пробивной и начальной напряженностей.

Под электрической прочностью воздуха или газа понимают напряжение  $U_{пр}$  или величину средней напряженности электрического поля  $E_{пр}$ , при которой происходит пробой. Наибольшее влияние на величину пробивной напряженности электрического поля оказывает форма электродов, так как она определяет собой степень равномерности электрического поля в момент приложения напряжения. С течением времени поле искажается за счет объемных зарядов — малоподвижных положительных ионов газа, поэтому пробой формируется не сразу, а ступенями.

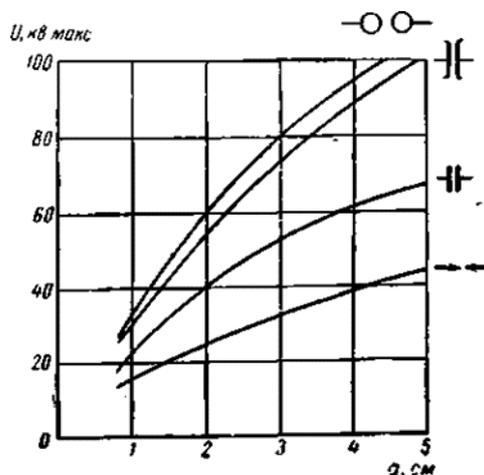


Рисунок 4.1 – Зависимость пробивного напряжения

воздушного промежутка от формы электродов и расстояния между ними

Из опытных характеристик рис. 4.1, снятых при переменном токе и расстояниях до 1—5 см между электродами различной формы, следует, что наибольшей прочностью обладает газовый промежуток между симметричными электродами шар — шар или плоскими электродами типа Роговского.

Наименьшую прочность, имеет газовый промежуток между электродами игла — плоскость, который при прочих равных условиях обладает несколько большей емкостью, чем промежуток между иглами или стержнями.

Отсюда следует, что при одинаковых расстояниях между электродами прочность промежутка тем больше, чем более равномерно электрическое поле.

Для всех материалов опытом установлены значения электрической прочности (см. П-6). Под этим термином понимают величину средней пробивной напряженности электрического поля материала  $E_{пр}$  (кв макс./мм или кв действ./мм). Для воздуха в условиях строго однородного или равномерного электрического поля эта величина при нормальных атмосферных условиях близка к 30 кв макс./см. В случаях неравномерного поля следует говорить только о средней величине пробивной прочности, которая при большой удаленности электродов снижается до 4,6—2,6 кв макс./см (см. П-7). Во всех случаях определения пробивной прочности рекомендуется пользоваться расчетными кривыми или таблицами, при их отсутствии можно применять эмпирические формулы. В расчетах следует учитывать как форму электродов, так и род тока — постоянный, переменный, импульсный, а также наличие заземления одного из электродов.

Заземление одного из электродов всегда снижает прочность газового промежутка из-за перераспределения линий силового поля, увеличивающего напряженность у поверхности изолированного электрода.

Значительное увеличение прочности газового промежутка наблюдается при переходе от длительных воздействий напряжения на импульсные. Это кажущееся упрочнение объясняется тем, что формирование разряда не может произойти мгновенно. Чем меньше время воздействия напряжения, тем прочнее оказывается промежуток. Упрочнение изоляции оценивается коэффициентом импульса  $\beta = 1,2—1,8$ .

Под коэффициентом импульса понимают отношение амплитуды импульсного разрядного напряжения к статическому разрядному напряжению.

Опыт показывает, что пробивное напряжение воздуха при расстояниях между стержнями до 30 см изменяется по кривой, близкой к параболической, а при больших расстояниях—по линейной зависимости.

Это объясняется влиянием коронного разряда вблизи острия и объемных зарядов, существенно выравнивающих электрическое поле, поэтому при расстояниях в пределах от 100 до 200 см можно пользоваться полуэмпирическими зависимостями, предложенными Ротом и Вайкером:

для переменного тока частотой 50 гц:

если электроды изолированные

$$U_{np} = 15 + 3,8 \cdot a \quad \text{кв действ.},$$

если один электрод заземлен:

$$U_{np} = 15 + 3,75 \cdot a \quad \text{кв действ.},$$

для импульса положительной полярности

$$U_{np} = 75 + 5,56 \cdot a \quad \text{кв макс.},$$

для импульса отрицательной полярности

$$U_{np} = 110 + 6 \cdot a \quad \text{кв макс.},$$

В соответствии с зависимостями можно оценить величину пробивного напряжения воздушного промежутка ( $a$ , см) между элементами электроустановки, условно принимая их за стержни и обеспечивая этим некоторый запас прочности. Для расчета пробивной прочности промежутка ( $a$ , м) между электродами стержень — стержень при  $1 < a < 4$  м используется полуэмпирическая зависимость

$$U_{np} = (1,45\sqrt{a} - 0,93)10^3 \text{ кв макс.},$$

обеспечивающая точность в пределах  $\pm 2,5\%$  (см. Л-18). Для промежутка стержень — плоскость при  $a \leq 9$  м применяется зависимость

$$U_{np} = (1,62\sqrt[3]{a} - 1,1)10^3 \text{ кв макс.},$$

обеспечивающая точность в пределах  $\pm 5\%$ , В П-8, 9, 10 приведены опытные данные для расчета пробивной прочности воздушных промежутков для расстояний  $1 < a < 8$ .

Рост температуры и снижение атмосферного давления относительно величин, принятых за нормальные, приводят к уменьшению плотности газовых частиц в промежутке между электродами, что способствует образованию пробоя. Это учитывается главным образом в районах, возвышенных над уровнем моря.

Коэффициент относительной плотности воздуха

$$\delta = \frac{0,386p}{273 + t}$$

где  $p$  — давление, мм рт. ст.;

$t$  — температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Пробивное напряжение прямо пропорционально коэффициенту  $\delta$ :

$$U_{\delta} = U_0\delta.$$

С увеличением влажности электрическая прочность газового промежутка возрастает, так как взвешенные частицы влаги связывают движущиеся электроны, уменьшая их подвижность. Влажность или весовое количество водяных паров, содержащихся в единице объема воздуха, зависит

от температуры. Для каждой температуры существует определенный предел влажности.

Отношение фактически содержащейся влаги к ее предельной величине называется относительной влажностью  $f\%$ . За нормальную влажность воздуха принята величина 65%, что соответствует содержанию 11 г воды в кубическом метре воздуха. Изменение пробивного напряжения газа относительно нормальных условий учитывается коэффициентом  $K$  (см. П-11).

Приблизительно для частоты 50 гц и напряжения пробоя 141 кв макс и выше поправочный коэффициент  $K$  может быть определен по формуле

$$K = 1,15 - 0,15 \frac{f}{11},$$

где  $f$  — фактическая влажность воздуха.

Таким образом, пробивная прочность газового промежутка с учетом давления, температуры и влажности определяется из зависимости

$$U_{np} = U_{np} \frac{\delta}{K},$$

где  $U_{np}$  — пробивное напряжение промежутка при условиях, принятых за нормальные.

### ***Задания***

#### ***Задание №1***

Определить число электронов, ежесекундно достигающих анода, если в воздушном промежутке между электродами созданы условия для ударной ионизации. Число электронов, ежесекундно покидающих катод, 2, коэффициент ударной ионизации равен 11.

#### ***Задание №2***

Расстояние между токоведущими выводами трансформатора типа ТДЦГ 90000/110 равно 120 см. Определить кратность перенапряжения, при

котором происходит перекрытие этого промежутка, и коэффициент его импульсной прочности.

### ***Задание №3***

При полевых испытаниях изоляции линии электропередачи на высоте 1000 м над уровнем моря использован шаровой разрядник, одна из сфер которого заземлена. Определить пробивное напряжение и максимальную напряженность электрического поля у поверхности шаров, если диаметр сфер 25 см, расстояние между шарами 6 см, давление воздуха 660 мм рт. ст., температура воздуха 17° С, содержание влаги 20 г/м<sup>3</sup>.

### ***Задание №4***

Воздушный промежуток в 1 см между плоскими электродами характеризуется давлением 760 мм рт. ст. и напряженностью электрического поля 29 кВ/см. Определить число электронов, достигающих анода, если с катода отрывается 1 эл/сек, а в промежутке происходит процесс ударной ионизации.

### ***Задание №5***

Трансформатор на 220 кВ установлен в непосредственной близости от разъединителя (заземленная плоскость). Определить минимально допустимое расстояние между трансформатором и разъединителем, если по условиям возможных перенапряжений выбран четырехкратный запас прочности этого промежутка при нормальных атмосферных условиях. Для решения воспользоваться зависимостью.

### ***Задание №6***

К газовому промежутку, заключенному между двумя электродами, приложено напряжение, достаточное для возникновения разряда. Определить число электронов, покидающих каждую секунду катод под действием лучей

кварцевой лампы, если ток в цепи 1 мкА, заряд каждого электрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, длина промежутка 2 см, а коэффициент ударной ионизации 10.

### ***Задание №7***

Определить пробивные напряжения между двумя изолированными стержнями, удаленными друг от друга в воздухе на расстояния 120, 220, 800 см. Содержание влаги 20 г/м<sup>3</sup>, температура воздуха 30° С и давление 740 мм рт. ст.

### ***Задание №8***

Определить пробивное напряжение для воздушного промежутка в 120 см, заключенного между изолированным и заземленным стержневыми электродами, при  $\delta=0,945$  и коэффициенте, учитывающем влажность  $K=0,91$ . На промежуток поочередно воздействует положительный и отрицательный импульсы.

### ***Задание №9***

Пробивное напряжение газового промежутка с неоднородным полем при влажности 8,5 г/м<sup>3</sup> составило 141 кВ макс. Какова прочность этого промежутка в условиях нормальной влажности? Поправочный коэффициент принять по ГОСТ 1516—60 (см. П-12) и рассчитать по аналитической формуле.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что представляют собой коэффициенты объемной и поверхностной ионизации?
2. Какой разряд принято называть самостоятельным и каковы условия его возникновения?
3. Почему увеличение содержания влаги в газе повышает электрическую прочность газового промежутка

4. Каким соотношением связаны между собой диаметры сфер разрядника и пределы измеряемых им напряжений?
5. Пояснить роль полярности в формировании разряда между электродами игла — плоскость.
6. Почему при равных условиях промежутков стержень — стержень оказывается прочнее промежутка стержень — плоскость?
7. Какой характер имеет зависимость коэффициента объемной ионизации от давления газа?
8. Что характеризует собой коэффициент импульсной прочности?
9. Что характеризует собой коэффициент импульсной прочности?
10. Что такое электрический барьер и какова его роль в упрочнении газового промежутка?

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

***Перечень дополнительной литературы***

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

## ***Практическая работа №5***

***Тема:*** Основные формы разрядов в газах и их использование

***Цель:*** Изучить основные формы разрядов в газах и их применение на производстве

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– основные формы разрядов в газах

***уметь:***

– рассчитывать потери на корону ВЛ

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости изучения основных форм разрядов и их использования

***Теоретическая часть:***

В технике высоких напряжений газовая среда служит изолирующим материалом, например, при расположении проводов линий электропередачи в воздухе, между электродами воздушных конденсаторов, в искровых промежутках разрядников и т. д. При этом возникновение ионизационных процессов в воздухе является нежелательным явлением. С другой стороны, работа ряда аппаратов основана на различных формах газового разряда.

Таковыми аппаратами являются трубчатые разрядники, использующие дуговой разряд; установки по очистке дымовых газов на электростанциях, использующие коронный разряд; высоковольтные газосветные трубки с холодным катодом, использующие тлеющий разряд; установки по электроискровой обработке металлов, использующие искровой разряд;

установки по окраске изделий - в электрическом поле, использующие тихий разряд и т. д.

Физическая форма газового разряда зависит от совокупности; целого ряда факторов: давления и температуры газа, напряженности и конфигурации электрического поля, мощности источника, плотности тока и расстояния между электродами.

Тлеющий разряд возникает как устойчивая форма газового разряда при давлениях порядка 10—20 мм рт. ст. Этот разряд характеризуется малой плотностью тока 20—50 мА/см<sup>2</sup> большим перепадом напряжения вблизи электродов 200—400 В.

При тлеющем разряде имеет место переход электрона с удаленной орбиты на орбиту, лежащую ближе к ядру и обладающую поэтому меньшей энергией. Избыток энергии излучается атомом в пространство в виде порции энергии  $\Delta A$ , называемой квантом или фотоном, величину которой можно выразить как разность энергетических уровней двух орбит:  $A_1$  и  $A_2$  в электронвольтах, т. е.

$$\Delta A = A_2 - A_1$$

Тлеющий разряд в газосветной трубке является источником лучистой энергии или света. Явление холодного свечения газа называется электролюминесценцией.

Видимый свет представляет собой электромагнитные колебания с определённым диапазоном частот или длин волн, Для измерения длин световых волн удобно пользоваться специальной единицей  $\text{A}$ , называемой ангстремом и равной  $10^{-8}$  см.

Из физики известно, что пучок солнечного света разлагается стеклянной призмой на лучи различных цветов, образуя спектр. Каждому цвету соответствуют определённые длины волн. Красному цвету, например, соответствуют электромагнитные колебания с длинами волн в пределах 6300—7700  $\text{A}$ .

Расчетом можно установить цвет, соответствующий излучению, воспользовавшись соотношением

$$\lambda = \frac{k}{\Delta A} = \frac{2 \cdot 10^{-8}}{\Delta A}$$

где  $\lambda$ - длина волны излучения, А;

к- Расчётный коэффициент ( $2 \cdot 10^{-8}$ );

$\Delta A$ -энергия излучения, эв.

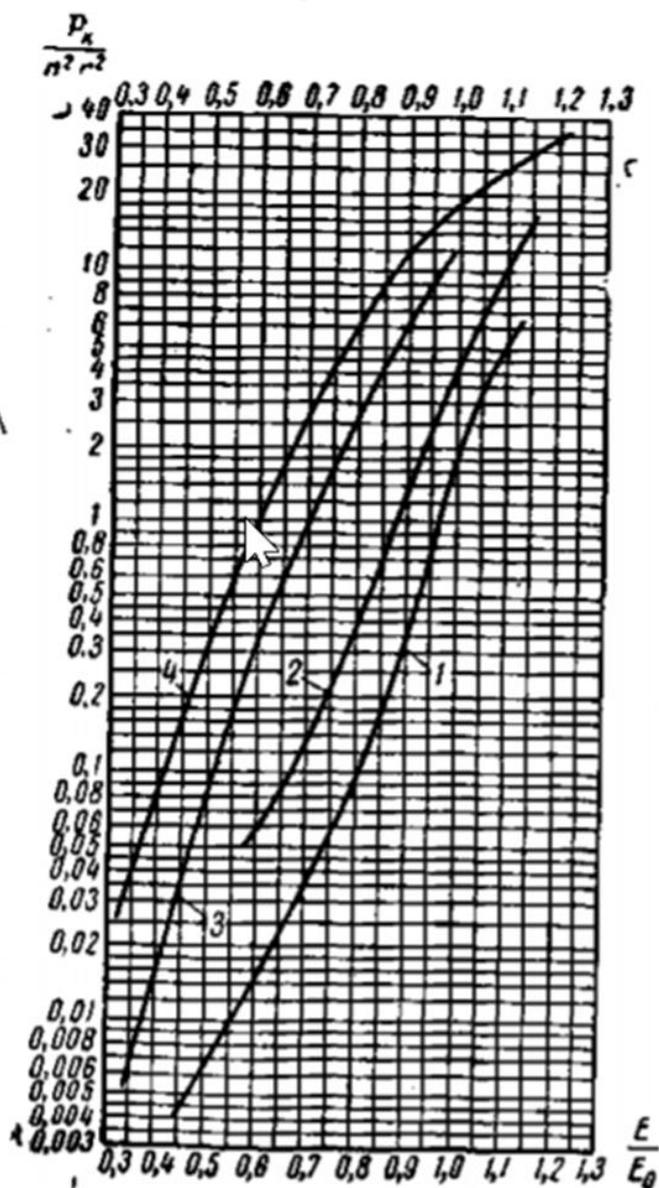


Рисунок 5.1 – Обобщённые характеристики потерь мощности на корону для различных элементов погоды: — хорошая погода; 2 — снег; 3 — дождь; 4 — наморозь

Коронным разрядом, или просто короной, называется один из видов электрического разряда в газовой или воздушной среде, возникающей, в частности, у поверхности проводов воздушных линий электропередачи и у поверхности любых электродов с малым радиусом кривизны под действием рабочего напряжения.

Коронный разряд при большом расстоянии между проводами и, следовательно, при небольшой величине средней напряженности электрического поля не приводит к перекрытию промежутка и может существовать длительно. Корона сопровождается свечением вблизи поверхности провода, характерным потрескиванием, образованием озона и высокочастотными помехами. Появление короны свидетельствует о резкой неравномерности электрического поля и о наличии у поверхности тренирующего электрода напряженности электрического поля, достаточной для возникновения процесса объёмной и поверхностной ионизации, называемой критической  $E_{кр}$ .

Возникновение короны приводит к существенному выравниванию электрического поля в зоне ее действия.

В большинстве случаев корона рассматривается как вредное явление, так как она приводит к дополнительным потерям активной мощности  $P_{кор}$  и энергии.

Кроме того, корона создает радиопомехи и вредно действует на изоляцию органического происхождения.

Положительную роль корона играет при возникновении грозových перенапряжений, снижая амплитуду и крутизну электромагнитных волн. Корона используется в установках по очистке дымовых газов, в установках по разделению эмульсии, в электростатических генераторах, где коронирующий электрод используется для передачи зарядов на движущуюся ленту, и т. д.

В ТВН наиболее распространённым является расчёт потерь мощности на корону для линий электропередачи. При этом последовательно определяются

а) критическая или начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению общей короны;

б) напряженность электрического поля, создающаяся под действием рабочего напряжения линии;

в) среднегодовые потери активной мощности на корону, расчет которых производится по аналитическим зависимостям или с использованием обобщенных характеристик для каждого элемента погоды, полученных на основе произведенных измерений {рис. 16}.

Расчет по обобщенным характеристикам. Начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению короны, зависит от давления воздуха, температуры и состояния поверхности провода и аналитически определяется зависимостью:

$$E_{o\partial} = 30,3m\delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{r^2}} \right) \text{кВ макс/см,}$$

где  $r$ - радиус провода, см;

$P$ - атмосферное давление, мм рт.ст.;

$c$ - температура, °C;

$m$ -коэффициент негладкости, равный 0,82 для витых проводов.

При  $\delta=1$  начальная напряженность электрического поля для проводов марки АС-240, АС-300 и АС-400 соответственно равна 31,9, 31,6 и 31,1 кв макс/см.

Рабочая напряженность электрического поля вблизи одиночных проводов линии определяется зависимостью

$$E_{max} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{\sqrt{2}UC_n}{\sqrt{3} 2\pi\epsilon_0 r} = 0.0147 \frac{UC_n}{r} [\text{кВ макс/см}]$$

где  $U$  — действующее значение линейного напряжения, кв;

$C_n$  — рабочая емкость рассматриваемой фазы, пф/м.

Используя значение среднегодовой плотности воздуха для заданной местности (для Московской области 1,04) и определив начальную напряженность электрического поля провода, следует сравнить ее со средним значением рабочей напряженности проводов линии, полученным из зависимости

$$E_{cp.max} = \frac{1}{3}(E_{1max} + E_{2max} + E_{3max})$$

При  $E_{cp.max} \leq 0.5 E_{cp}$  производить расчет потерь на корону не требуется

При  $E_{cp.max} \leq 0.9 E_{cp}$  потери на корону очень велики.

Установив необходимость произведения расчетов потерь на корону, следует воспользоваться обобщенными характеристиками потерь мощности для различной погоды (ясно, снег, дождь, изморозь). Указанные характеристики графически определяют функциональную зависимость

$$\frac{P_k}{n^2 r^2} = F\left(\frac{E}{E_0}\right)$$

где  $n$  — число проводов в фазе расщепленной линии;

$r$  — радиус провода.

Среднегодовые потери мощности на корону трехфазной линии определяются суммированием потерь по фазам при всех видах погоды по формуле

$$P_k = \frac{n^2 r^2}{8760} \left\{ \left[ F_x \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_x \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_x \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] \delta_{cp}^2 T_x \right. \\ + \left[ F_D \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_D \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_D \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_D \\ + \left[ F_C \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_C \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_C \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_C \\ \left. + \left[ F_{из} \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_{из} \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_{из} \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_{из} \right\} \text{ кВт/км,}$$

где  $F_x$ ,  $F_D$ ,  $F_C$ ,  $F_{из}$  — обобщенные зависимости потерь на корону в хорошую погоду, при дожде, снеге и изморози.

В линии с горизонтальным расположением проводов  $E_1 = E_3$ .

При приближительных расчетах погоду можно разделить на ясную, считая, что она составляет для средней полосы 80% 68 (7000 ч) и дождь 20% (1760 ч) от числа часов в году. В этом случае расчетная формула значительно упрощается;

$$P_k = \frac{n^2 r^2}{8760} \left\{ \left[ F_x \left( \frac{E_1}{E_0} \right)^2 + F_x \left( \frac{E_2}{E_0} \right) \right] \delta_{cp}^2 T_x + \left[ F_d \left( \frac{E_1}{E_0} \right)^2 + F_d \left( \frac{E_2}{E_0} \right) \right] (T_d + T_c + T_{из}) \right\}$$

Расчет рабочей емкости трехфазной транспонированной линии с горизонтальным расположением проводов без тросов

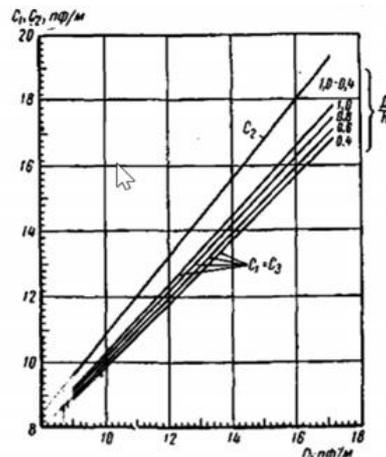


Рисунок 5.2 – Рабочие емкости линии электропередачи с горизонтальным расположением проводов:  $H$ — средняя высота провода над землей;  $D$ — расстояние между фазами;  $C_2$ — емкость средней фазы;  $C$ — средняя емкость транспонированной линии без учета земле;  $C_1 = C_3$  емкость крайних фаз трехфазной линии

Значение для рабочей емкости крайних фаз  $C_1 = C_3$  для различных  $\frac{D}{h}$  и средней фазы  $C_2$  может быть определено непосредственно по кривым (рис. 5.2), где по оси абсцисс отложена величина средней рабочей емкости  $C$  для всей линии, определяемая зависимостью

$$C = \frac{24.13}{\lg \frac{1.26D}{r}}$$

При отсутствии кривых расчет тех же емкостей может быть произведен аналитически через взаимные:

$$a_{ik} = \frac{\ln \frac{D_{ik}}{D_{ik}}}{2\pi\epsilon_0}$$

и собственные

$$a_{ik} = \frac{\ln \frac{D_{ik}}{D_{ik}}}{2\pi\epsilon_0}$$

потенциальные коэффициенты и уравнения Максвелла, где  $h_i$  — средняя высота подвеса провода над землей, определяемая из формулы

$$h_1 = h_0 - \frac{2}{3}f$$

где  $h_0$  — высота подвеса провода на промежуточной опоре;

$f$  — стрела провеса провода в пролете;

$D_{ik}$  — расстояние между проводом ( $i$ ) и его зеркальным отображением

(k)

Уравнение Максвелла, связывающие потенциалы и заряды, имеют вид:

$$\varphi_1 = a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + a_{13}Q_3$$

$$\varphi_2 = a_{21}Q_1 + a_{22}Q_2 + a_{23}Q_3$$

$$\varphi_3 = a_{31}Q_1 + a_{12}Q_2 + a_{13}Q_3$$

Для горизонтального расположения проводов справедливы следующие равенства:

$$a_{11} = a_{22} = a_{33}$$

$$a_{12} = a_{21} = a_{23} = a_{32}$$

$$a_{13} = a_{31}$$

Решив приведенную систему уравнений относительно зарядов, получим:

$$Q_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3$$

$$Q_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3$$

где  $\beta_{ii}$ -коэффициенты емкости;

$\beta_{ik}$ -коэффициенты электростатической индукции.

Эти коэффициенты могут быть выражены через потенциальные коэффициенты, полученные на основе общей зависимости [Л-16]:

$$\beta_{ik} = \frac{(-1)^{i+k} M_{ki}}{\Delta}$$

$$\beta_{11} = \frac{a_{22}a_{33} - (a_{23})^2}{\Delta} \quad \beta_{22} = \frac{a_{11}a_{33} - (a_{13})^2}{\Delta}$$

$$\beta_{33} = \frac{a_{11}a_{22} - (a_{12})^2}{\Delta} \quad \beta_{12} = \frac{a_{13}a_{23} - a_{22}a_{33}}{\Delta}$$

$$\beta_{31} = \beta_{13} = \frac{a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}}{\Delta} \quad \beta_{23} = \beta_{32} = \frac{a_{13}a_{12} - a_{23}a_{11}}{\Delta}$$

$$\Delta = a_{11}[a_{22}a_{33} - (a_{23})^2] - a_{12}(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) - a_{13}(a_{13}a_{32} - a_{12}a_{23})$$

где  $\Delta$  — определитель системы уравнений (68а) (см. П-29);

$M_{ki}$  — минор, полученный вычеркиванием из определителя  $k$ -й строки и  $i$ -го столбца.

Рабочие емкости фаз находят по уравнениям:

$$C_1 = \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} - \frac{3}{2}(\beta_{12} - \beta_{13})$$

$$C_2 = \beta_{22} + \beta_{21} + \beta_{23} - \frac{3}{2}(\beta_{21} + \beta_{23})$$

$$C_3 = \beta_{33} + \beta_{31} + \beta_{32} - \frac{3}{2}(\beta_{31} - \beta_{32})$$

В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) для линий электропередач ПО и 220 кВ корона устраняется применением проводов сечением не меньше, чем у АС-50 и АС-240, поэтому потери на корону учитываются для указанных сечений только в высокогорных районах, а для обычных районов — начиная с 330 кВ и более. Потери на корону не должны, превышать 2—5% от активных потерь в самом проводе. При дожде потери в линиях электропередач напряжением 500 кВ могут достигать 50—100 квт/км, при гололеде 10—15 квт/км, в хороших условиях 0.1—0,5 квт/км.

В качестве примера рассмотрим широко известную, формулу Пика. Потери отнесены к одному проводу на 1 км длины трёхфазной линии с

симметрично расположенными проводами, а напряжение принято фазное действующее:

$$\Delta P_k = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (U_\phi - U_0)^2 10^{-5} \text{ кВт/км}$$

где  $f$  — частота переменного тока, Гц;

$\delta$  — относительная плотность воздуха;

$r$  — радиус провода, см;

$D$  — расстояние между проводами, см;

$U_0$  — условное напряжение, называемое критическим и определяемое из зависимости.

$$U_0 = E_0 r \ln \frac{D}{r}$$

или из формулы

$$U_0 = 21,2 \delta m_1 m_2 r \ln \frac{D}{r} \text{ кв действ.},$$

где  $m_1 = (0,98—0,83)$  — коэффициент негладкости провода;

$m_2 = 0,8$  — коэффициент ненастной погоды.

Критическое линейное напряжение может быть получено из выражения

$$U_0 = 84,6 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D}{r} \text{ кв действ.},$$

Потери на корону наступают при равенстве линейного или фазного напряжения линии, соответствующему критическому линейному или фазному напряжению, и возрастают при увеличении действительного напряжения над критическим.

При расположении проводов в горизонтальной плоскости корона на крайних проводах возникает при напряжениях на 6 % больших, а на среднем проводе на 4% меньших критического, определяемых по зависимостям.

Потери на корону во всех трех проводах при частоте переменного тока 50 Гц определяются из выражения:

$$\Delta P_k = \frac{0,18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U_0)^2 \text{ [кВт/км]}$$

где  $U$  и  $U_0$  — соответствующие линейное и критическое напряжения.

Таким образом, расчет проводов линии иа корону сводится к определению критического напряжения и установлению наличия или отсутствия короны из соотношения:

при  $U < U_0$  потерь на корону нет;

при  $U > U_0$  потери имеют место.

После чего по формуле производят расчет величины потерь на корону.

Эффективным средством снижения потерь на корону является применение расщепленных проводов на два, три и даже четыре провода в каждой фазе.

Эквивалентный радиус расщепленного провода можно получить из формулы:

$$r_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[n]{r_0 a^{n-1}} \text{ [см]}$$

где  $r_0$  — радиус одиночного провода;

$n$  — число проводов в расщепленной фазе;

$a$  — расстояние между проводами в расщепленной фазе, см.

Большое практическое применение имеет расчет короны для системы, состоящей из двух коаксиальных цилиндров, т. е. имеющих совмещенные оси. В одних случаях, когда конструкция представляет собой цилиндрический конденсатор, задачей расчета является недопустимость возникновения короны, в другом случае, например в установках по очистке дымовых газов, используется именно эффект короны.

Для расчета напряженности электрического поля, при которой между цилиндрами возникает устойчивая корона, используется зависимость

$$E_k = 31\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{ кв макс./см}$$

Расчет критического напряжения, при котором у поверхности внутреннего цилиндра создается критическая напряженность электрического поля, производится по формуле:

$$U_k = E_k \ln \frac{R}{r} \text{ [кв. макс]}$$

где  $R$ ,  $r$  — соответственно радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

Приведенные зависимости по своей структуре близки к формулам (65—70).

Дуговой разряд является одной из форм самостоятельного разряда, т. е. разряда, происходящего без воздействия внешних ионизаторов на газовый промежуток. Дуговой разряд характеризуется большой плотностью тока (250—500 а/см<sup>2</sup>) в свободной и 6—18 ка/см<sup>3</sup> в обдуваемой дуге, высокой температурой газа 5000—10 000° К в центральной зоне дугового столба и очень малой величиной напряженности электрического поля 15—50 в/см, при которой поддерживается устойчивая ионизация газа в промежутке.

Дуговой разряд при нормальном атмосферном давлении сопровождается интенсивным световым и тепловым излучением.

С увеличением тока напряжение на участке дуги падает, так как рост тока приводит к увеличению сечения канала дуги и к усилению процессов термоионизации газа и термоэлектронной эмиссии с поверхности раскаленного катода.

Одновременно с процессом ионизации в газовом промежутке происходит и деионизация, т. е. нейтрализация зарядов, способствующая охлаждению дуги.

Для расчета напряжения, обеспечивающего поддержание дуги в воздушном промежутке длиной  $l \gg 100$  см при нормальном давлении, предложена зависимость

$$U_{\text{дуги}} = 62 + l \left( 11.4 + \frac{32.6}{i} \right) \text{В},$$

где  $i$  — ток в канале дуги, а;

$l$  — длина дуги, см.

При переменном токе создавшаяся дуга может погаснуть при переходе тока через нулевое значение или повторно зажечься. Это зависит от скорости восстановления электрической прочности  $E_t$  промежутка и роста

напряженности электрического поля, создаваемого восстанавливающимся напряжением  $E$ . Дуга гаснет, если  $E_t > E$ .

Быстрое увеличение прочности дугового промежутка наблюдается при горении дуги в узких щелях или при интенсивном перемешивании раскаленной плазмы с холодным газом. Этот принцип нашел применение в конструкциях трубчатых разрядников и высоковольтных выключателях с воздушным и масляным дутьем.

В высоковольтных линиях электропередачи дуга может появиться после искрового перекрытия линейной изоляции под действием волны грозового перенапряжения. Через созданный дуговой канал замыкается высокочастотный ток колебательного контура, образованного емкостью провода и индуктивностью контура. При переходах этого тока через нулевое положение ионизация промежутка поддерживается рабочим напряжением, и дуга может восстановиться.

Скорость нарастания прочности промежутка, в котором горела дуга, зависит от ее длины, величины тока молнии, конструкции линейной изоляции, вдоль которой произошел разряд, а также от атмосферных условий.

В электрических системах напряжением до 35 кВ включительно нейтраль сети изолирована и дуговое замыкание на землю и приводит к отключению линии защитой. В таких сетях дуга может существовать длительно и для ее гашения необходимо принимать специальные меры.

Наиболее распространенным средством борьбы с дугой является кратковременное отключение линий или компенсация емкости проводов индуктивностями, включенными в нейтраль питающих сеть трансформаторов.

Открытой дугой называют электрическую дугу в воздухе, не подвергающуюся никаким специальным воздействиям, ускоряющим процесс ее угасания.

Дуга может возникнуть между концевыми вертикальными или горизонтальными электродами (рис. 18.1, а, б) либо между протяженными горизонтальными или вертикальными электродами (рис. 18.1, в, г). Удлинение дуги может произойти от действия ветра, восходящих конвекционных потоков воздуха или под действием электродинамических сил самой дуги. Основным фактором самопроизвольного угасания дуги является ее длина. Длина дуги, при которой она безусловно гас\* нет, при данной величине тока, называется критической.

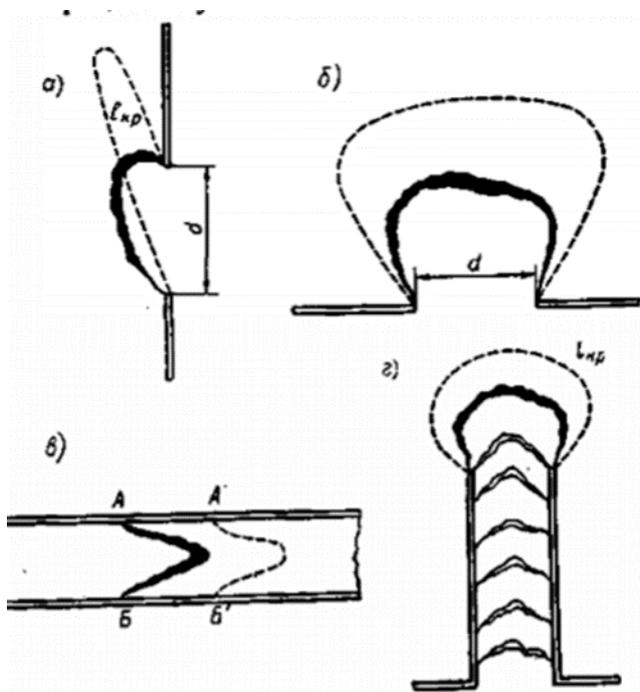


Рисунок 5.3 – Схемы горения электрической дуги в воздухе: а — вертикальные электроды, б — горизонтальные электроды, в — горизонтальные протяженные электроды, г — вертикальные протяженные электроды

При оценке условий успешного угасания открытой дуги существенное значение имеют форма и расположение электродов.

При вертикальном расположении электродов критическая длина дуги может быть в пять, а при горизонтальном расположении в двадцать раз длиннее расстояния между ее опорными точками. Отсюда можно сделать

вывод: горизонтальная дуга гаснет значительно легче дуги, горящей между вертикальными электродами.

При увеличении длины дуги увеличивается отвод от нее энергии в виде тепловых и световых излучений. Дуга гаснет – когда отводимая энергия станет больше подводимой. Ток, устанавливающийся в момент баланса энергий, называется критическим током дуги.

Критический ток составляет 20—40% от начальной величины тока короткого замыкания.

Средняя напряженность электрического поля в столбе дуги при начальных токах 100—1000 А определяется при достижении ею критической длины из соотношения

$$E_{cp} = \frac{U}{l_{кр}} [2 - 3]$$

Критическая длина дуги зависит от тока короткого замыкания, т. е. от величины сопротивления цепи. При этом между током короткого замыкания, напряжением и критической длиной дуги существует определенная связь:

а) для чисто активного сопротивления в цепи

$$l_{(R)кр} = \frac{l_{к.з}^n U}{C} \cdot \frac{n^n}{n + 1^{n+1}}$$

б) для цепи, содержащей только реактивное сопротивление,

$$l_{(x)кр} = \frac{l_{к.з}^n U}{C} \cdot \frac{n^{\frac{n}{2}}}{n + 1^{\frac{n+1}{2}}}$$

где  $C$  — постоянная величина, равная 100 для значений токов 500—6000 А;

$n$  — постоянная, равная 0,25 для токов в тех же пределах.

После подстановки данных величин имеет для критической длины дуги и критического тока следующие зависимости:

Для сети с активным сопротивлением

$$l_{(x)кр} = 0.08 U I_{к.з}^{0.25}$$

$$l_{(x)кр} = 0,2I_{к.з}$$

для сети с реактивным сопротивлением

$$l_{(x)кр} = 0,1UI_{к.з}^{0,25}$$

$$l_{(x)кр} = 0,45I_{к.з}$$

где  $I_{к.з}$  — действующее значение тока короткого замыкания, а.

Выше было отмечено, что (напряженность в канале дуги равна 2—3 кв/м, более точно ее определяют из зависимости

$$E = 12,5 + 34I^{-0,4} \text{ в/см}$$

где  $I$  — амплитуда тока короткого замыкания, А.

При эксплуатации линий чаще всего возникают однофазные замыкания проводов на землю, при этом дуга горит между проводом и элементом заземленной опоры. При пофазном отключении с помощью АПВ поврежденной линии дуга должна погаснуть, однако через ионизированный канал продолжают протекать емкостные токи оставшихся под напряжением проводов (рис. 19).

Эти токи замедляют деионизацию промежутка, на котором в момент отрыва дуги восстанавливается напряжение  $V_x$ , определяемое из соотношения (79).

Предположим, что при отключении поврежденной фазы дуга в точке замыкания на землю погасла, и, следовательно, ее сопротивление стало близким к бесконечности. Тогда можно написать зависимости для напряжений двух образующихся контуров (фаза 3—2 — земля) и (фаза 1—2 — земля):

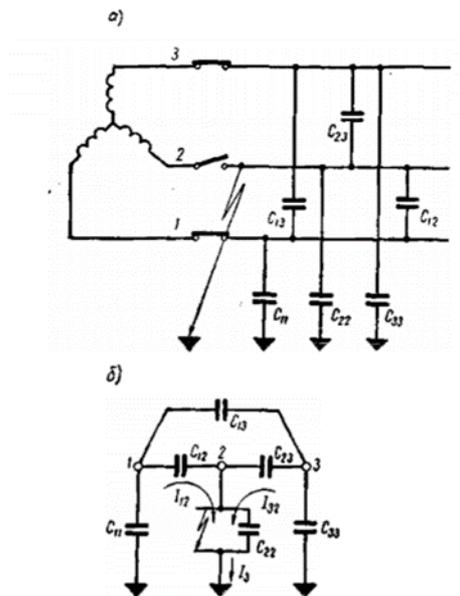


Рисунок 5.4 – Схема сети с по фазным АГТВ  $C_{\phi}$  и схема протекания емкостных токов при обрыве дуга в выключателе (б)

$$\left. \begin{aligned} U_{\phi(3)} &= U_{32} + U_x \\ U_{\phi(1)} &= U_{12} + U_x \end{aligned} \right\}$$

где  $U_{32}$  и  $U_{12}$  — напряжения на емкостях  $C_{32}$  и  $C_{12}$

$U_x$  — искомое восстанавливающееся напряжение на участке погасшей дуги, кв. действ.

Так как

$$U_{32} = \frac{I_{32}}{\omega C_{32}}$$

$$U_{12} = \frac{I_{12}}{\omega C_{12}}$$

$$U_x = \frac{I_{32}}{\omega C_{23}}$$

и полагая, что  $C_{32}=C_{12}$  и  $I_2=I_{32}+I_{12}$ , из зависимости (78) получим

$$U_{\phi(3)} + U_{\phi(1)} = U_{32} + U_{12} + 2U_x = \frac{I_{32} + I_{12}}{\omega C_{32}} + 2U_x =$$

$$= \frac{I_3}{\omega C_{32}} + 2U_x = \frac{U_x \omega C_{32}}{\omega C_{32}} + 2U_x,$$

Откуда

$$U_{\phi} = U_x \left( \frac{C_{22}}{C_{23}} + 2 \right)$$

полагая, что

$$\frac{C_{22}}{C_{23}} \approx 5$$

окончательно имеем

$$U_x = 0.14U_\phi$$

Считая, что в контуре действует только реактивное сопротивление, можно, задаваясь величиной вероятного остаточного тока, соответствующего глухому (металлическому) замыканию фазы на землю, на каждые 100 линии оценить критическую длину дуги, используя соотношение

$$l_{(x)кр} = 0.1U_x I_{к.з}^{0.25}$$

Токи замыкания на землю принимаются равными 2 А для 110 кВ, 4 А для 220 кВ и 10 А для 500 кВ.

Предположив, что дуга горела вдоль гирлянды линейных изоляторов с длиной  $K$ , можно установить факт самопогасания дуги из условия  $l_{(x)кр} < \lambda$  при осуществлении пофазного отключения линии с помощью АПВ

### ***Задания:***

#### ***Задание №1***

Определить среднегодовые потери активной мощности на корону для линии напряжением 525 кВ, выполненной проводом 2ХАСУ-240/300, если продолжительность ясной погоды  $T_x$  — 7000 ч, а ненастной погоды  $T_d = 1760$  ч. 83 Расположение проводов горизонтальное с расстоянием между ними 10,5 м. Средняя высота подвеса провода 13 м, шаг расщепления 30 см, относительная плотность воздуха — 1. Радиус провода 1,12 см. Расчет произвести с помощью обобщенных характеристик.

#### ***Задание №2***

Линия электропередачи длиной 100 км выполнена на металлических опорах с гирляндами изоляторов 12хП-4,5, имеющих длину 2 м. В результате атмосферного перенапряжения произошло перекрытие гирлянды. Установить

по критической длине дуги условие ее горения или самопогасания, если после отключения поврежденной фазы линии с рабочим напряжением 230 кВ остаточный ток емкостной проводимости равен 4 А. В расчете учитывается только реактивное сопротивление. Соотношение между частичными емкостями проводов смежных фаз и фазы на землю принять равным 0,2.

### ***Задание №3***

Устройство по очистке дымовых газов котельной состоит из системы цилиндрических труб диаметром 16 см. По оси каждой из этих труб натянут цилиндрический провод с диаметром 4 мм. Определить критическую напряженность электрического поля и критическое напряжение, при которых появится общая корона, если относительная плотность воздуха 0,92.

### ***Задание №4***

Для воздушной линии электропередачи трехфазного тока с линейным напряжением 115 кВ применены провода М-70 с расчетным диаметром 10,6 мм. Провода расположены равносторонним треугольником с расстоянием между ними 400 см. Коэффициент негладкости 0,85, относительная плотность воздуха 1, частота тока 50 Гц. Определить, во сколько раз увеличатся потери мощности на корону в линии при ненастной погоде (коэффициент погоды 0,80) по сравнению с потерями при ясной погоде.

### ***Задание №5***

Линия электропередачи протяженностью 100 км с рабочим напряжением 115 кВ сооружена на металлических опорах с гирляндами изоляторов 7хП-4,5, общей длиной 126 см. В результате атмосферного перенапряжения произошло перекрытие одной из гирлянд. Установить условие горения или самопогасания дуги, если после отключения поврежденной фазы остаточный емкостный ток равен 2а, а соотношение между частичными емкостями  $\frac{C_{22}}{C_{23}} = 5$

### ***Задание №6***

Определить критическое напряжение и максимальную напряжённость электрического поля на поверхности провода линии передачи с номинальным напряжением 220 кв. Провода марки АС-300 расположены в горизонтальной плоскости с расстоянием между ними 7 м. Погода ясная, атмосферные условия нормальные, (коэффициент негладкости витого провода 0,85, диаметр провода 24,2 мм.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что следует понимать под критической длиной дуги и под критическим током дугового разряда?
2. Как влияет расположение электродов и их конструкция на условия самопогасания открытой дуги?
3. При каких условиях имеет место самопогасание открытой дуги переменного тока при однофазном замыкании на землю?
4. Какое влияние на восстановление прочности промежутка оказывает ширина щели, в которой горела дуга

### ***Список литературы:***

#### ***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

#### ***Перечень дополнительной литературы***

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

## ***Практическая работа №6***

***Тема:*** Перекрытие твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности

***Цель:*** Изучить понятия перекрытия изоляции, скользящие разряды и перенапряжения на воздушных линиях.

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– понятие перекрытия изоляции и условия возникновения скользящих разрядов

***уметь:***

– определять и напряжение перекрытия проходного изолятора

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости получения навыков расчета напряжения перекрытия изоляции.

***Теоретическая часть:***

Твердая высоковольтная изоляция, разделяющая токоведущие части, имеет ограниченные размеры и заключена в изолирующую среду, которой является воздух или трансформаторное масло.

Под действием разности потенциалов между проводящими частями во всех изолирующих средах устанавливается электрическое поле. Вектор напряженности этого электрического поля в каждой точке можно условно разложить по отношению к поверхности раздела на составляющие  $E_n$  и  $E_1$ . Первый из этих векторов направлен перпендикулярно к разделяющей поверхности, а второй — по касательной.

Используя аналогию с преломлением световых лучей, можно доказать, что при переходе вектора напряженности из одной среды в другую он подчиняется закону преломления.

Если граница раздела двух изолирующих сред не расположена нормально к силовым линиям электрического поля, то вектор напряженности электрического поля испытывает при переходе в смежную среду преломление так, что отношение угла падения  $\alpha_1$  к углу преломления  $\alpha_2$  равно отношению относительных диэлектрических проницаемостей соприкасающихся сред. При этом тангенциальные составляющие преломляющегося и преломленного векторов равны между собой  $E_{1t} = E_{2t}$ , а нормальные составляющие подчиняются соотношению:

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}$$

Нормальная составляющая вектора напряженности электрического поля является причиной сквозного пробоя изоляции, а тангенциальная — причиной разряда вдоль поверхности. Завершенная форма последнего называется перекрытием изоляции. Перекрытие не приводит к разрушению изоляции и только кратковременно нарушает ее изолирующие свойства. Достаточная для перекрытия напряженность электрического поля зависит от формы и состояния поверхности диэлектрика, степени ее загрязненности, увлажнения и неравномерности электрического поля.

Для перекрытия изоляции в условиях неравномерного поля величина средней напряженности электрического поля 0,1— 0,2 кВ/мм может оказаться достаточной, а в равномерном — 0,6—0,8 кВ/мм и более. Если перекрытие происходит вдоль поверхности  $l$ , то напряжение перекрытия определится зависимостью

$$U_{\text{пер}} = \int_0^1 E_t dl = E_{t(\text{ср})} l$$

Конструктор, изменяя форму поверхности изоляции, может, в зависимости от ее назначения, predeterminedить форму разряда, направляя его по пути пробоя или перекрытия.

На рис. 6.1 приведены контуры изоляторов, перекрытие которых затруднено.

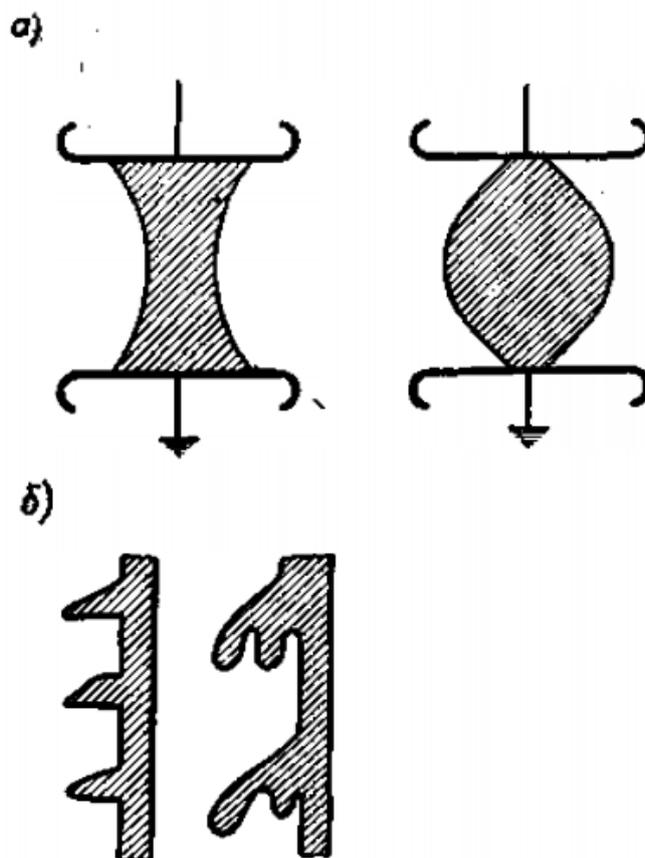


Рисунок 6.1 – Примеры форм трудно перекрываемых поверхностей изоляторов

В линиях, находящихся под кратковременным перенапряжением, перекрытие гирлянд наступает при напряжении в 1,5—2 раза меньшем пробивного. Таким образом, перекрытие технически используется как своеобразное средство защиты изоляции от пробоя.

При достаточно больших расстояниях между электродами или при наличии искусственно развитой поверхности, затрудняющей перекрытие, разряд вдоль поверхности может принять устойчивую форму скользящего разряда.

Скользкий разряд в этих случаях предшествует перекрытию, сопровождается короной у электродов и имеет вид прорастающих кистей или искровых побегов, оставляющих на поверхности органической изоляции следы в виде выжженных борозд.

Рассмотрим явления, происходящие при поверхностном и скользком разрядах. Пусть задан воздушный промежуток между двумя плоскими электродами, пробивная прочность которого определена. Введем в промежуток фарфоровый или стеклянный цилиндр, пробивная прочность которого значительно выше прочности воздушного зазора. Казалось бы, что при этом прочность промежутка между электродами увеличится.

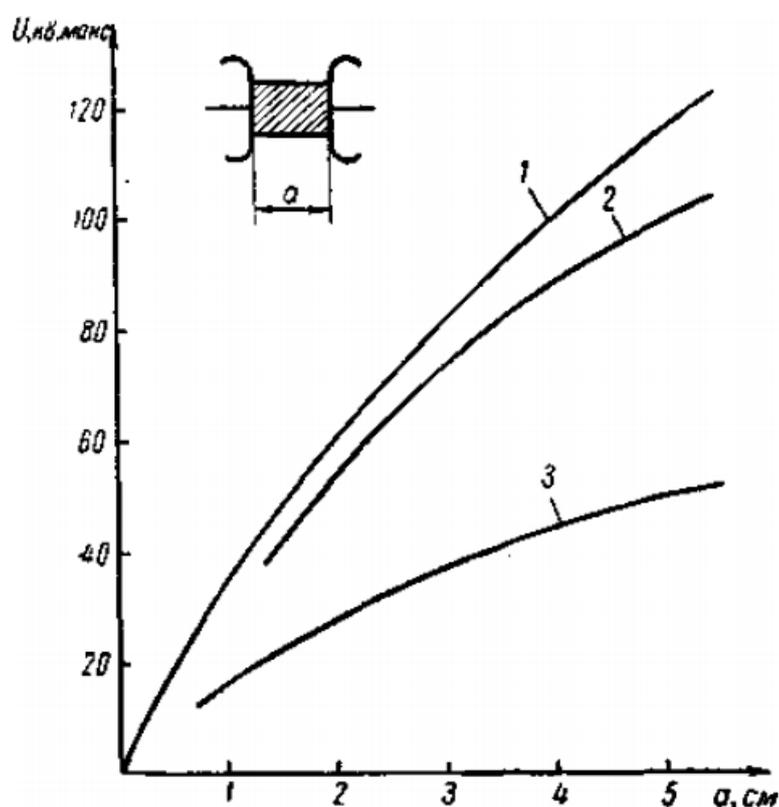


Рисунок 6.2 – Разрядные напряжения между плоскими электродами: 1-но воздуху; 2 — по поверхности пар 3 — по поверхности стекла

Опыт, однако, показывает, что разряд по поверхности твердого диэлектрика наступает при напряжении, меньшем первоначально заданного, так как присутствующие в воздухе положительные и отрицательные ионы перераспределяются в объеме. Отрицательные ионы связываются

поверхностью твердой изоляции, а положительные располагаются в виде облака над слоем отрицательных ионов. Под действием нормальной составляющей вектора напряженности электрического поля эти ориентированные слои стремятся сблизиться, резко увеличивая напряженность поля у поверхности изолятора. При наличии влаги процесс усиливается, а при импульсном воздействии ослабевает.

Если в описанном опыте фарфор заменить стеклом, парафином или другими материалами, то, в зависимости от адсорбирующей способности этих материалов, напряжение, необходимое для перекрытия или возникновения скользящих разрядов, будет изменяться.

Представлены опытные характеристики разрядных напряжений воздуха и вдоль поверхностей стекла и парафина, заключенных между жесткими электродами.

Исследованиями установлено, что поверхность твердого диэлектрика, покрытая адсорбированными отрицательными ионами, является по отношению к ионному облаку своеобразной обкладкой конденсатора, что позволило ввести понятие удельной поверхностной емкости  $C_0$  ф/см<sup>2</sup>

В результате многочисленных опытов установлено, что напряжение, при котором начинается скользящий разряд, зависит от величины этой емкости:

$$U_{ск} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{C_0^{0,44}} \text{ кв действ}$$

Здесь  $C_0$  — поверхностная удельная емкость, определяемая для цилиндрических тел зависимостью

$$C_0 = \frac{C}{2\pi r_2 l} = \frac{\varepsilon 2\pi l}{2\pi r_2 l \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\varepsilon}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\varepsilon 7,7 \cdot 10^{-14}}{D \lg \frac{D}{d}} [\text{ф/см}^2]$$

где  $D$  и  $d$  - соответственно наружный и внутренний диаметры цилиндрического изолятора, см.

### ***Задания:***

#### ***Задание №1***

Определить напряжение возникновения скользящих разрядов для цилиндрического изолятора с наружным диаметром 7 см, диаметром токоведущей части 3 см и относительной диэлектрической проницаемостью изоляции 5,5.

#### ***Задание №2***

Цилиндрический диск из гетинакса толщиной 0,2 см и диаметром 6 см зажат между стержневыми электродами. Определить напряжение пробоя и перекрытия и дать заключение о возможности осуществления пробоя в воздушной среде, если напряженность электрического поля перекрытия принята 4,5 кВ/см, а пробоя — 20 кВ/мм.

#### ***Задание №3***

Конденсаторный ввод имеет десять слоев бакелитовой изоляции толщиной 3 мм со станнолиевыми прокладками между слоями. Определить напряжение возникновения скользящих разрядов вдоль ввода, если относительная диэлектрическая проницаемость изоляции 4,5, а напряжение между слоями распределяется поровну.

#### ***Задание №4***

Цилиндрический проходной изолятор имеет три слоя изоляции: бакелитовую, масляную и фарфоровую. Электрические емкости отдельных слоев соответственно равны  $10 \cdot 10^{-14}$  ф/см<sup>2</sup>,  $20 \cdot 10^{-14}$  ф/см<sup>2</sup> и  $10^{-18}$ . Определить, при каком напряжении между фланцем и токоведущим стержнем появится скользящий разряд по поверхности.

#### ***Задание №5***

Образец слоистой изоляции с диэлектрическими проницаемостями слоев, равными 3 и 8, помещен в равномерное электрическое поле с

напряженностью в 10 кв/см. Вектор этой напряженности пересекает линию раздела (рис. 6.2) под углом  $45^\circ$ . Определить нормальную и тангенциальную составляющие напряженности электрического поля в каждом из слоев.

***Контрольные вопросы:***

1. Объясните разницу в понятиях: пробой, перекрытие и скользящий разряд. 90
2. Почему внешняя поверхность изоляторов для наружной установки делается ребристой?
3. Сформулируйте определение поверхностной емкости применительно к цилиндрическому изолятору.
4. Сформулируйте основные положения закона преломления вектора напряженности электрического поля.
5. Поясните, почему затруднено перекрытие изоляторов, имеющих развитую или вогнутую форму?
6. Как следует поставить опыт пробоя подвешенного изолятора, если известно, что перекрытие по поверхности изолятора в воздухе наступает при напряжении, значительно меньшем пробивного?
7. Какое влияние на величину напряжения перекрытия может оказать покрытие полупроводящей глазурью поверхности изолятора?

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

### *Перечень дополнительной литературы*

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

## *Практическая работа №7*

**Тема:** Тепловой и электрический пробой

**Цель:** Изучить условия возникновения тепловых и электрических пробоев.

**Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:**

Обучающийся должен:

**знать:**

– условия возникновения пробоев и их типы

**уметь:**

– определять напряжение пробоя и пороговые напряжения в изоляции

**Формируемая компетенция:** ПК-1

**Актуальность темы:**

Заключается в необходимости

**Теоретическая часть:**

Под пробоем твердого диэлектрика понимают местное разрушение изоляции, происходящее под действием сил электрического поля.

В отличие от пробоя жидкой или газовой среды, в которых нарушение изолирующих свойств является временным состоянием, при пробое твердой изоляции проводящий канал в ней сохраняется и после снятия напряжения.

Многочисленные опыты показывают, что в твердой изоляции могут быть две формы пробоя: электрический и тепловой.

Электрический пробой наступает в тот момент, когда нормальная составляющая вектора напряженности электрического поля достигает предельного для данной изоляции значения.

Величины средней пробивной напряженности электрического поля для наиболее употребительных изоляционных материалов приведены в П-6.

Признаками электрического пробоя являются:

- а) постоянство пробивного напряжения независимо от температуры диэлектрика;
- б) отсутствие видимого нагрева изоляции дугой в месте пробоя при быстром снятии напряжения;
- в) малая длительность времени, необходимая для формирования пробоя;
- г) зависимость величины пробивного напряжения от формы электродов, т. е. от степени неоднородности поля;
- д) независимость амплитуды пробивного напряжения от частоты и рода тока.

При изменении толщины диэлектрика, находящегося в неравномерном электрическом поле, величина пробивного напряжения определяется из квадратичной зависимости [Л-2]:

$$U_{\text{пр}(2)} = U_{\text{пр}(1)} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$$

где  $U_{\text{пр}(2)}$  — пробивное напряжение, определенное опытным путем, для образца произвольной толщиной  $a_1$ ;

$U_{\text{пр}(1)}$  — пробивное напряжение для образца толщиной.

Напряжение электрического пробоя может быть рассчитано, исходя из табличных значений пробивной напряженности, по формулам для определения напряженности электрического поля в конденсаторах простейших конструкций. Например, для конденсатора цилиндрической конструкции справедлива зависимость:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} r \cdot 2,3 \lg \frac{R}{r}$$

где  $E_{\text{пр}}$  находится по П-б,

Если твердый диэлектрик подвергнуть длительному воздействию напряжения, величина которого недостаточна для электрического пробоя, но близка к ней (85—90%), то в нем под действием токов сквозной

проводимости будет выделяться тепло, отвод которого затруднен. Под действием местного разогрева структура диэлектрика изменяется, проводимость возрастает и прогрессирующий нагрев вызывает прожигание или оплавление изоляции. Пробой такой формы называется тепловым пробоем.

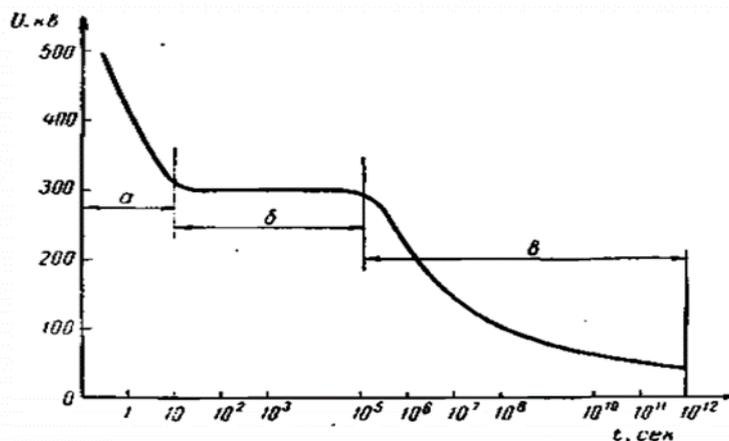


Рисунок 7.1 – Характеристика пробивного напряжения для твердой изоляции: а — область импульсного пробоя; б — область электрического пробоя; в — область теплового пробоя

Напряжение, при котором происходит тепловой пробой, зависит от физических свойств самого диэлектрика, его структуры, наличия в нем неоднородностей и от внешних условий отвода тепла.

При профилактических испытаниях изоляции повышенным напряжением появление теплового пробоя нежелательно, поэтому длительность испытания ограничивается одной или пятью минутами.

Представлена вольтсекундная характеристика пробоя твердой изоляции (электрокартон) и выделены области теплового и электрического пробоев. Формулы для расчета напряжения, вызывающего тепловой пробой, предложены академиками В. А. Фоком и Н. Н. Семеновым [Л-9] и рассматриваются в курсе «Электроматериалы».

Напряжение, при котором наступает тепловой пробой твердых диэлектриков при воздействии постоянного тока, оказывается несколько больше напряжения переменного тока, так как в последнем случае имеют

место диэлектрические потери, вызывающие дополнительный разогрев материала.

В толще твердых слоистых материалов могут оказаться воздушные включения, в которых при повышенном напряжении развивается ионизационный процесс, способствующий пробую.

### ***Задания:***

#### ***Задание №1***

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляторного фарфора при  $0^\circ \text{C}$  составил 0,8%, а при температуре  $83^\circ \text{C}$  — 1,6%. Определить коэффициент возрастания потерь, если они изменяются по экспоненциальному закону.

#### ***Задание №2***

Потери мощности в бакелитовой изоляции при температуре  $50^\circ \text{C}$  равны  $6 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см} \cdot \text{В}^2$  а при температуре  $90^\circ \text{C}$  возросли до  $30 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см} \cdot \text{В}^2$ . Определить коэффициент возрастания потерь в диэлектрике

#### ***Задание №3***

Определить пробивное напряжение изоляции одножильного кабеля с диаметром жилы 15,3 мм и толщиной изоляции 10 мм, если пробивная напряженность электрического поля для изоляции равна 300 кВ/см.

#### ***Задание №4***

Определить пробивное напряжение для электрокартона толщиной 1,5 мм, если известно, что при испытании в условиях неравномерного полей образец толщиной 0,8 мм пробивается при напряжении 3,5 кВ.

#### ***Задание №5***

Определить напряжение теплового пробоя для цилиндрического бакелитового изолятора, имеющего радиус токоведущего стержня 2,0 см и

наружный радиус изоляции 3 см. Частота тока 50 Гц, относительная диэлектрическая проницаемость 4,5, тангенс угла диэлектрических потерь 0,04, коэффициент возрастания потерь 0,045, удельная теплопроводность бакелита  $1,5 \cdot 10^{-3}$  Вт/см • град, коэффициент теплопередачи от электродов к воздуху  $0,001$  Вт/см<sup>2</sup>\*град.

***Контрольные вопросы:***

1. Какое влияние оказывает влага на величину напряжения, при котором возникают скользящие разряды?
2. В справочных таблицах приводятся данные пробивной прочности изоляции при одноминутном испытании. Как объяснить указание на продолжительность испытания?
3. Почему величина напряжения теплового пробоя зависит от частоты и температуры диэлектрика?
4. Чем объясняется изменение коэффициента перед корнем в формулах теплового пробоя?
5. При каких условиях теплового баланса происходит переход от электрического пробоя к тепловому?
6. Почему в газовом и жидком диэлектриках после пробоя восстанавливаются изолирующие свойства, а в твердом нет?
7. Как будет меняться средняя пробивная напряженность электрического поля твердого диэлектрика при увеличении его толщины?

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>



### *Перечень дополнительной литературы*

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

## ***Практическая работа №8***

***Тема:*** Расчет заземляющих устройств

***Цель:*** Приобретение навыков расчета ЗУ

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– схемы защитного заземления

***уметь:***

– дать характеристику электроустановки, для которой производится расчет заземления и определять способ заземления нейтрали трансформатора

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости выбора защитного заземления

***Теоретическая часть:***

Безопасность обслуживающего персонала, нормальная работа аппаратов и защита высоковольтных установок от перенапряжений невозможна без создания заземляющих устройств.

В зависимости от назначения различают:

а) рабочее заземление, к которому относят заземление нейтралей трансформаторов, дугогасящих катушек и аппаратов, определяющих общий режим работы электроустановки;

б) заземление безопасности, к которому относят заземление кожухов приборов и аппаратов;

в) грозозащитное заземление, к которому относят заземление тросов и стержневых молниеотводов, опор и разрядников.

Основу заземляющего устройства составляют заземлители, т. е. металлические элементы, находящиеся непосредственно в грунте, и заземляющие провода (спуски), доступные для осмотра.

Основными характеристиками заземляющего устройства являются сопротивление  $R_3$  растеканию тока промышленной частоты и сопротивление  $R_3$  и растеканию импульсных токов грозового разряда.

Величина нормированного сопротивления растеканию тока промышленной частоты находится в пределах 0,5—25 ом.

Исследования показывают, что характер распределения тока в почве зависит от его частоты, удельного сопротивления грунта, линейных размеров и взаимного расположения заземлителей.

При расчетах заземления используются формулы, определяющие величину сопротивления растеканию тока применительно к заданной форме заземлителя.

Электрический ток, растекаясь в почве в момент поражения установки грозным разрядом или при пробое изоляции токоведущих частей, создает вдоль своего пути падение напряжения, которому соответствуют определенные потенциалы на поверхности земли. При этом точки поверхности, расположенные на расстоянии 20 м и более от заземлителя или места замыкания на землю, практически имеют нулевой потенциал.

Наивысшим или полным потенциалом  $U_n$  будут обладать все точки, имеющие металлическую связь с заземлителем.

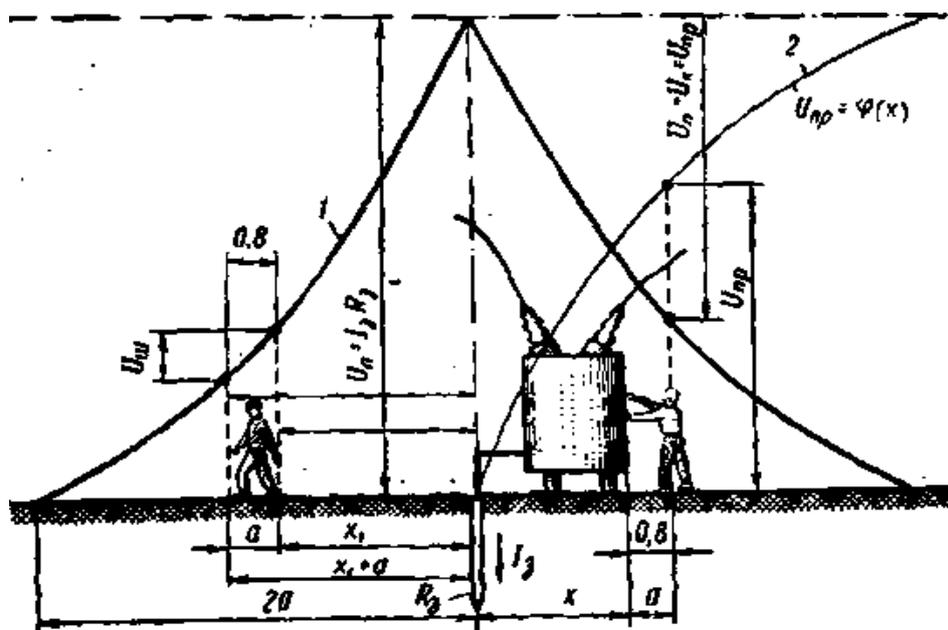


Рисунок 8.1 – Потенциальная характеристика (1) и напряжение прикосновения при одиночном стержневом заземлителе (2)

Отношение полного потенциала к величине тока, протекающего через заземлитель, определяет собой сопротивление растеканию тока данного заземления

$$R_3 = \frac{U_n}{I_3}$$

где  $U_n$  — полный потенциал, кв,

$I_3$  — ток-в заземлителе, ка.

На рис. 8.1 показано распределение потенциала на поверхности земли или потенциальная характеристика (1) для одиночного стержневого заземлителя.

Полный потенциал и характеристика распределения напряжения по радиусу от оси заземлителя определяют собой важные величины с точки зрения безопасности обслуживающего персонала:

1) шаговое напряжение  $U_{ш}$ , под которым подразумевают ту наибольшую разность потенциалов, которую имеют ступни человека, оказавшиеся на расстоянии 0,8 м друг от друга по радиусу от центра заземлителя;

2) напряжение прикосновения  $U_{пр}$ , т. е. наибольшее напряжение между поверхностью заземленного аппарата (к которому в момент разряда может прикоснуться человек) и точками поверхности земли на расстоянии 0,8 м.

Расчет заземляющего устройства носит поверочный характер в том случае, когда схема заземления задана или носит чисто расчетный характер, когда по заданной величине нормированного сопротивления создается его схема.

Во всех случаях при расчете необходимой величиной является удельное сопротивление грунта  $\rho$  *ом·см*, причем наиболее желательными являются результаты непосредственных измерений. Примерные величины удельных сопротивлений грунтов даны в П-14. Величины удельных сопротивлений подвержены сезонным изменениям, причем наибольшее влияние оказывают влажность, температура, степень промерзания, наличие солей.

Чем глубже расположен заземлитель, тем стабильнее оказывается сопротивление грунта и лучше условия для растекания тока, поэтому заземлители располагают так, чтобы верхняя кромка вертикальных заземлителей или уровень горизонтальных находились на глубине 0,5—1,0 м от поверхности, а ниже — от 3 до 20 м.

Чтобы исключить вероятность повышения удельного сопротивления, в расчетах используется удельное сопротивление, полученное непосредственным измерением  $\rho_{ном}$  на данном участке, умноженное на коэффициент сезонности  $\psi$ , учитывающий возможность высыхания грунта:

$$\rho_{расч} = \rho_{изм}\psi$$

Приближенное значение коэффициента сезонности принимается 1,4—1,8 для горизонтальных заземлителей, уложенных на глубине 0,5 м, и 1,2—1,4 для вертикальных заземлителей длиной 2—3 м, причем, если во время

измерения удельного сопротивления земля сухая, то принимается меньшее значение, а если почва влажная — большая величина.

***Задания:***

***Задание №1***

Стержневой трубчатый заземлитель диаметром 5 см и длиной 2 м забит в грунт, имеющий расчетное удельное сопротивление  $1 \cdot 10^4$  Ом·см. Определить величину сопротивления растеканию токов в статическом режиме для случая, если заземлитель забит до уровня земли, и для случая его заглубления на 0,5 м.

***Задание №2***

Кольцевой заземлитель выполнен из троса диаметром 1 см и заглублен в грунт на 0,5 м. Расчетная величина удельного сопротивления грунта  $2 \cdot 10^4$  Ом·см. Диаметр кольца 12 м. Определить сопротивление заземлителя без учета связей.

***Задание №3***

Металлическая опора высоковольтной линии рис. 8.2 имеет монолитный железобетонный фундамент, металлический каркас которого может быть принят за полусферу с радиусом 1 м. Расчетная величина удельного сопротивления грунта в месте заложения фундамента  $0,5 \cdot 10^4$  Ом·см. Определить сопротивление заземления, полный потенциал опоры и шаговое напряжение для стандартного шага 0,8 м, если ток разряда молнии, поражающего опору, 100 кА, а шаговое напряжение определяется между точками поверхности земли, удаленными на 2 и 2,8 м от центра заземлителя.

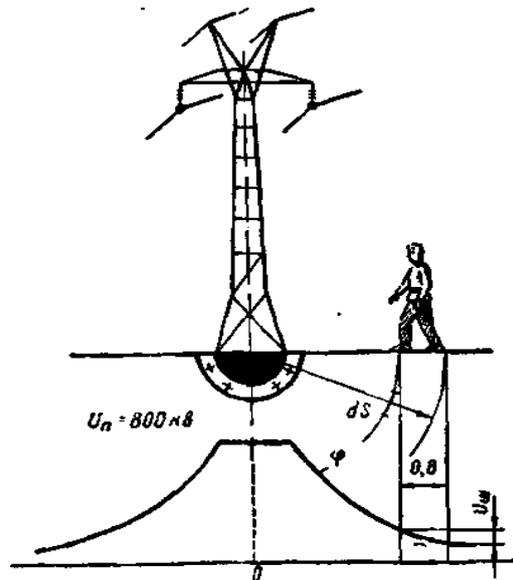


Рисунок 8.2

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется шаговым напряжением и от каких параметров зависит его величина?
2. Что называется напряжением прикосновения и от каких параметров зависит его величина?
3. С помощью каких средств можно снизить величину напряжения прикосновения?
4. Для каких грунтов целесообразно применять протяженные горизонтальные заземлители?

**Список литературы:**

**Перечень основной литературы**

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

### *Перечень дополнительной литературы*

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

## ***Практическая работа №9***

***Тема:*** Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты

***Цель:*** Получение навыков расчета сопротивления растекания тока промышленной частоты

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение растекания тока и сопротивление искусственного заземления

***уметь:***

– проводить расчет сопротивления растекания тока промышленной частоты

***Формируемая компетенция:*** ПК-1

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости получения навыков расчета сопротивления растекания тока промышленной частоты

***Теоретическая часть:***

При конструировании заземляющих устройств, как правило, используются стандартные элементы: трубы, уголковая или полосовая сталь, стальные провода и тросы.

Для всех этих элементов выведены расчетные формулы сопротивления растеканию тока промышленной частоты, учитывающие линейные размеры элементов и глубину их заложения;

а) для трубы диаметром  $d$  или уголковой стали с шириной полки  $b$  и длиной  $l$  без заглубления в грунт верхней кромки

$$R_{\text{д}} = \frac{\rho}{2\pi d} \ln \frac{4l}{d}$$

б) для трубы или уголкового стали, заглубленных в грунт на глубину  $t$  от поверхности земли до середины элемента

$$R'_{\text{д}} = \frac{\rho}{2\pi d} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$$

в) для троса диаметром  $d$ , заложенного в грунт на глубину  $t$  и имеющего вид протяженного заземлителя

$$R_{\text{а.д}} = \frac{2,3\rho}{2\pi d} \lg \frac{l^2}{dt}$$

г) для полосовой стали или круглого провода в виде кольца с диаметром  $D$  и заглублением в грунт на  $t$ :

$$R_{\text{а.п}} = \frac{2,3\rho}{2\pi^2 D} \lg \frac{8\pi D^2}{dt};$$

$$R_{\text{к.п.д}} = \frac{2,3\rho}{2\pi^2 D} \lg \frac{4\pi D^2}{dt};$$

д) для полосовой стали шириной  $b$ , заложенной в грунт на глубину  $t$ , при общей длине полосы  $l$ :

$$R_{\text{п}} = \frac{2,3\rho}{2\pi d} \lg \frac{2l^2}{dt}$$

**Примечание.** Для стержневых заземлителей используются трубы или уголкового стали длиной 2—3 м, с диаметром или шириной полки 35—70 мм, а для полосовых заземлителей — полосовая сталь толщиной не менее 4 мм и сечением не менее 100 мм<sup>3</sup>.

Величины сопротивлений растеканию тока промышленной частоты для стержневого и полосового заземлителей даны в П-15. и П-16.

Требования, предъявляемые к заземляющему устройству а отношении величины сопротивления (0,5—10 ом, см. П-17), в большинстве случаев не могут быть удовлетворены одиночным заземлителем.

Практически для получения приемлемых величин сопротивления создают сложный заземлитель, состоящий из  $n$  параллельно соединенных одиночных заземлителей. Можно было бы предположить, что общее сопротивление такого сложного заземлителя будет в  $n$  раз меньше сопротивления каждого элемента, что в случае их однотипности соответствовало бы формуле

$$R_{\text{сисò}} = \frac{R_3}{n}$$

На самом деле, при использовании сложного заземлителя поля растекания токов с отдельных электродов перекрывают друг друга и сопротивление всего заземлителя оказывается больше предполагаемого. Увеличение сопротивления сложных заземлителей учитывается коэффициентом использования  $\eta$ .

Значения коэффициентов использования зависят от конструктивного выполнения сложного заземлителя и для горизонтальных и вертикальных заземлителей приведены в приложениях П-18 и П-19.

Расчетная формула для сложного заземлителя из полосовых однотипных заземлителей с учетом взаимного экранирования имеет вид:

$$R_{\text{сисò}} = \frac{R_{\text{ап}}}{n\eta}$$

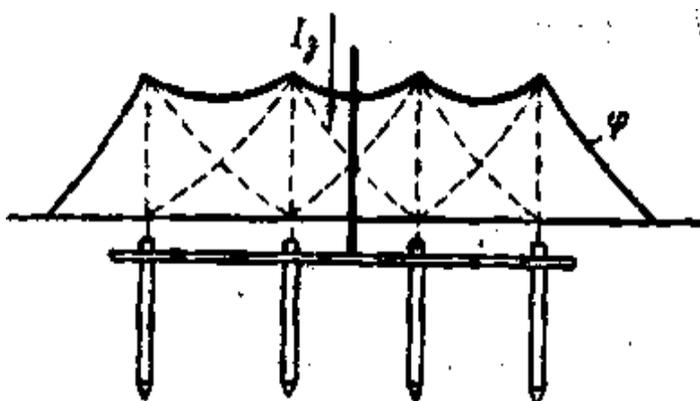


Рисунок 9.1 – Характер потенциальной кривой для сложного заземлителя

Для сложного заземлителя, состоящего из  $n$  вертикальных электродов и объединяющих их горизонтальных,

$$R_{\text{сис}\delta} = \frac{R_{\bar{a}} \frac{R_{\epsilon}}{n}}{\frac{R_{\epsilon}}{n} + R_{\bar{a}}} \cdot \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$$

где  $\eta_{\Sigma}$  —принимается для конкретной схемы всего заземлителя (см. П-20).

Не менее важным следствием использования сложных заземлителей в высоковольтных установках, кроме снижения общего сопротивления, является повышение потенциала на участках между электродами. Общее выравнивание потенциала (см. рис. 9.1) значительно снижает шаговое напряжение и напряжение прикосновения в зоне наиболее вероятного нахождения обслуживающего персонала.

### ***Задания:***

#### ***Задание №1***

Горизонтальный двухлучевой заземлитель с подводом тока в среднюю точку и длиной каждого луча 10 м, проложен в грунте с удельным сопротивлением, измеренным в сухую погоду,  $1 \cdot 10^4$  Ом·см. Определить сопротивление заземляющего устройства в импульсном режиме, если ток молнии принят равным 100 кА. Заземлитель выполнен из стального прута диаметром 1 см. Глубина заложения заземлителей стандартная, равная 0,5 м.

#### ***Задание №2***

Кольцевой заземлитель, выполненный из полосовой стали шириной 4 см и толщиной 2,5 мм, имеет диаметр 4 м и заложен на глубине 0,5 м от поверхности. Расчетная величина удельного сопротивления грунта принята  $2 \cdot 10^4$  Ом·см. Кольцо замкнуто и имеет три связи, расположенные под углом

120°. Определить сопротивление заземлителя, если ток грозового разряда, поступающий в точку соединения связей, принят 40 кА. Проводимостью связей пренебрегаем.

### ***Задание №3***

Полосовой заземлитель выполнен из троса диаметром 1 см и длиной 17,5 м. Определить сопротивление растеканию тока промышленной частоты, если удельное сопротивление грунта (расчетное) принято  $1 \cdot 10^4$  Ом·см.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Изложите последовательность расчета импульсного сопротивления заземления при протекании токов грозового разряда.
2. Можно ли с определенностью сказать, что сопротивление заземления в импульсном режиме меньше его сопротивления токам промышленной частоты?

### ***Список литературы:***

#### ***Перечень основной литературы***

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

#### ***Перечень дополнительной литературы***

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>