

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

$\varphi_1''$  — 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.

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).

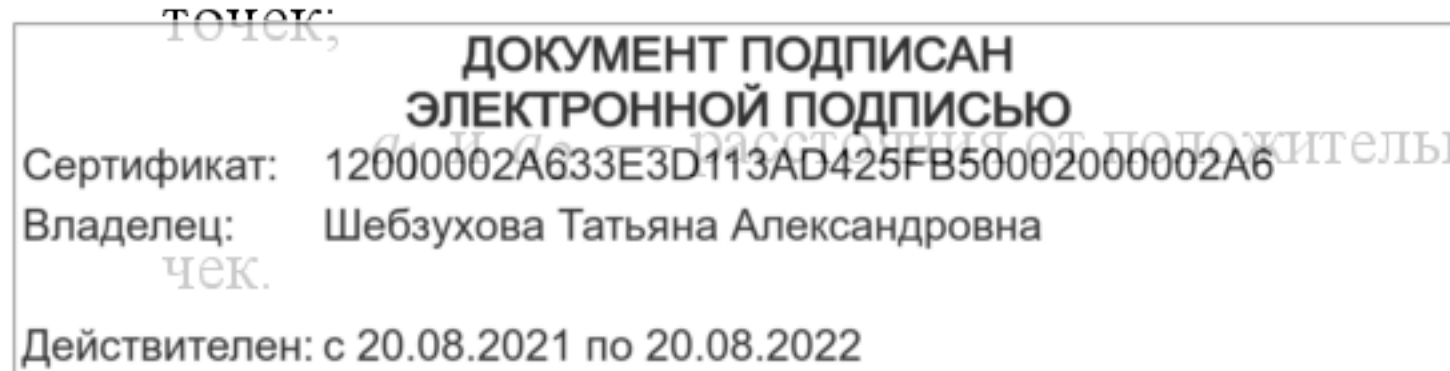
Электрические оси двух разноименно заряженных цилиндров находятся в точках пересечения прямой, соединяющей их геометрические центры, и вспомогательной окружности, с диаметром, равным отрезку между точками касания касательной, проведенной к поверхностям рассматриваемых цилиндров.

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;



от положительно заряженной оси А до соответствующих то-

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:

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

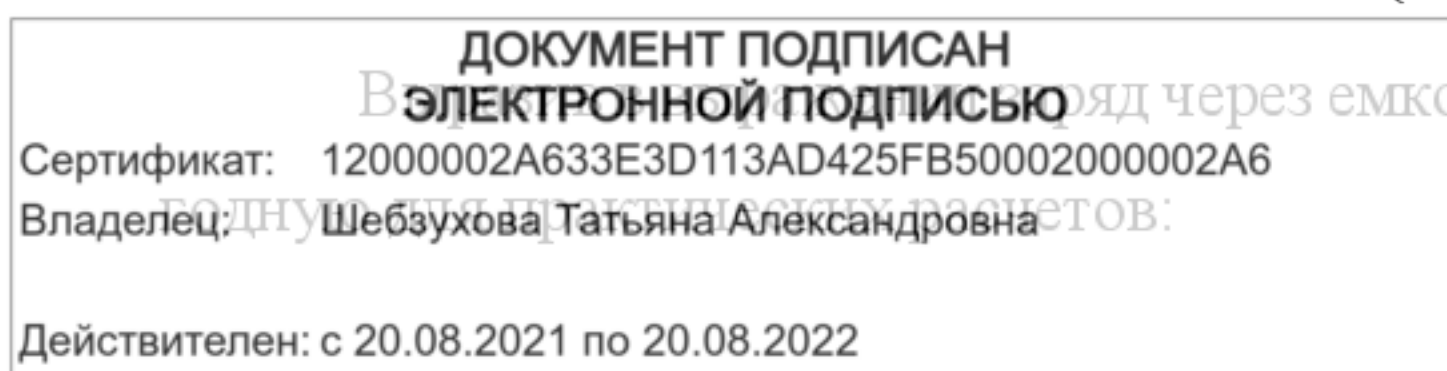
где  $d = a_1 + b_1 = a_2 + b_2$  — расстояние между центрами электрических осей.

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

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



Взяв за координату точки  $a_2$  и подставив в формулу для напряженности электрического поля, 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.

Задается 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

$$C_{\text{раб}} = C_{11} + 2C_{12}$$

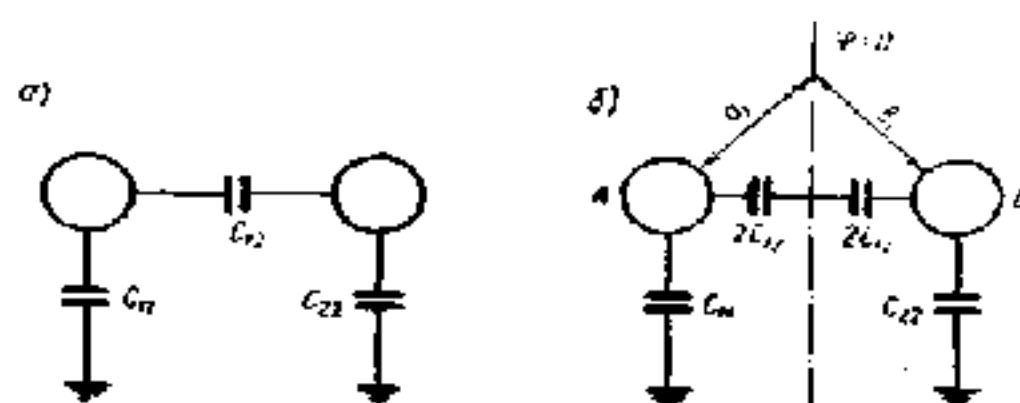


Рисунок 3.2 – Схема для расчета частичных емкостей двухпроводной линии: а — для расчета емкости линии; б — для расчета рабочей емкости провода

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

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

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

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

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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН**

**ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

емся формулой, а для получения емкости  $C_{11}$

и его зеркальным отображением воспользуемся 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:

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

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

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

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

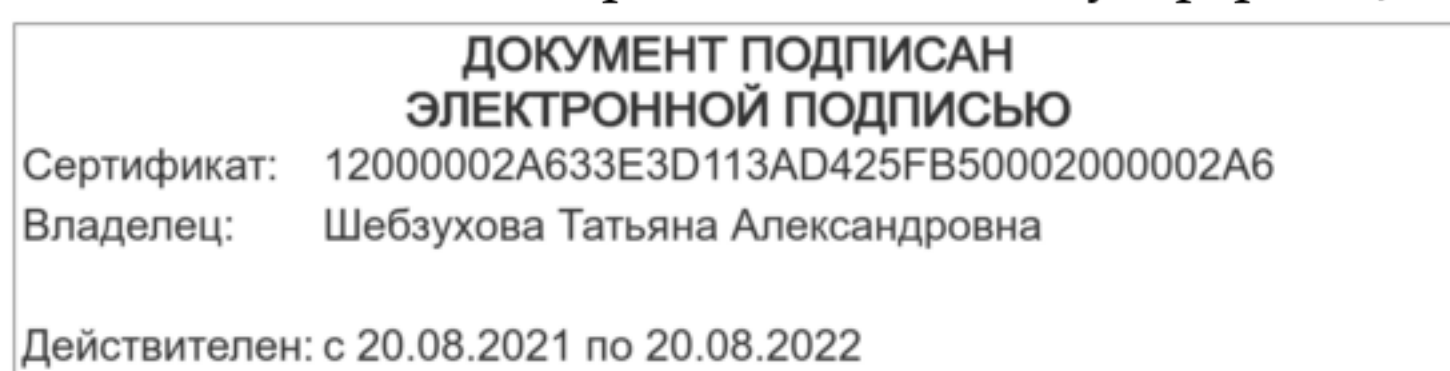
$$y_0 = \frac{1}{2} \left[ \frac{a}{r} + \sqrt{\left( \frac{a}{2} \right)^2 + 4} \right].$$

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

$$C = \frac{\epsilon_0 \pi a}{y_1 - 1} [\phi].$$

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***

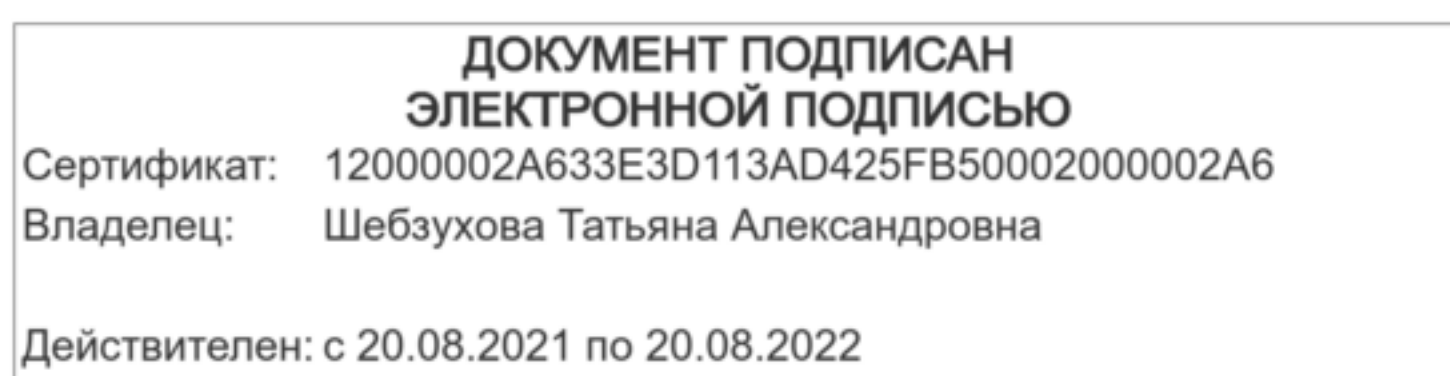
Определить пробивное напряжение между двумя изолированными шарами с радиусами 1 см, если расстояние между шарами 3 см, а значение пробивной напряженности электрического поля 30 кВ.

#### ***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  $E_{пр}=30 \text{ кВ/см}$ , радиус сферы 50 см, а расстояние до плоскости 40 см.

### **Задание №7**

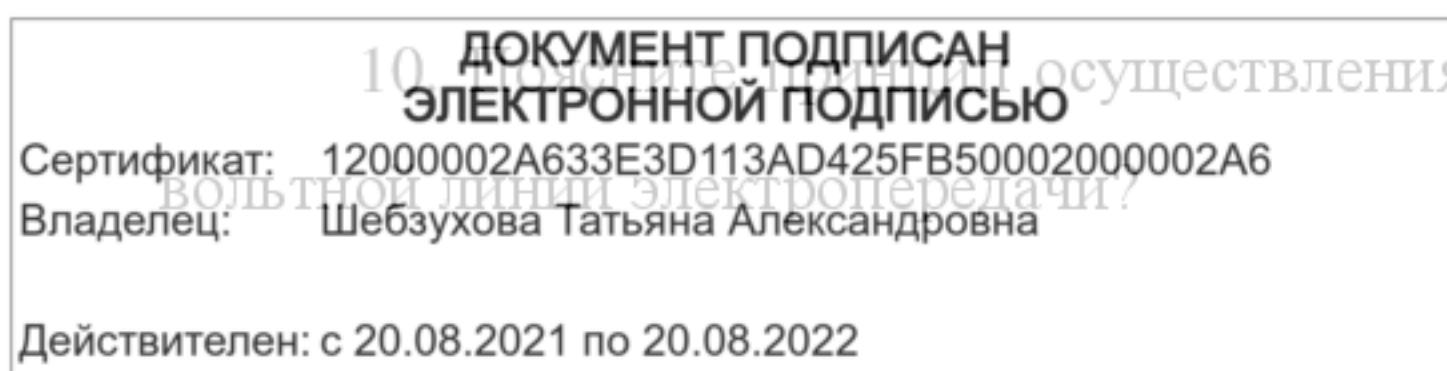
Определить: а) емкость между шаровыми электродами равного диаметра, находящимися в воздухе, если радиус их 10 см, а расстояние между ними 5 см, б) емкость между шаром и плоскостью при тех же условиях. В каждом случае один из электродов заземлен.

### **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?





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?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## **Практическая работа №4. Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде.**

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

### **Основы теории:**

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

|                                                   |                                        |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br/>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ</b> |                                        |
| Сертификат:                                       | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                         | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022          |                                        |

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



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

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

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

$$\alpha = A p e^{\frac{-U_n}{\lambda E}},$$

где  $U_n$  — 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  $\alpha$  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.

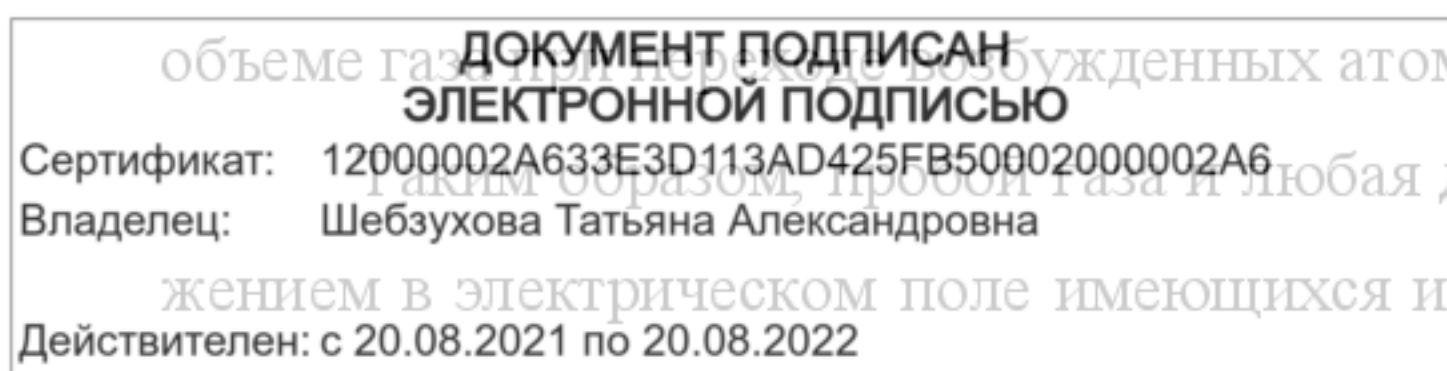
Число электронов, освобожденных при бомбардировке одним положительным ионом с поверхности катода, принято называть коэффициентом поверхностной ионизации  $\gamma$ .

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 газовой среды, освобожденных 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.

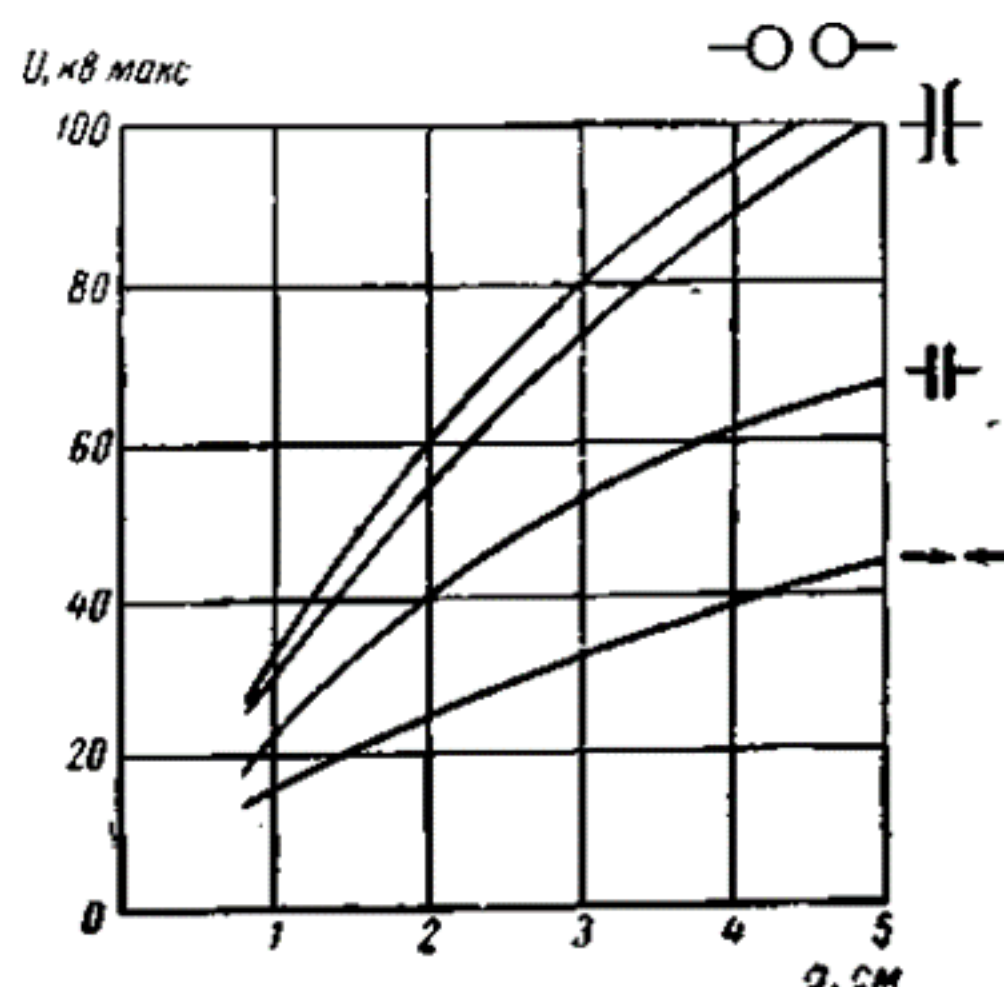


Рисунок 4.1 – Зависимость пробивного напряжения воздушного промежутка от формы электродов и расстояния между ними

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 электрической прочностью понимают величину средней пробивной напряженности электрического поля  $E_{пр}$  (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

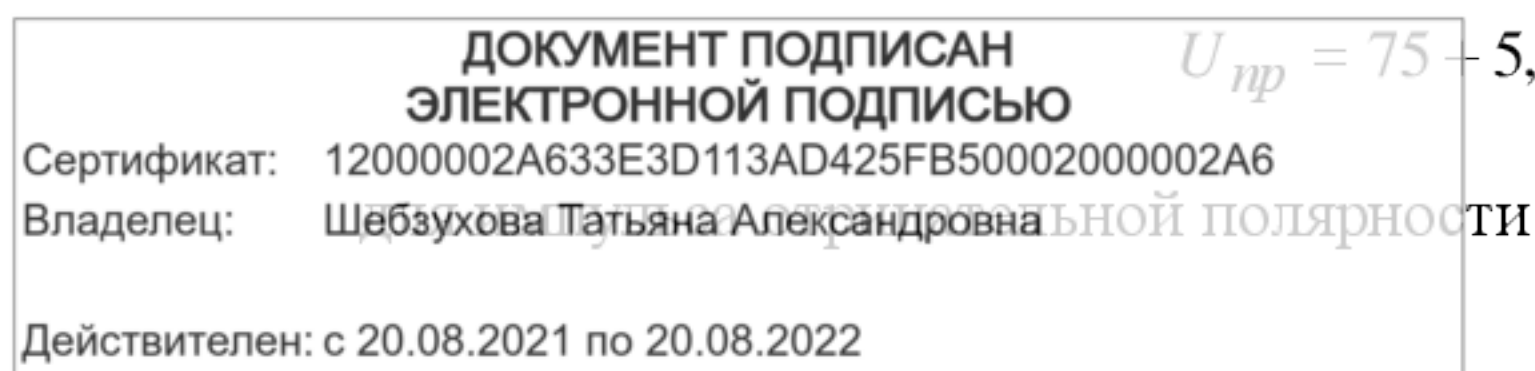
$$U_{np} = 15 + 3,8 \cdot a \text{ кВ действ.,}$$

если один электрод заземлен:

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

для импульса положительной полярности

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



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

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

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

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

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

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,  $^{\circ}\text{C}$ .

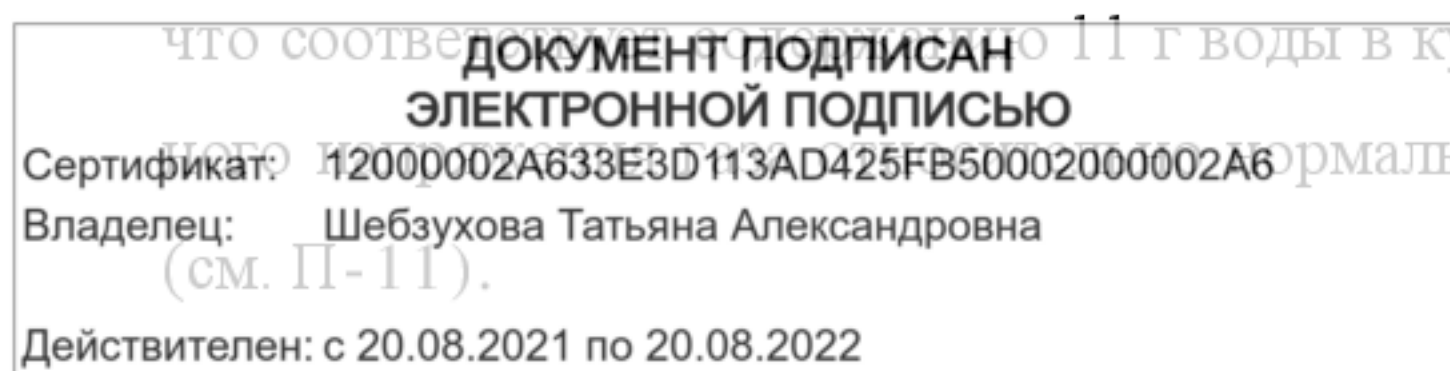
Пробивное напряжение прямо пропорционально коэффициенту  $\delta$ :

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

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  $\varphi\%$ . За нормальную влажность воздуха принята величина 65%,

что соответствует содержанию 11 г воды в кубическом метре воздуха. Изменение пробивных условий учитывается коэффициентом  $K$





Приближенно для частоты 50 гц и напряжения пробоя 141 кв макс и выше поправочный коэффициент К 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**

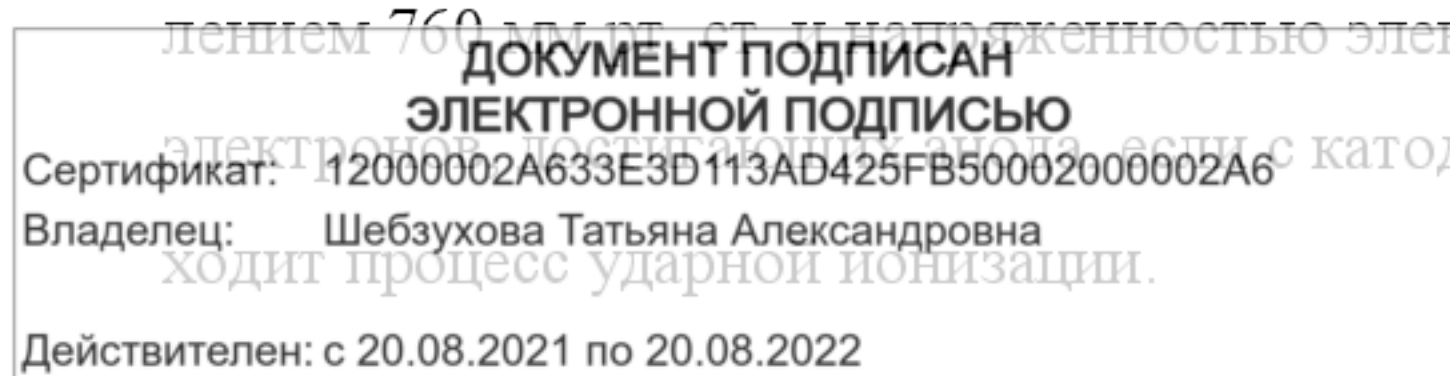
Расстояние между токоведущими выводами трансформатора типа ТДЦГ 90000/110 равно 120 см. Определить кратность перенапряжения, при котором происходит перекрытие этого промежутка, и коэффициент его импульсной прочности.

#### **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, покидающих анод, 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. Документ подписан ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                 | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022  |                                        |

1. Чем отличаются 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 промежуток 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?



## **Практическая работа №5. Основные формы разрядов в газах и их использование.**

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

### **Основы теории:**

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.

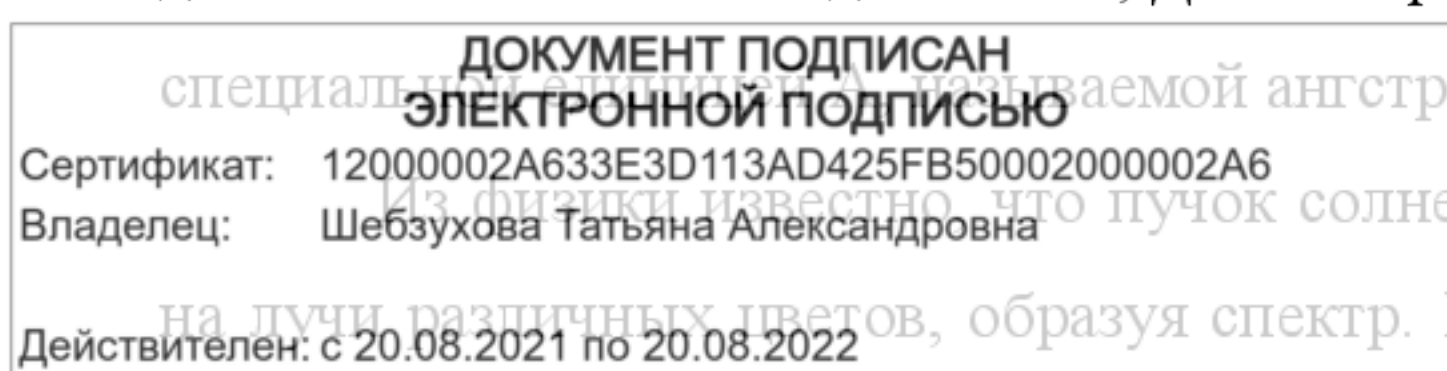
Тлеющий разряд возникает как устойчивая форма газового разряда при давлениях порядка 10—20 мм рт. ст. Этот разряд характеризуется малой плотностью тока 20—50 мА/см<sup>2</sup> большим перепадом напряжения вблизи электродов 200—400 В.

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



и равной 10<sup>-8</sup> см.

Каждому цвету соответствуют определённые



длины волн. Красному цвету, например, соответствуют электромагнитные колебания с длинами волн в пределах 6300—7700 А.

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;

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

$\Delta A$ -энергия излучения, эв.

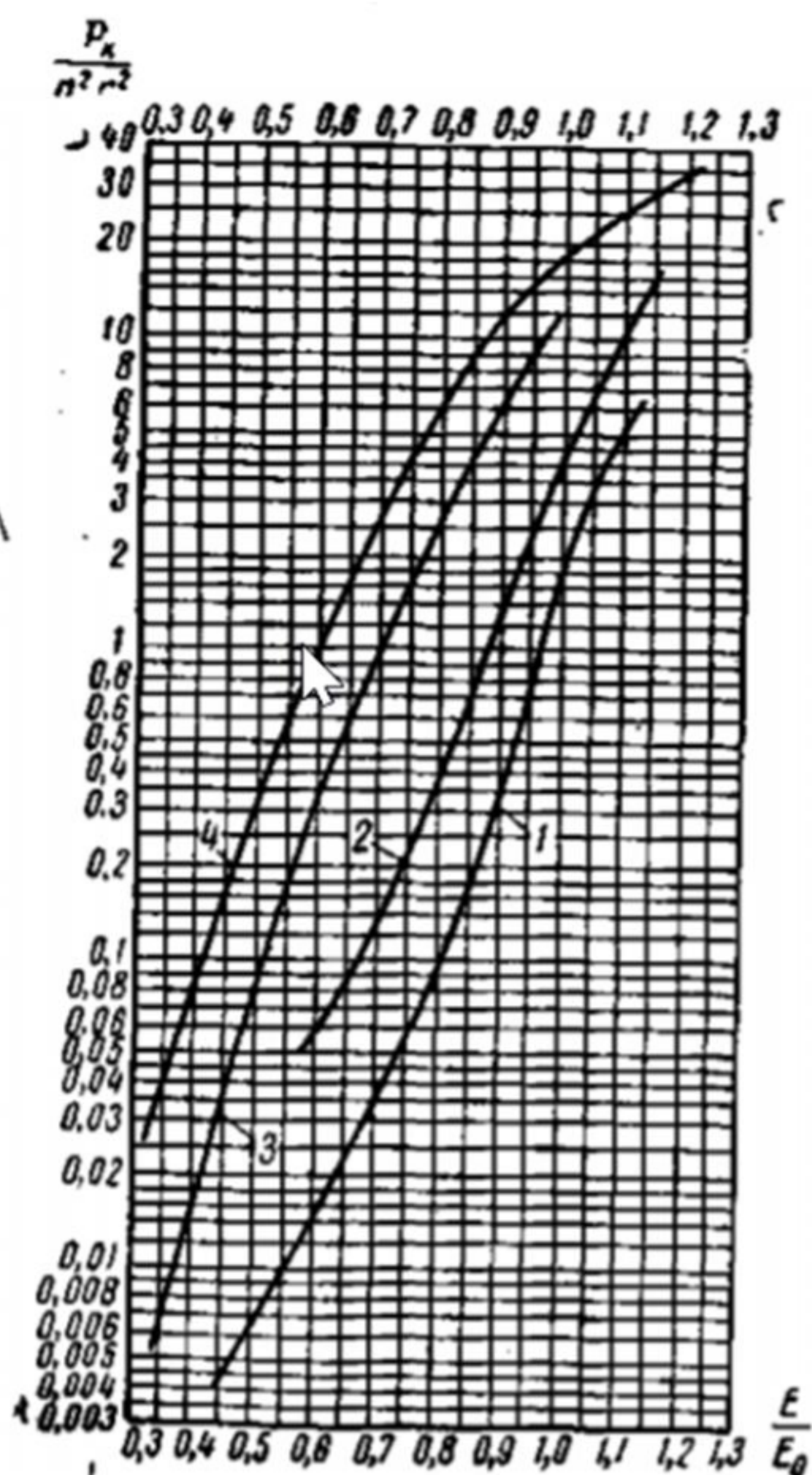


Рисунок 5.1 – Обобщённые характеристики потерь мощности на корону для раз-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 объемной 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.

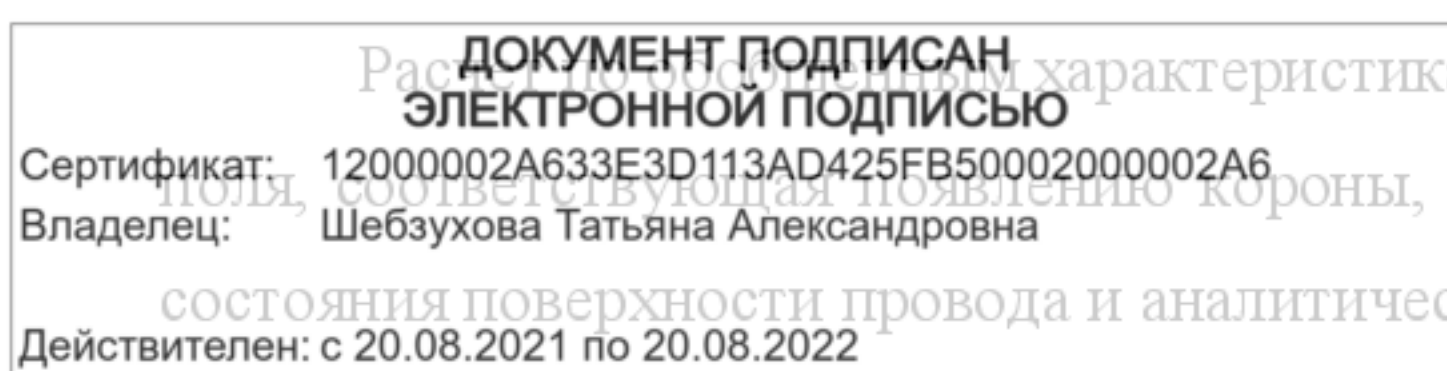
Кроме того, корона создает радиопомехи и вредно действует на изоляцию органического происхождения.

Положительную роль корона играет при возникновении грозовых 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 среднегодовых потерь активной мощности на корону производится по аналитическим зависимостям или с использованием обобщенных характеристик для каждого элемента погоды, полученных на основе произведенных измерений (рис. 16). 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.

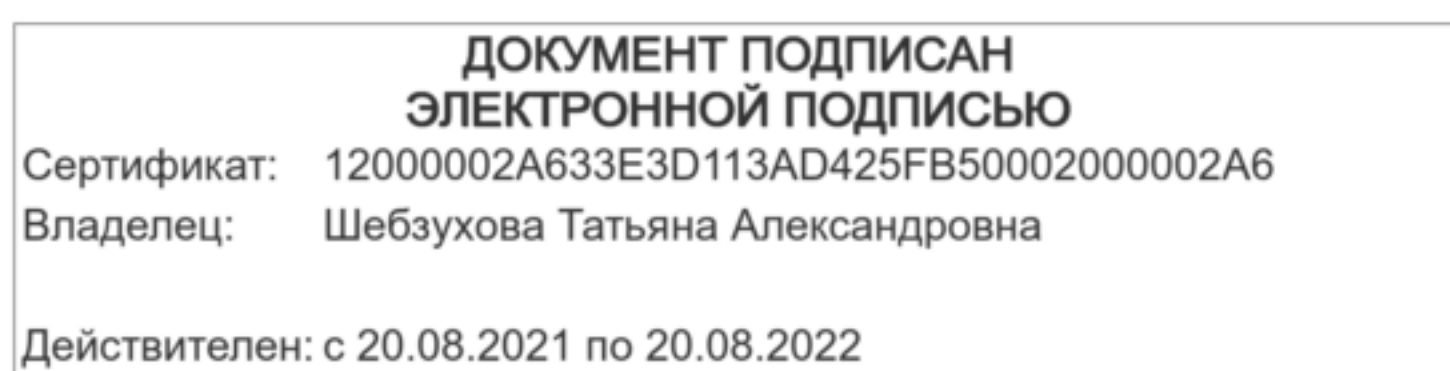
Установив необходимость произведения расчетов потерь на корону, следует воспользоваться обобщёнными характеристиками потерь мощности для различной погоды (ясно, снег, дождь, изморозь). Указанные характеристики графически определяют функциональную зависимость

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

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





$$P_k = \frac{n^2 r^2}{8760} \left\{ \left[ F_x \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_x \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_x \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] \delta_{cp}^2 T_x + \left[ F_d \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_d \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_d \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_d + \left[ F_c \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_c \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_c \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_c + \left[ F_{из} \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + F_{из} \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + F_{из} \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_{из} \right\} \text{ кВт/км},$$

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

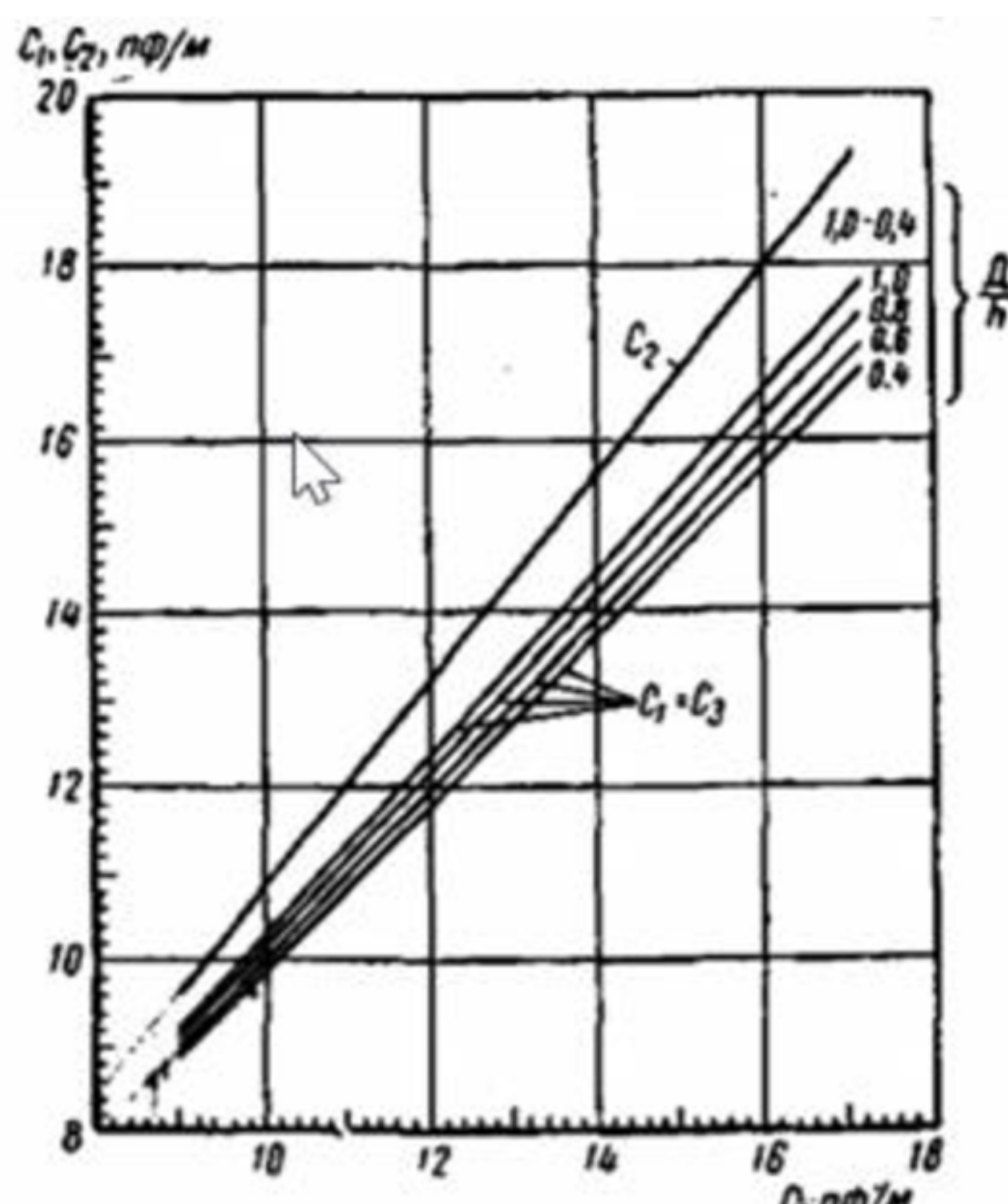


Рисунок 5.2 — Рабочие емкости линии электропередачи с горизонтальным расположением проводов:  $H$  — средняя высота провода над землей;  $D$  — расстояние между фа-

зами;  $C_2$  — емкость между фазами;  $C$  — средняя емкость транспонированной линии без 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:

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

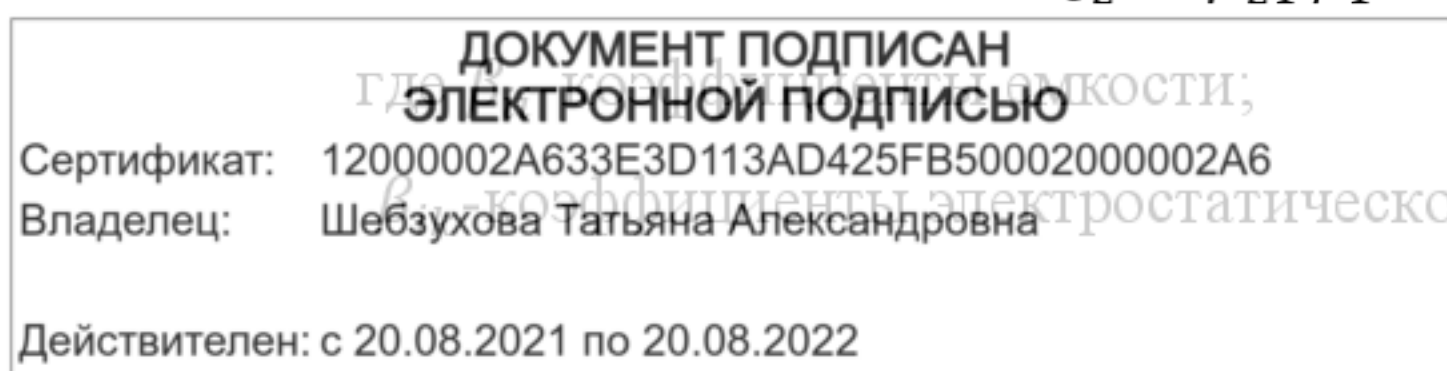
$$a_{12} = a_{21} = a_{23} = a_{32}$$

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

Решив приведенную систему уравнений относительно зарядов, получим:

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

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





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;

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



$U_0$  — 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 на 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 осями проводов в расщепленной фазе, см.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Будущее 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 ( $250—500 \text{ а/см}^2$ ) в свободной и  $6—18 \text{ ка/см}^3$  в обдуваемой дуге, высокой температурой газа  $5000—10\,000^\circ \text{ К}$  в центральной зоне дугового столба и очень малой величиной напряженности электрического поля  $15—50 \text{ в/см}$ , 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  $l \gg 100 \text{ см}$  при нормальном давлении, предложена зависимость

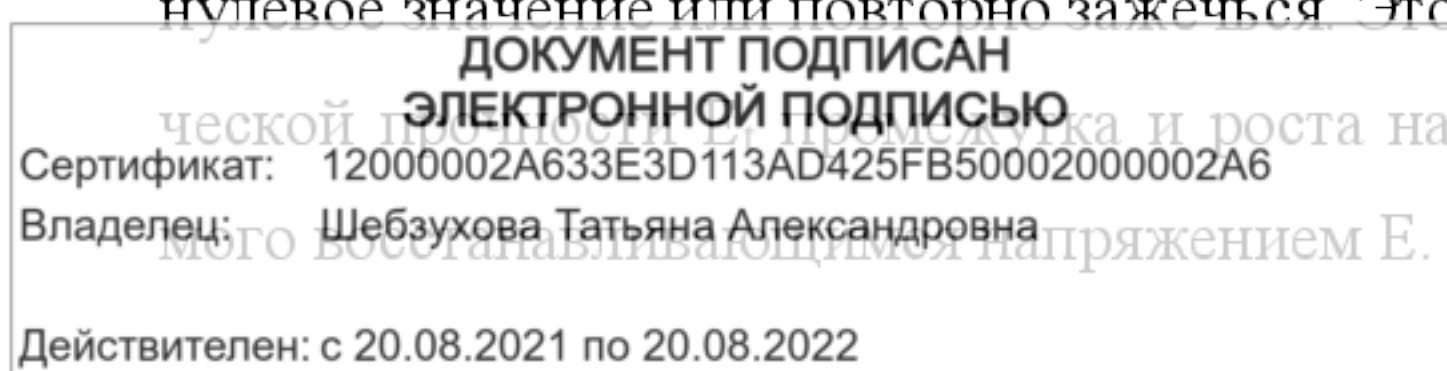
$$U_{\text{дуги}} = 62 + l \left( 11.4 + \frac{32.6}{i} \right) \text{ В,}$$

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 электри-

ческой прочности диэлектрика и роста напряженности электрического поля, создаваемого восстанавливающимся напряжением  $E$ . Дуга гаснет, если  $E_1 > E$ .





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.

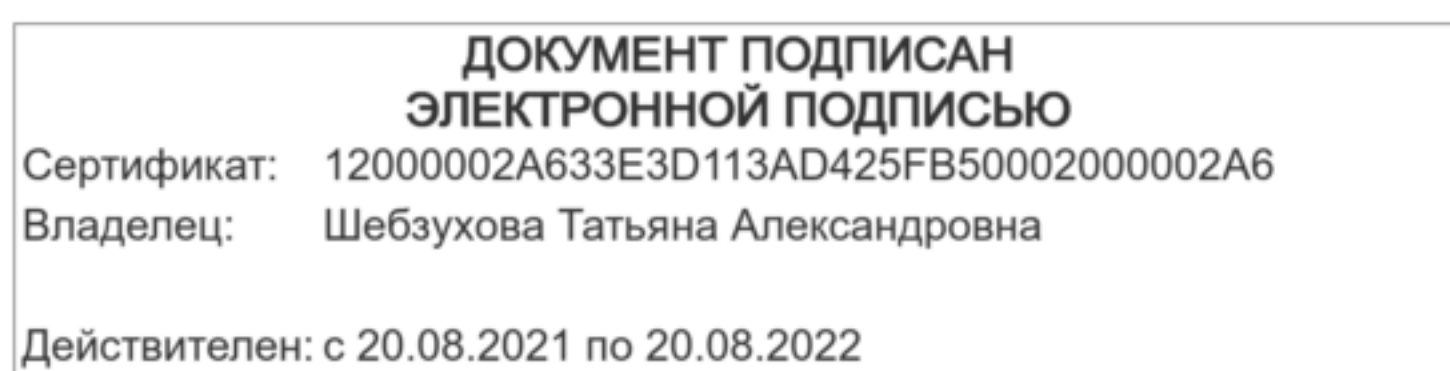
Скорость нарастания прочности промежутка, в котором горела дуга, зависит от ее длины, величины тока молнии, конструкции линейной изоляции, вдоль которой произошел разряд, а также от атмосферных условий.

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.





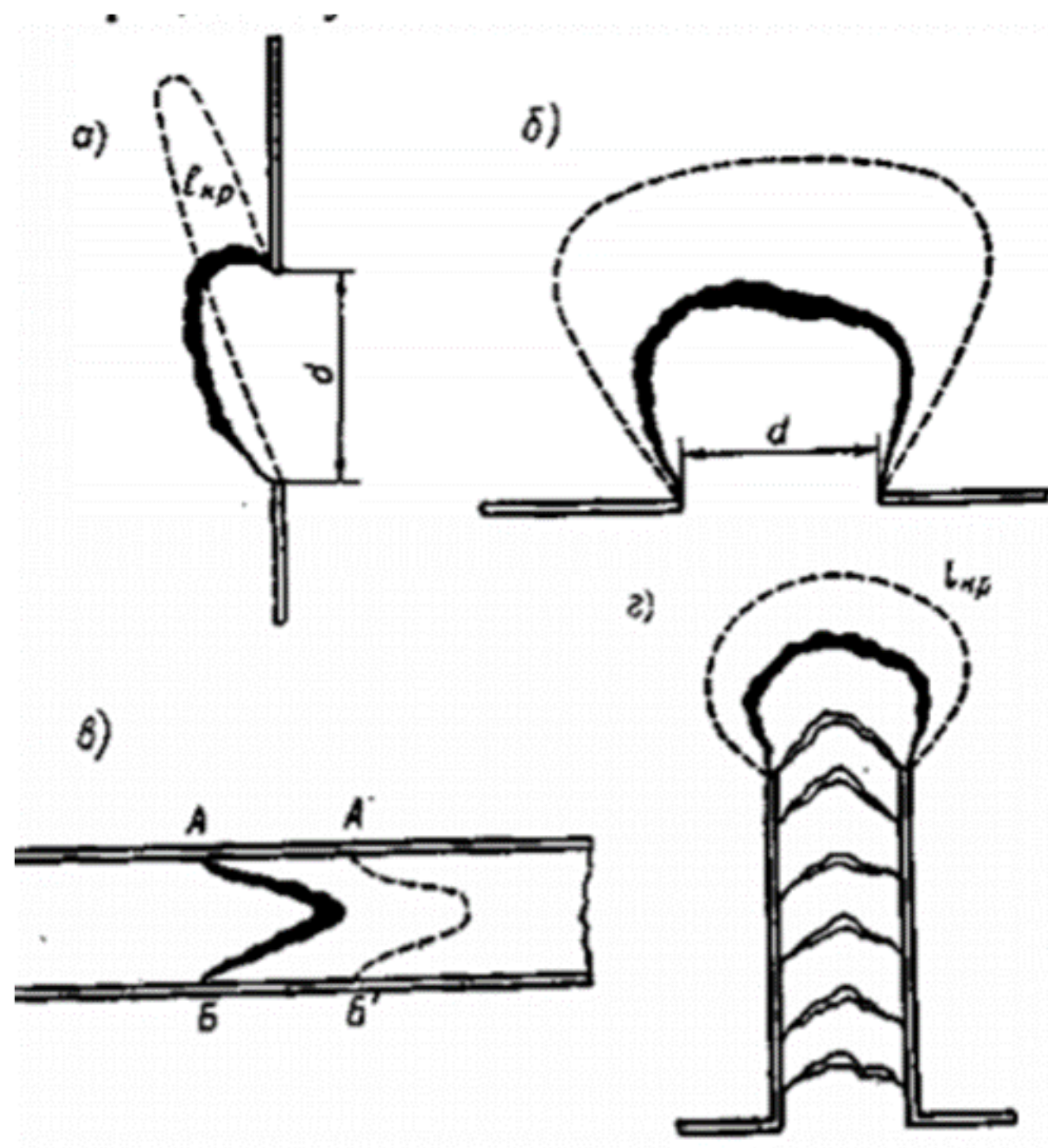


Рисунок 5.3 – Схемы горения электрической дуги в воздухе: а — вертикальные электроды, б — горизонтальные электроды, в — горизонтальные протяженные электроды, г — вертикальные протяженные электроды

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

$$E_{cp} = \frac{U}{l_{kp}} [2 - 3]$$

Критическая длина дуги зависит от тока короткого замыкания, т. е. от величины короткого замыкания, напряжением и критической длиной дуги существует определенная связь:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

$$l_{(x)кр} = 0,08 U I_{к.з}^{0,25}$$

$$l_{(x)кр} = 0,2 I_{к.з}$$

для сети с реактивным сопротивлением

$$l_{(x)кр} = 0,1 U I_{к.з}^{0,25}$$

$$l_{(x)кр} = 0,45 I_{к.з}$$

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

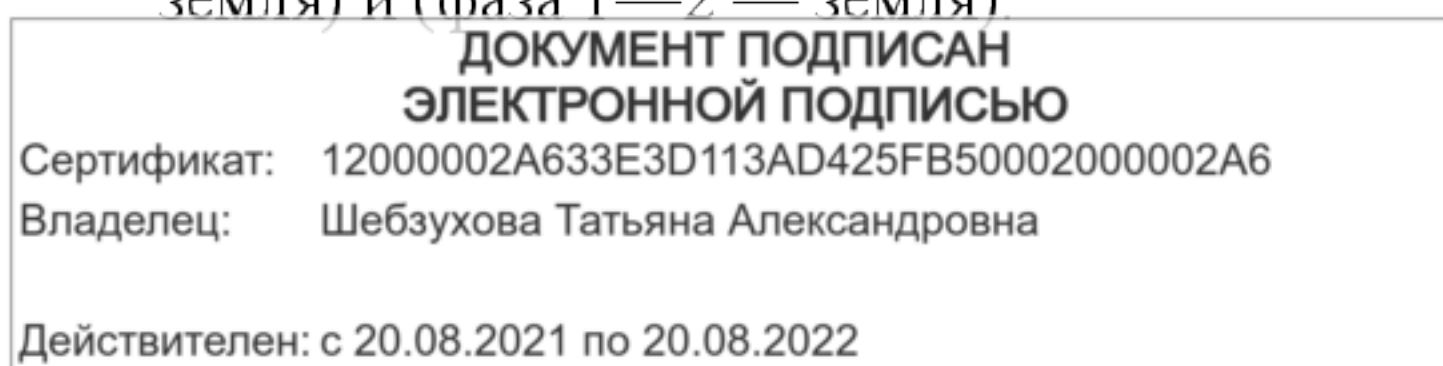
$$E = 12,5 + 34 I^{-0,4} \text{ В/см}$$

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):





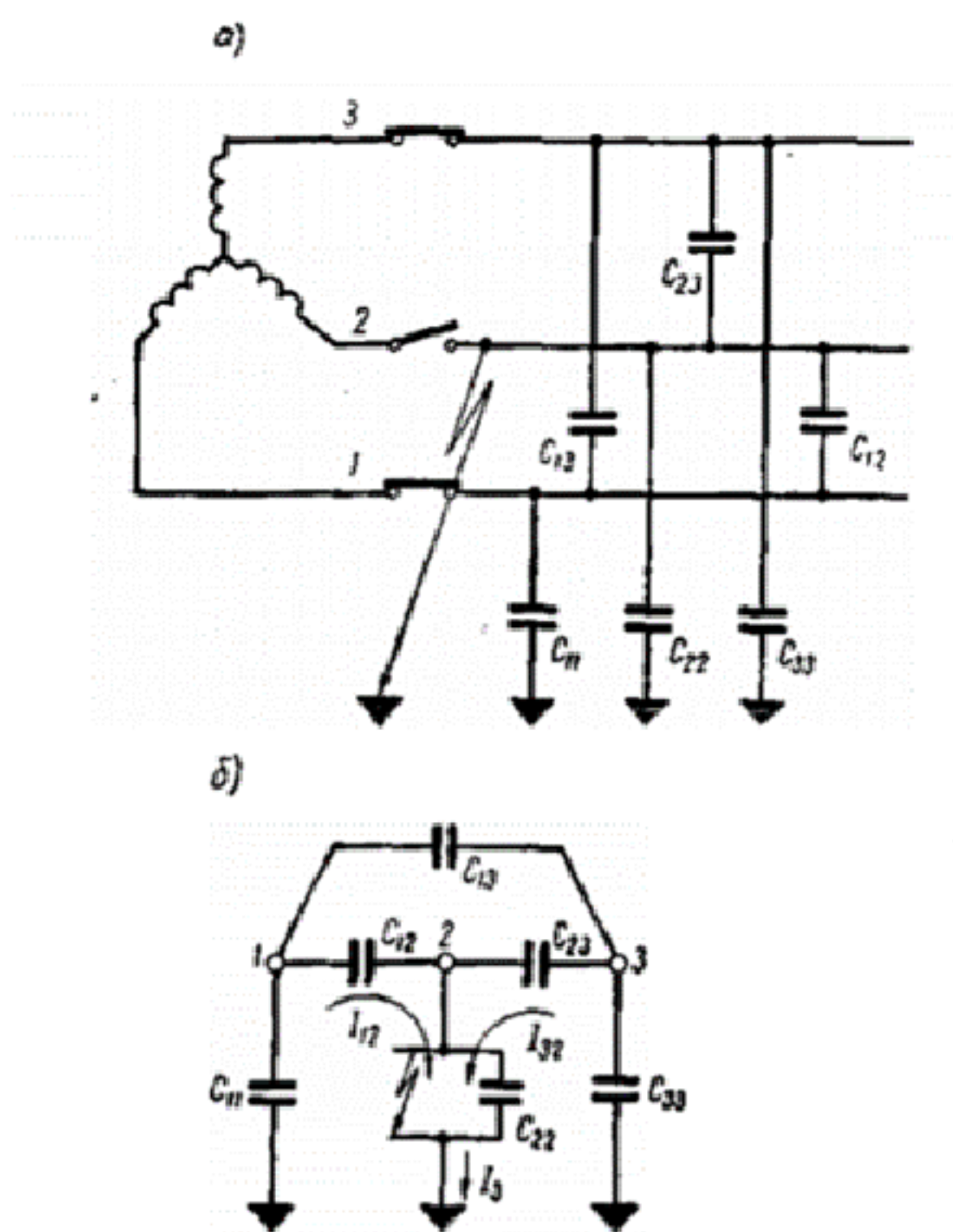


Рисунок 5.4 – Схема сети с по фазным АГТВ Се) и схема протекания емкостных токов при обрыве дуга в выключателе (б)

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

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

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

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



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

полагая, что

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

окончательно имеем

$$U_x = 0.14 U_{\phi}$$

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

$$l_{(x)кр} = 0.1 U_x I_{к.з}^{0.25}$$

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  $T_{\text{ж}}$  — 7000 ч, а ненастной погоды  $T_{\text{д}}$  = 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 рабо-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

костной проводимости равен 4 А. В расчете ие. 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:***

|                                                    |
|----------------------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ          |
| Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна          |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022           |

1. Определить критическую длину дуги и под критическим током ду-



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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



## **Практическая работа №6. Перекрытие твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности**

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

### **Основы теории:**

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  $E_t$ . Первый из этих векторов направлен перпендикулярно к разделяющей поверхности, а второй — по касательной.

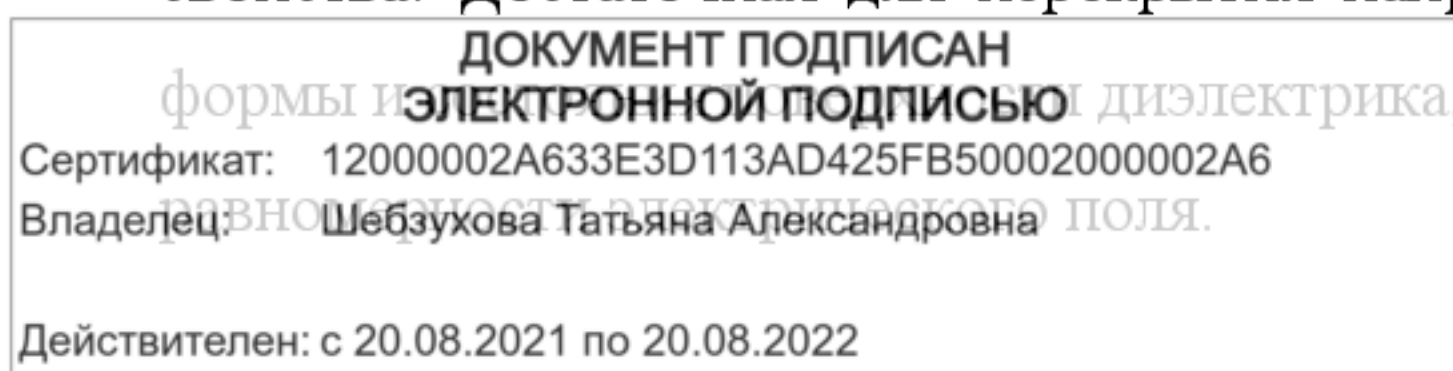
Используя аналогию с преломлением световых лучей, можно доказать, что при переходе вектора напряженности из одной среды в другую он подчиняется закону преломления.

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:

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}$$

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

степени ее загрязненности, увлажнения и не-



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 I, 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.

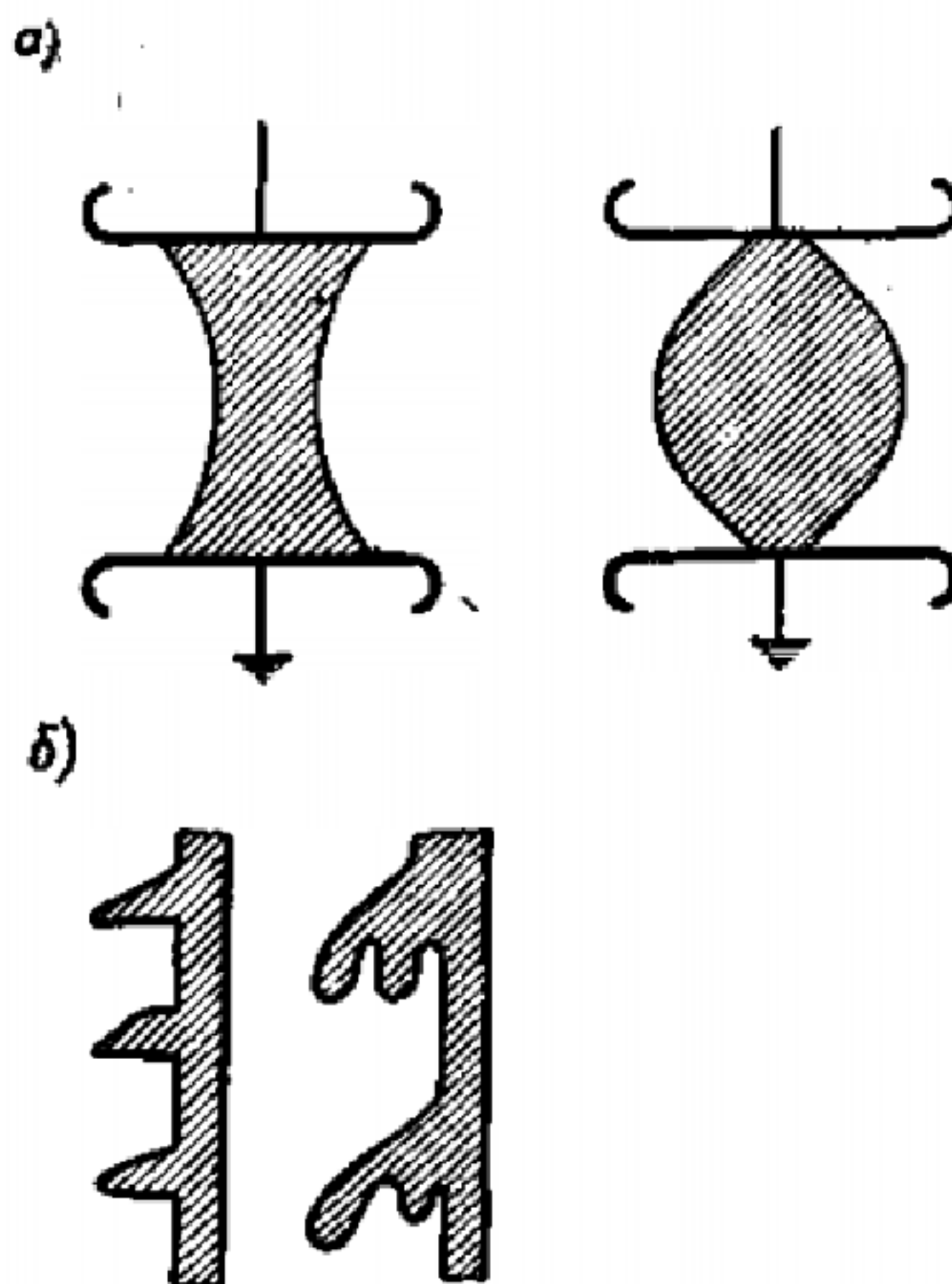


Рисунок 6.1 – Примеры форм трудно перекрываемых поверхностей изоляторов

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 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.

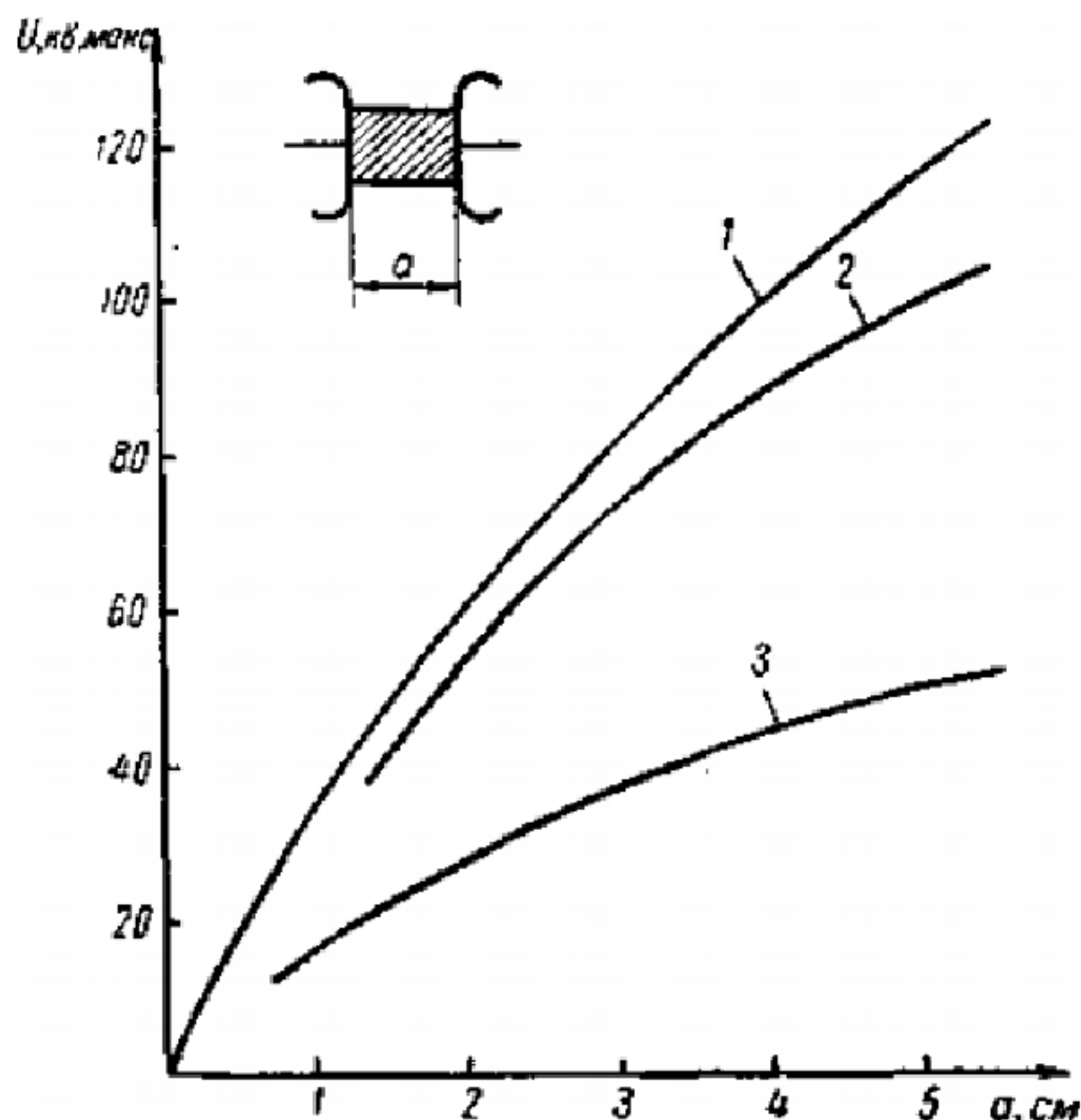


Рисунок 6.2 – Разрядные напряжения между плоскими электродами: 1- по воздуху; 2 — по поверхности фарфора 3 — по поверхности стекла

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 сбли-

зиться, уменьшая тем самым 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.

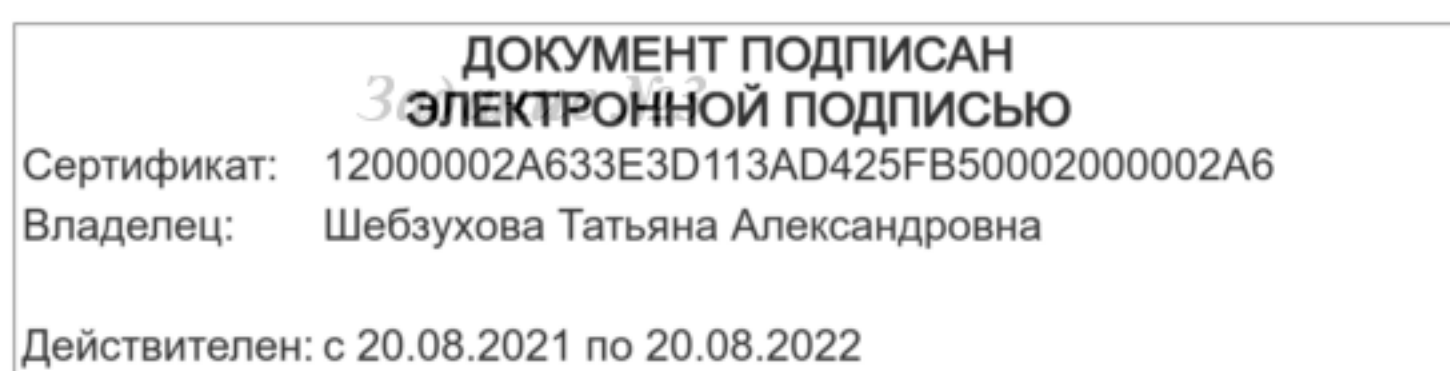
### **Задания:**

#### **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.



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.

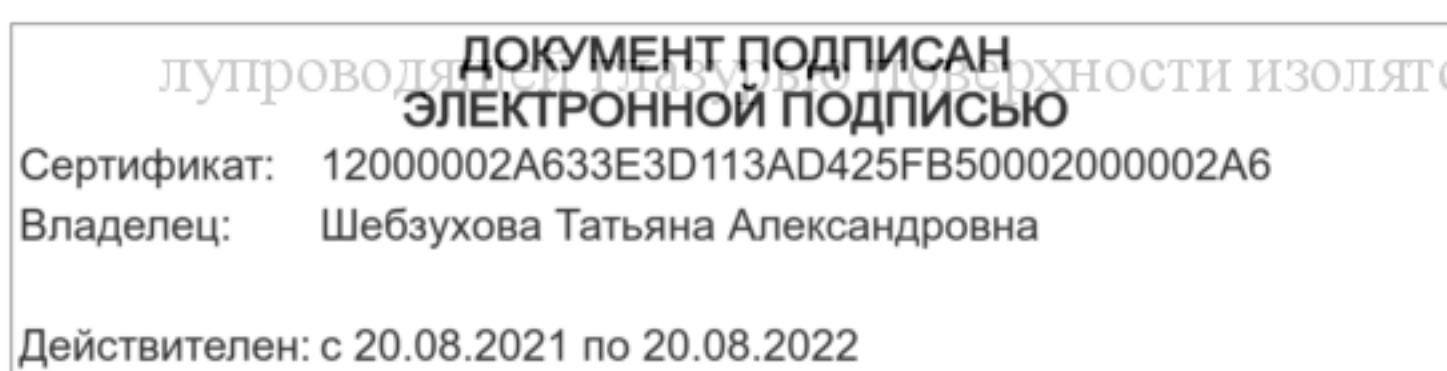
#### ***Задание №5***

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°. 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 по-

путпроводящим веществом поверхности изолятора?





## Практическая работа №7. Тепловой и электрический пробой

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

### Основы теории:

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:

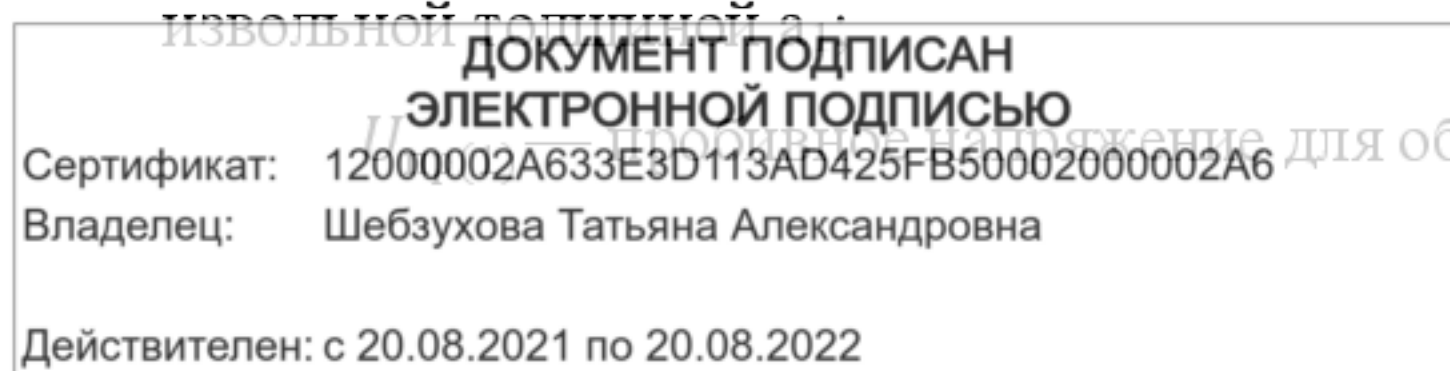
- а) постоянство пробивного напряжения независимо от температуры диэлектрика;
- б) отсутствие видимого нагрева изоляции дугой в месте пробоя при быстром снятии напряжения;
- в) малая длительность времени, необходимая для формирования пробоя;
- г) зависимость величины пробивного напряжения от формы электродов, 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 про-

извольной толщиной  $a_1$ .



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.

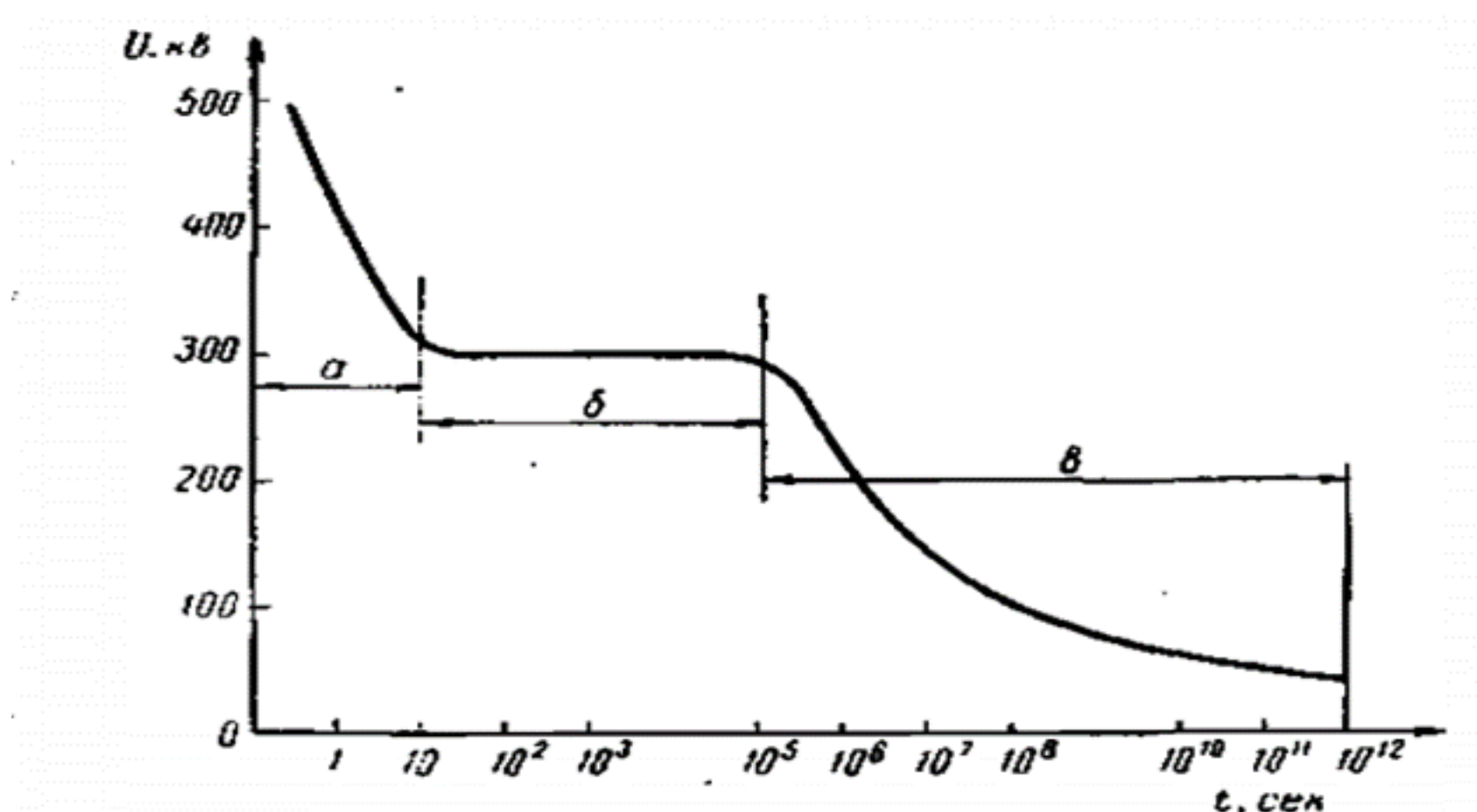


Рисунок 7.1 – Характеристика пробивного напряжения для твердой изоляции: а — область импульсного пробоя; б — область электрического пробоя; в — область теплового пробоя

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 (электро-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
картон) ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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  $6 \cdot 10^{-12}$  Вт/см  $\cdot$  В<sup>2</sup> а при температуре  $90^{\circ}\text{C}$  возросли до  $30 \cdot 10^{-12}$  Вт/см $\cdot$ В<sup>2</sup>. 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 поля образец толщиной 0,8 мм пробивается при напряжении 3,5 кВ.

#### ***Задание №5***

|                                           |                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                 | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022  |                                        |

Определить пробивное 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?



## **Практическая работа №8. Расчет заземляющих устройств.**

**Цель:** Приобретение навыков расчета ЗУ.

### **Основы теории:**

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 грозовым 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 повреждения, практически имеют нулевой потенциал.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

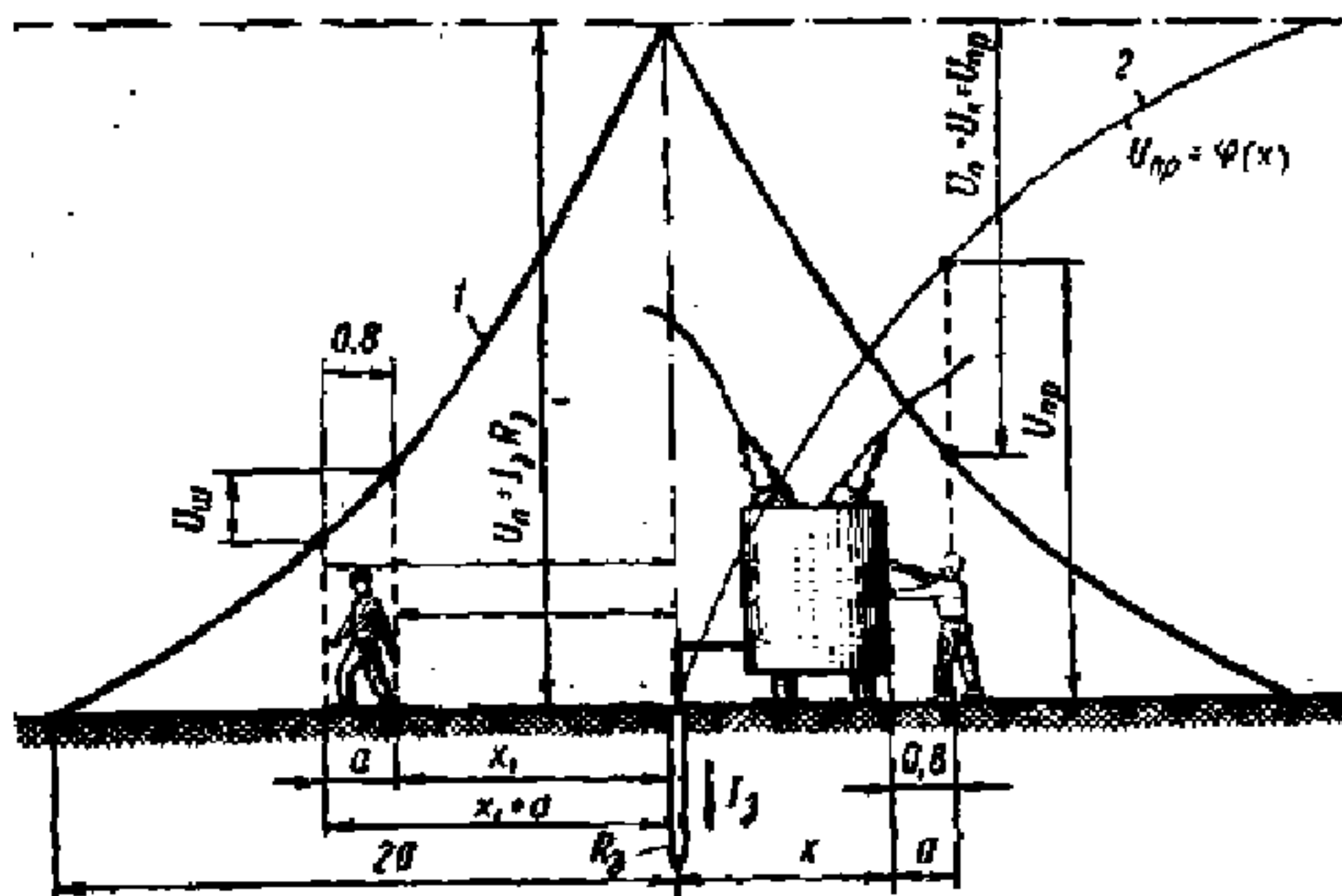


Рисунок 8.1 – Потенциальная характеристика (1) и напряжение прикосновения при одиночном стержневом заземлителе (2)

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

$$R_z = \frac{U_n}{I_z}$$

где  $U_n$  — полный потенциал, кв,

$I_z$  — 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  $U_n$ , 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  $\rho_{ом \cdot см}$ , 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.

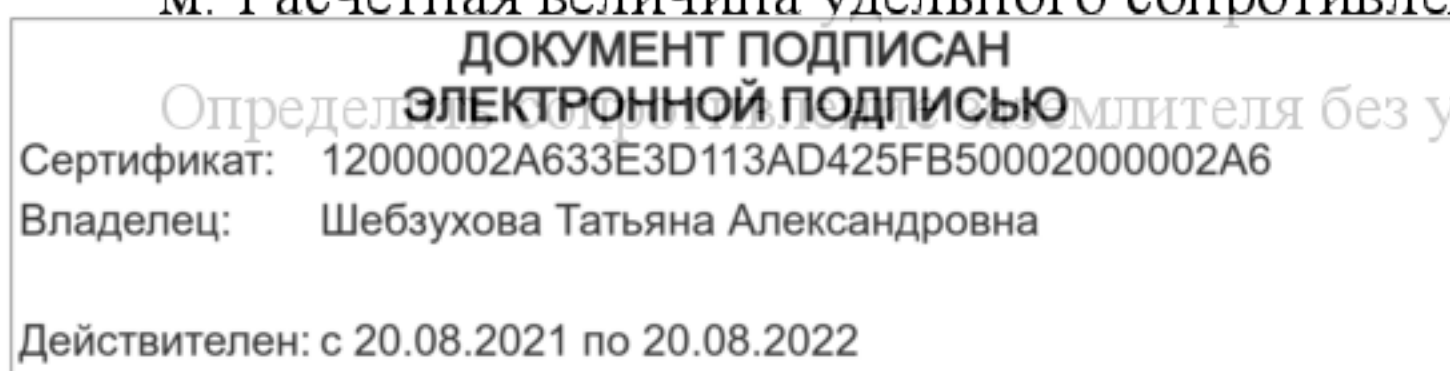
### **Задания:**

#### **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.





### 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.

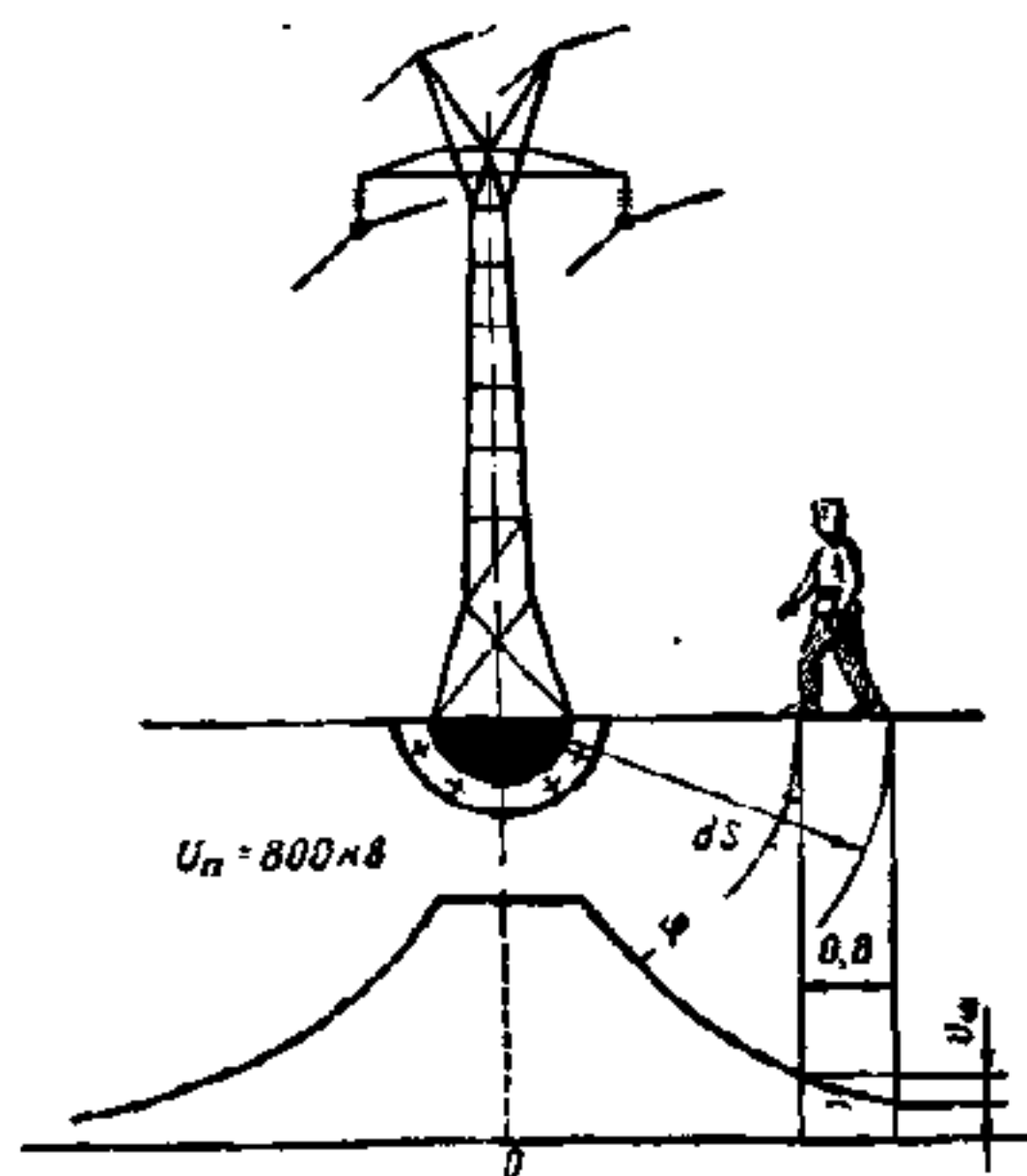


Рисунок 8.2

### 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?

## **Практическая работа №9. Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты**

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

### **Основы теории:**

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

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

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

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

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

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

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  $b$ , заложеной в грунт на глубину  $t$ , при общей

|                                          |                                           |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| ДЛИНЕ ПОС                                | ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |
| Сертификат:                              | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6    |
| Владелец:                                | Шебзухова Татьяна Александровна           |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022 |                                           |



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

**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:

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

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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$R_{\text{сисò}} = \frac{R_{\text{а}} \frac{R_{\text{е}}}{n}}{\frac{R_{\text{е}}}{n} + R_{\text{а}}} \cdot \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$$



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

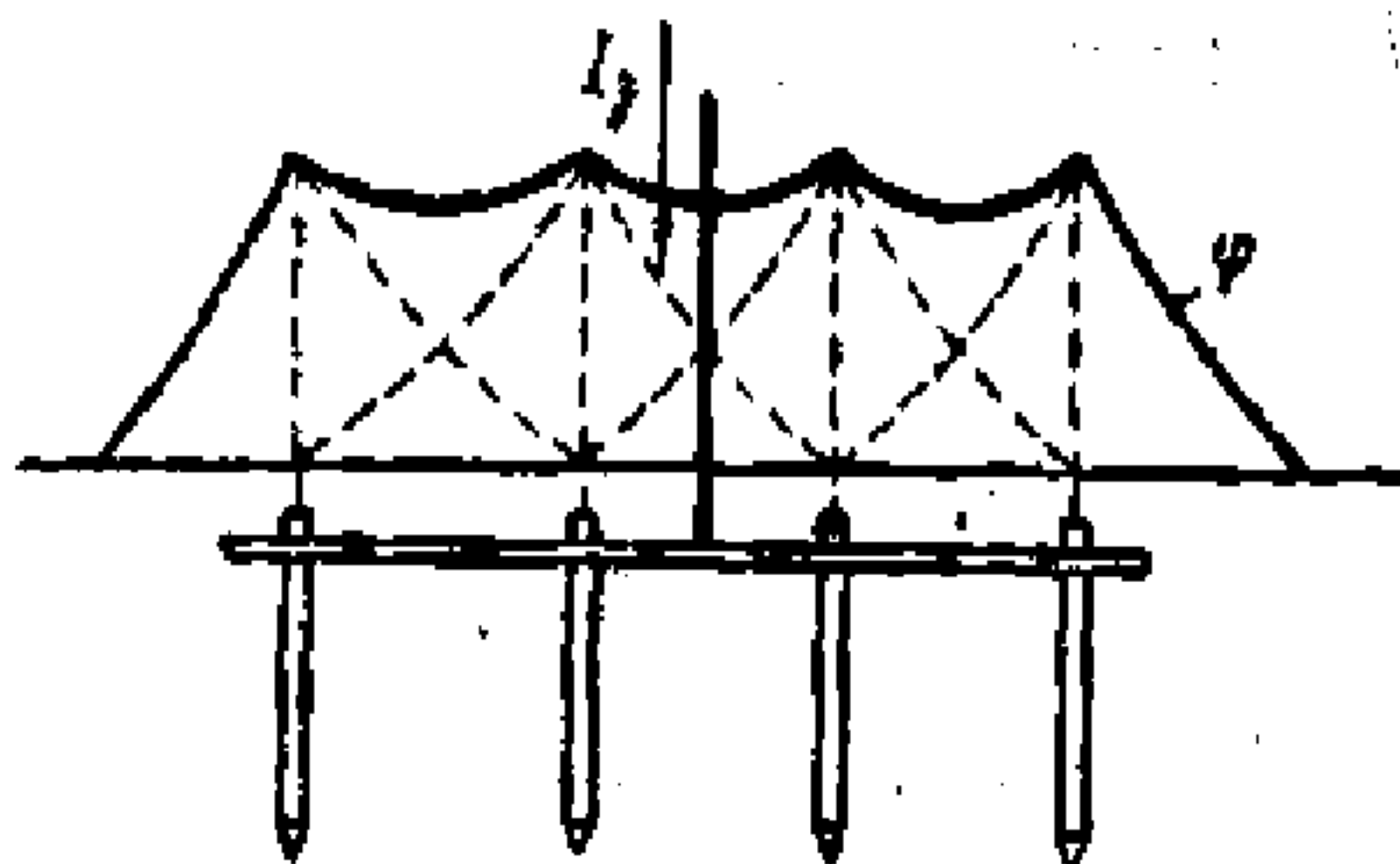


Рисунок 9.1 – Характер потенциальной кривой для сложного заземлителя

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  $120^\circ$ . Определить сопротивление заземлителя, если ток гро-

зового разряда молнии принят равным 40 кА. Проводимостью связей, принят 40 кА. Проводимостью свя-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

### ***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?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **5.1.2 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>

#### **5.1.3 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>

### **5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Техника высоких напряжений».

2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным работам по дисциплине «Техника высоких напряжений».

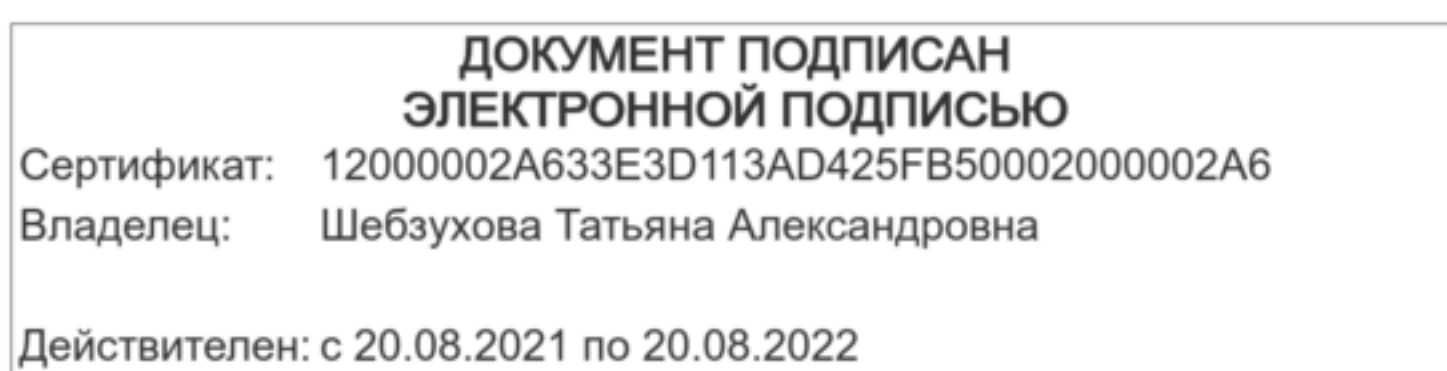
3. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».

4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Техника высоких напряжений».

### **5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины**

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks





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 контрольной работы  
по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## Содержание

| №<br>п/п |                                                                                                            | Стр. |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|          | Введение                                                                                                   |      |
| 1.       | Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины                                                          |      |
| 2.       | Формулировка задания и ее объем                                                                            |      |
| 3.       | Общие требования к написанию и оформлению работы                                                           |      |
| 4.       | Рекомендации по выполнению задания                                                                         |      |
| 5.       | План-график выполнения задания                                                                             |      |
| 6.       | Критерии оценивания работы                                                                                 |      |
| 7.       | Порядок защиты работы                                                                                      |      |
| 8.       | Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины                                                |      |
| 8.1      | Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освое-<br>ния дисциплины                    |      |
| 8.2      | Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обу-<br>чающихся по дисциплине            |      |
| 8.3      | Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет,<br>необходимых для освоения дисциплины |      |



## Введение

Одним из основных видов занятий по курсу дисциплины «Техника высоких напряжений» является выполнение контрольной работы. Предлагаемые в методическом указании задания охватывают весь основной материал курса и соответствуют утвержденной программе.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



## 1. Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины

Основными целями дисциплины являются: формирование у студентов стройной и устойчивой системы знаний о фундаментальных закономерностях зажигания и развития электрических разрядов в диэлектрических средах, механизмах пробоя диэлектриков при воздействии сильных электрических полей, видах изоляции высоковольтного оборудования и методах контроля ее состояния, способах получения и измерения высоких напряжений, природе возникновения перенапряжений и способов защиты от них.

В результате освоения данной дисциплины обеспечивается достижение целей основной образовательной программы «Электроэнергетика и электротехника»; приобретенные знания, умения и навыки позволят подготовить выпускника:

- способного к расчету, анализу и проектированию электроэнергетических элементов, объектов и систем с использованием современных средств автоматизации проектных разработок;
- научно-исследовательской деятельности, в том числе в междисциплинарных областях, связанной с математическим моделированием процессов в электроэнергетических системах и объектах, проведением экспериментальных исследований и анализом их результатов;
- к самостоятельному обучению и освоению новых знаний и умений для реализации своей профессиональной карьеры.

При выполнении контрольной работы реализуются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

| Код, формулировка компетенции                                      | Код, формулировка индикатора                                                                                                     | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения | ИД-3 <sub>ПК-1</sub> Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения | Знает основные физические явления, механизмы воздействия электромагнитных полей высокого напряжения на изоляцию в различных условиях эксплуатации.<br>Умеет обосновывать выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации. |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

|  |  |                                                                                                                                                 |
|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | Владеет навыками выбора параметров электрооборудования систем электропитания объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации. |
|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



## 2. Формулировка задания и ее объем

### Задание №1

Высоковольтная линия электропередач (ВЛ) с номинальным напряжением  $U$  и волновым сопротивлением  $Z_{\text{пр}} = 300$  Ом расположена в зоне грозовой деятельности.

Импульсная прочность изоляции ВЛ равна  $U_{\text{и}}$ , высота металлической опоры и высота подвеса провода равна  $h$ , стрела провеса провода равна  $f$ , индуктивность единицы длины опоры  $L_0 = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Гн/м, импульсное сопротивление заземления опоры  $R_3 = 10$  Ом.

Требуется определить величину перенапряжения на ВЛ, кратность перенапряжения и вероятность перекрытия изоляции во время разряда молнии с амплитудой  $I_m$  и длительностью нарастания (фронта) косоугольной волны тока равной  $\tau_{\text{ф}} = 10^{-6}$  с:

- при ударе молнии в опору;
- при ударе молнии в провод;
- при ударе молнии на расстоянии «а» от ВЛ.

Значения всех переменных параметров для соответствующих вариантов приведены в табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Исходные данные к расчету задачи №1

| Показатели                                              | Вариант (предпоследняя цифра шифра) |      |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                         | 1                                   | 2    | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| Напряжение линии, $U$ , кВ                              | 10                                  | 35   | 110 | 35  | 10  | 110 | 10  | 35  | 110 | 10  |
| Импульсная прочность изоляции линии $U_{\text{и}}$ , кВ | 120                                 | 3501 | 650 | 350 | 120 | 650 | 120 | 350 | 650 | 120 |
| Высота подвеса провода $h$ , м                          | 10                                  | 12   | 16  | 14  | 11  | 18  | 10  | 15  | 18  | 11  |
| Стрела провеса провода $f$ , м                          | 1,5                                 | 2    | 3   | 2,5 | 2   | 4   | 1,8 | 3,5 | 4,5 | 1,8 |
| Амплитуда тока молнии $I_m$ , кА                        | 5                                   | 10   | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  | 45  | 50  |
| Расстояние от места удара молнии до ВЛ «а», м           | 5                                   | 7,5  | 10  | 12  | 13  | 14  | 15  | 18  | 19  | 20  |

|                                           |                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                 | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022  |                                        |



## Задание №2

Для защиты объекта с шириной «а», длиной «в» и высотой «h» от прямых ударов молнии с амплитудой  $I_m$  и временем нарастания фронта  $\tau_f=10-6$ с установлен одиночный молниеотвод. Глубина нижнего конца фундамента молниеотвода от поверхности земли  $h_{\phi}=3,2$  м, ширина фундамента  $a_{\phi}=0,8$  м, удельное сопротивление земли  $\rho$ , Ом·м. Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта приведена на рис. 2.1.

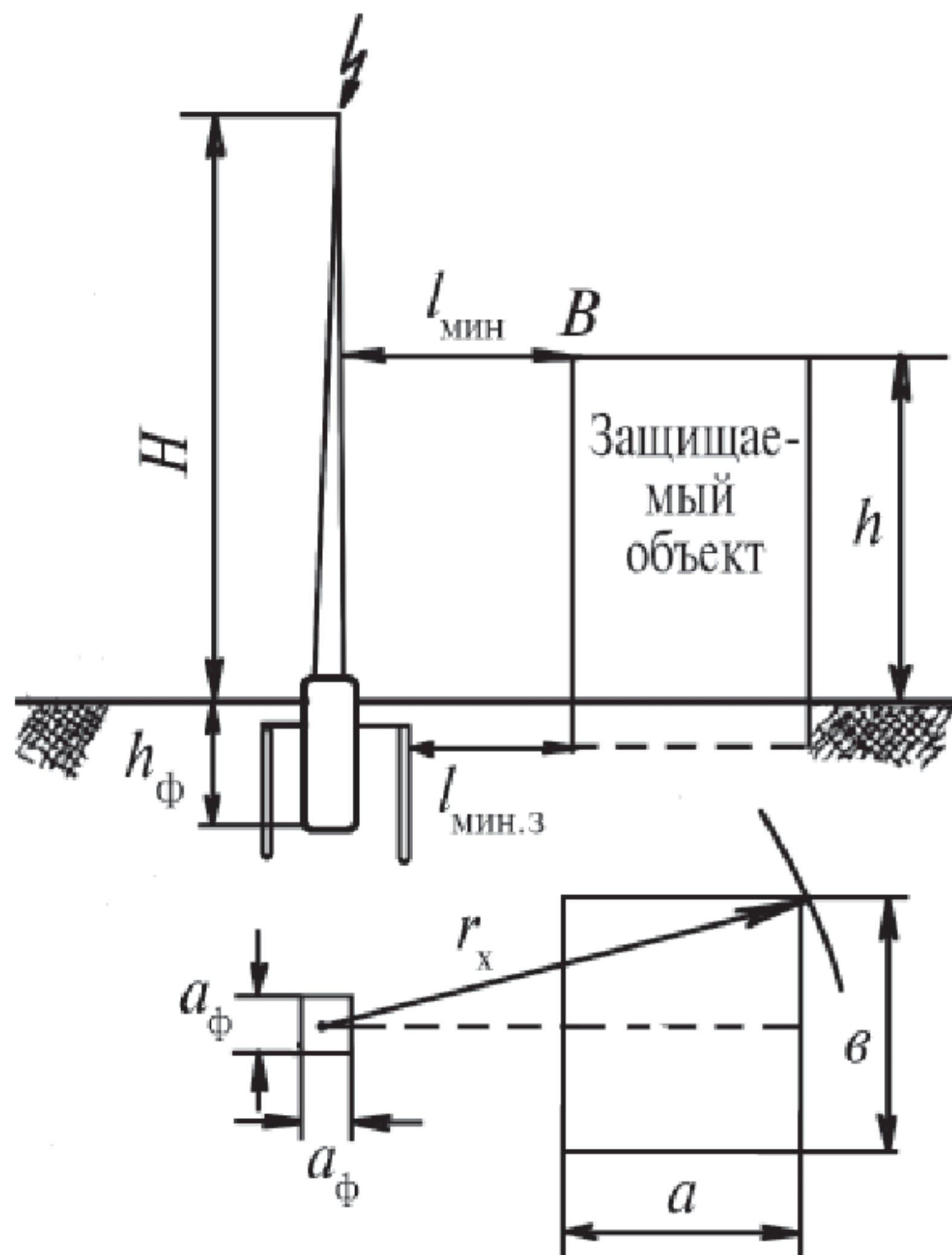


Рисунок 2 – Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта

1. Рассчитать устройство заземления молниеотвода, состоящее из естественного заземлителя (фундамента молниеотвода) и искусственного заземлителя из условий, что допустимое импульсное сопротивление устройства заземления  $R_z$  не должно превышать 10 Ом. Начертить эскиз контура заземления совместно с защищаемым объектом.

2. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта, радиус зоны защиты  $r_x$  на высоте объекта  $h$  и высоту молниеотвода  $H$ . На эскизе

показать контур зоны защиты стержневого молниеотвода. Значения соответствующих параметров для различных вариантов задания приведены в табл. 2.

3. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи исходные данные выбранного варианта. Нарисовать схему расположения молниеотвода и защищаемого объекта.

4. Рассчитать импульсное сопротивление фундамента молниеотвода. Импульсный коэффициент для сопротивления фундамента вне зависимости от сопротивления грунта принять  $\delta_{\text{иф}} = 0,8$ , а глубина нижнего конца фундамента  $t = h_{\text{ф}}$ .

5. Рассчитать необходимое импульсное сопротивление искусственного заземлителя.

6. Рассчитать импульсное сопротивление, состоящее из двух горизонтальных полос и по неравенству сделать вывод о достаточности этого сопротивления.

7. Если неравенство не выполняется, изменяя количество или длину труб продолжить расчет импульсного сопротивления искусственного заземлителя до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (2.9).

8. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта радиус зоны защиты  $r_x$  на высоте объекта  $h$  по формуле и высоту молниеотвода  $H$  по формуле. При расчете по формуле принять, что  $L_0 = 1 \cdot 10^{-6}$  Гн/м,  $\alpha_{\text{ср}}$  вычислить.

9. Начертить эскиз контура заземления совместно с защищаемым объектом.

10. На эскизе показать сечение зоны защиты стержневого молниеотвода и взаимное расположение защищаемого объекта и искусственных заземлителей.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета задачи №2

| Показатели                                                     | Вариант (предпоследняя цифра шифра) |     |     |     |     |      |      |      |     |     |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|
|                                                                | 1                                   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 7    | 8    | 9   | 10  |
| Амплитуда тока молнии $I_m, \text{кА}$                         | 5,0                                 | 10  | 15  | 20  | 25  | 30   | 35   | 40   | 45  | 50  |
| Удельное сопротивление грунта $\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$ | 100                                 | 200 | 500 | 200 | 100 | 200  | 500  | 200  | 100 | 500 |
| Ширина объекта $a, \text{м}$                                   | 3,0                                 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0  | 4,2  | 4,4  | 4,6 | 4,8 |
| Длина объекта $b, \text{м}$                                    | 3,2                                 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 4,2  | 4,4  | 4,6  | 4,8 | 5,0 |
| Высота объекта $h, \text{м}$                                   | 12                                  | 11  | 10  | 9,5 | 9,0 | 10,5 | 12,5 | 11,5 | 8,5 | 8,0 |

### Задание №3

Определить число изоляторов в поддерживающей гирлянде промежуточной опоры по удельной нормированной длине пути утечки. ЛЭП проходит на высоте менее 1000 м над

уровнем моря. Исходные данные и варианты заданий приведены в табл. 3

|                                           |                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                 | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022  |                                        |



Таблица 3 – Исходные данные для расчета задачи №3

| Показатели                       | Вариант (предпоследняя цифра шифра) |        |        |        |        |       |       |        |        |        |
|----------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
|                                  | 1                                   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6     | 7     | 8      | 9      | 10     |
| Номинальное напряжение линии, кВ | 110                                 | 220    | 330    | 500    | 750    | 110   | 220   | 330    | 500    | 750    |
| Тип опоры                        | ж/б                                 | ж/б    | ж/б    | мет    | мет    | ж/б   | ж/б   | ж/б    | мет    | мет    |
| Степень загрязнения атмосферы    | 1                                   | 2      | 3      | 4      | 4      | 4     | 3     | 2      | 1      | 2      |
| Тип изолятора                    | ПС70Е                               | ПС120Б | ПС160Д | ПС210В | ПС300В | ПС70Е | ПС70Е | ПС120Б | ПС160Д | ПС160Д |
| Диаметр тарелки D, мм            | 255                                 | 255    | 280    | 300    | 320    | 255   | 255   | 255    | 280    | 280    |
| Строительная высота H, мм        | 127                                 | 146    | 170    | 195    | 195    | 146   | 146   | 146    | 170    | 170    |
| Длина пути утечки $L_{и}$ , мм   | 303                                 | 320    | 370    | 370    | 390    | 303   | 320   | 370    | 370    | 390    |

**Задание №4**

Внутренняя изоляция высоковольтного оборудования состоит из двух слоев, имеющих в установившемся режиме соответственно сопротивление утечки  $R_1$ ,  $R_2$  и емкости слоев  $C_1$  и  $C_2$ .

Требуется по характеру изменения тока абсорбции и значению сопротивления изоляции в исходном состоянии изоляции и при уменьшении сопротивления первого слоя в 100 раз ( $0,01R_1$ ) дать заключение о качестве изоляции и определить допустимость степени увлажнения.

Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  равен —  $\text{tg}\delta_0$ ; коэффициент, характеризующий температурную зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры, равен —  $\alpha$ .

Требуется рассчитать и построить графики зависимости тангенса диэлектрических потерь и мощности потерь в диэлектрике при изменении температуры от  $20^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$  и приложении переменного напряжения  $U = 10$  кВ с частотой 50 Гц. Значения всех переменных параметров для соответствующих вариантов приведены в табл. 4.

|                                                   |                                        |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br/>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ</b> |                                        |
| Сертификат:                                       | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                         | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022          |                                        |



Таблица 4 – Исходные данные для расчета задачи №4

| Показатели                             | Вариант (предпоследняя цифра шифра) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                        | 1                                   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| $R_1, 10^6, \text{Ом}$                 | 100                                 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 |
| $C_1, 10^{-6}, \text{Ф}$               | 3,6                                 | 3,4 | 3,2 | 3,0 | 2,8 | 2,6 | 2,4 | 2,2 | 2,0 | 1,8 |
| $R_2, 10^6, \text{Ом}$                 | 1,0                                 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 |
| $C_2, 10^{-6}, \text{Ф}$               | 36                                  | 34  | 30  | 32  | 28  | 26  | 24  | 22  | 20  | 18  |
| $\text{tg}\delta_0, 10^{-3}$           | 4,0                                 | 3,8 | 3,6 | 3,4 | 3,2 | 3,0 | 2,8 | 2,6 | 2,4 | 2,2 |
| $\alpha, 10^{-3}, ^\circ\text{C}^{-1}$ | 11                                  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

### 3. Общие требования к написанию и оформлению работы

#### Основные требования к работе

При выполнении и оформлении контрольной по ГОСТу надо учитывать общие требования, которые предъявляются к работе:

- студент должен придерживаться заданной тематики;
- запрещено менять тему самостоятельно без обращения к преподавателю;
- при оформлении работы нужно учитывать нормы и ГОСТы;
- контрольная выполняется на основании не менее семи источников, выбранных автором;
- работа должна быть авторской, в ней должны содержаться собственные выводы студента;
- текст контрольной должен иметь объем не менее 7 листов.

#### Оформление по ГОСТу текста контрольной

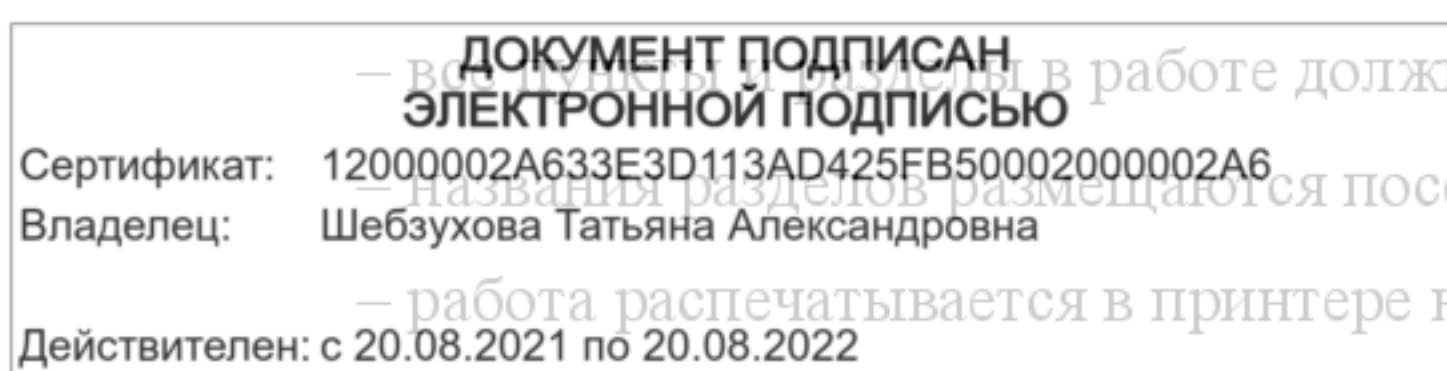
Когда работа выполнена, ее необходимо привести в соответствующий вид согласно ГОСТам:

- контрольную набирают в Word или другом текстовом редакторе с аналогичным функционалом;
- при наборе нужно использовать шрифт Times New Roman;
- интервал между строк — полуторный;
- размер шрифта — 14;
- текст выравнивается по ширине;
- в тексте делают красные строки с отступом в 12,5 мм;
- нижнее и верхнее поля страницы должны иметь отступ в 20 мм;
- слева отступ составляет 30 мм, справа — 15 мм;
- контрольная всегда нумеруется с первого листа, но на титульном листе номер не ставят;
- номер страницы в работе всегда выставляется в верхнем правом углу;
- заголовки работы оформляются жирным шрифтом;
- в конце заголовков точка не предусмотрена;
- заголовки набираются прописными буквами;

– все заголовки и подзаголовки в работе должны быть пронумерованы арабскими цифрами;

– названия разделов размещаются посередине строки, подразделы – с левого края;

– работа распечатывается в принтере на листах А4;





– текст должен располагаться только на одной стороне листа.

**Работа имеет такую структуру:**

1. Титульный лист;
2. Оглавление и введение;
3. Основной текст и расчет контрольной;
4. Заключительная часть работы;
5. Перечень использованной литературы и источников;
6. Дополнения и приложения.

Если в работе есть приложения, о них надо упоминать в оглавлении.

Ссылки нумеруются арабскими цифрами, при этом учитывают структуру работы (разделы и подразделы).



#### 4. Рекомендации по выполнению задания

##### Указание к решению задачи №1

Молния представляет собой электрический разряд между облаком и землей или между облаками.

На начальной стадии, называемой лидерной, канал разряда молнии развивается ступенчато. Ступени следуют друг за другом с интервалом  $30 \div 50 \text{ мкс}$ . Во время каждой ступени канал удлиняется на  $5 \div 100 \text{ м}$ . Канал лидера окружен обширной зоной ионизации. Зона ионизации лидера имеет избыточный заряд того же знака, что и облако. Заряды облака и лидера индуцируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака.

Когда канал лидера соединяется с землей или объектом, расположенным на земле, начинается главная стадия разряда. Во время этой стадии происходит нейтрализация зарядов, образовавшихся во время развития лидера. Процесс распространяется в направлении от земли к облаку со скоростью достигающей половины скорости распространения света и сопровождается сильным свечением канала молнии. Канал разряда, разогретый за очень короткое время до температуры  $(20 \div 30) 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ , быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ударной волны, вырождающейся в звуковую и воспринимаемой как гром.

Ток в канале молнии за несколько микросекунд достигает амплитуды  $2 \div 250 \text{ кА}$ , а затем за время  $25 \div 150 \text{ мкс}$  спадает до половины максимального значения.

Более подробные сведения о механизме развития молнии и молниезащиты можно найти в рекомендованной литературе [1; 2; 3; 4].

При расчетах перенапряжений и молниезащиты принимается во внимание, что волновое сопротивление канала молнии составляет более  $1000 \text{ Ом}$  и влияние сопротивлений заземлений с  $R_z \leq 50 \text{ Ом}$  на амплитуду молнии можно не учитывать, т.е. рассматривать молнию как источник тока.

С точки зрения воздействия на изоляцию ВЛ кроме амплитуды тока молнии  $I_m$  важное значение имеет крутизна фронта тока молнии, поскольку она определяет индуктивное падение напряжения в проводниках и индуцированные напряжения в магнитно-связанных цепях.

При расчетах перенапряжений для удобства используют среднюю крутизну:

|                                           |                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 |
| Владелец:                                 | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022  |                                        |

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{I_m}{\tau_{\text{ф}}}$$

где  $\tau_{\text{ф}}$  — длительность нарастания (фронта) тока главного разряда

МОЛНИИ.

Величина перенапряжения на вершине опоры при прямом ударе молнии в опору равна сумме падений напряжения на импульсном сопротивлении заземления и индуктивности опоры:

$$U_{\text{оп}} = R_z I_m + L_0 h \alpha_{\text{ср}}$$

где  $R_z$  – импульсное сопротивление опоры;

$I_m$  – амплитуда тока молнии;

$L_0$  – удельная индуктивность опоры;

$h$  – высота опоры.

Под таким же напряжением окажется и изоляция проводов линии электропередачи.

При ударе молнии в провод линии электропередач ток молнии растекается по пораженному проводу в обе стороны, поэтому амплитуда волны перенапряжения на проводах определяется по формуле:

$$U_{\text{пр}} = \frac{I_m * Z_{\text{пр}}}{2}$$

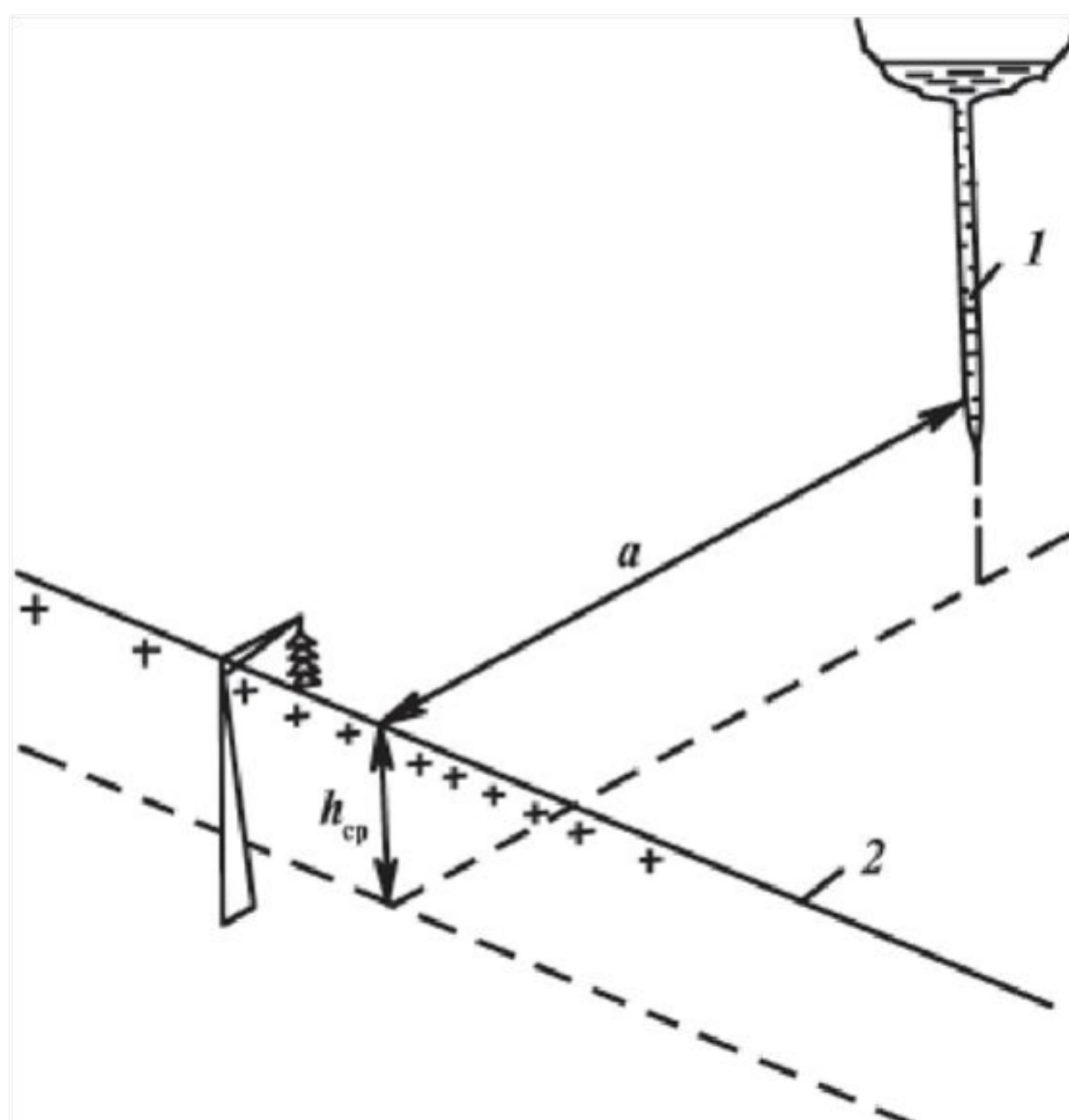


Рисунок 1 – Схема расположения ВЛЭП

Рассмотрим в упрощенной форме, как возникает электрическая составляющая ин-

дуктированная составляющая (рис. 1). При развитии лидерного канала молнии 1 вблизи пораженного провода 2 заряды противоположного знака (наводятся) на проводах 2 заряды противоположного

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



знака (явление электрической индукции). Во время главного разряда, т.е. когда молния достигает земли, заряды лидера молнии нейтрализуются, при рис. 1 К объявлению образования этом связанные на проводе индуктированных перенапряжений:

Заряды освобождаются, что 1 — упрощенный вид канала лидера молнии; 2 — условный вид проводов

Сопровождается повыше- линии электропередач; (–) — заряды в нем потенциала провода канале лидера отрицательной полярности; и образованием импульса (+) — наведенные заряды положительной полярности на проводах напряжения, распространяющегося по проводу в обе стороны.

Максимальное значения  $U_{из}$  прямо пропорционально амплитуде тока и средней высоте подвеса провода ( $h_{ср}$ ) и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию « $a$ » от провода до точки удара молнии.

$$U_{из} = \frac{k_э * I_m * h_{ср}}{a}$$

где  $k_э$  — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления и уменьшающийся при возрастании скорости главного разряда молнии.

Средняя высота подвеса провода на опорах ВЛ определяется по формуле:

$$h_{ср} = \frac{h - 2f}{3},$$

где  $h$  — высота подвеса провода на опорах ВЛ;

$f$  — стрела провеса провода.

Изменение магнитного поля при главном разряде приводит к возникновению магнитной составляющей индуктированного напряжения в петле «опора-гирлянда изоляторов — провод-земля».

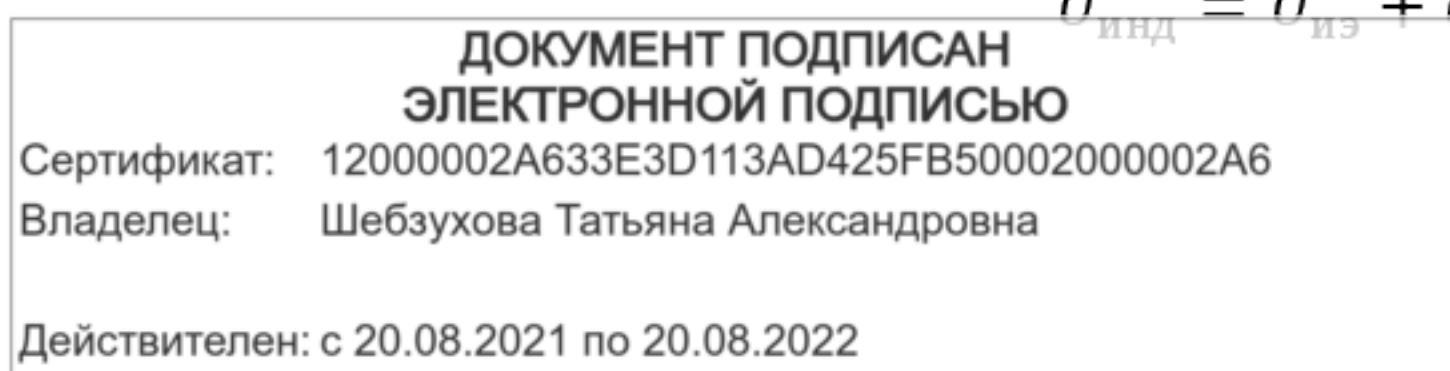
Максимальное значение  $U_{им}$  также прямо пропорционально амплитуде тока и средней высоте подвеса провода, и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию « $a$ » от провода до точки удара молнии, но имеет свой коэффициент пропорциональности  $k_m$ .

$$U_{им} = \frac{k_m * I_m * h_{ср}}{a},$$

где  $k_m$  — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления и увеличивающийся при возрастании скорости главного разряда молнии.

Максимальное значение индуктированного напряжения равно:

$$U_{инд} = U_{из} + U_{им} = \frac{30h_{ср}I_m}{a},$$





Значения перенапряжений, полученных по формулам (1.2), (1.3), (1.7) оценочные, поскольку не учитывают многие факторы, влияющие на величину перенапряжения. Например, не учитывается, что индуцированные перенапряжения возникают также и при ударах молнии в провода (тросы) и опоры и, накладываясь на перенапряжения прямого удара, увеличивают разность потенциалов на изоляции, что второе слагаемое в формуле (1.2) имеет существенное значение только в пределах фронта тока молнии.

Учет этих и других факторов значительно усложнил бы расчет перенапряжений.

Кратность перенапряжения изоляции линии определяется как отношение величины перенапряжения к амплитудному значению фазного напряжения линии:

$$\frac{U_n}{U_\phi} = \frac{U_n \sqrt{3}}{U \sqrt{2}}$$

где  $U_n$  - максимальное значение перенапряжения в зависимости от места удара молнии;

$U$  - действующее (эффективное) значение номинального (междуфазного) напряжения ВЛ.

Для оценки вероятности перекрытия изоляции необходимо сравнивать рассчитанные значения перенапряжения ( $U_{оп}$ ), ( $U_{пр}$ ), ( $U_{инд}$ ) с заданной импульсной прочностью изоляции ( $U_n$ ). Перекрытие изоляции произойдет если:

$$U_{оп} = R_3 I_m + L_0 h \alpha_{cp} \geq U_n,$$

$$U_{пр} = \frac{I_m * Z_{пр}}{2} \geq U_n,$$

$$U_{инд} = \frac{30 h_{cp} I_m}{a} \geq U_n.$$

Как видим, перекрытие изоляции определяется амплитудой тока молнии и местом удара молнии.

Минимальная амплитуда молнии  $I_3$ , при которой происходит перекрытие изоляции, при ударе молнии:

- В опору -  $P_{пер.оп} = P(I_3) = \exp\left(-0.04 \frac{U_n}{R_3}\right)$
- В провод -  $P_{пер.пр} = P(I_3) = \exp\left(-0.04 \frac{U_n}{\left(\frac{Z_{пр}}{2}\right)}\right)$
- На расстоянии « $a$ » -  $P_{пер.инд} = P(I_3) = \exp\left(-0.04 \frac{a * U_n}{30 h_{cp}}\right)$

## Указание к решению задачи №2

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов.

Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю. Молниеотвод состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего на себя удар молнии, токоотвода и заземлителя.

Молниеотводы по типу молниеприемника разделяются на стержневые и тросовые. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем.

Токоотводом служат металлические или железобетонные опоры или стальные провода сечением не менее  $50 \text{ мм}^2$ , активное сопротивление которых составляет доли ома, а индуктивность зависит прежде всего от его длины. Удельная индуктивность токоотводов  $L_o$  зависит от конструкции молниеотвода и изменяется в диапазоне  $(0,4 \div 1,7) 10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

Заземлители делятся на естественные и искусственные. В качестве естественных заземлителей стержневых молниеотводов используются их железобетонные фундаменты. Для искусственных заземлителей используются вертикальные и горизонтальные электроды (заземлители). Для горизонтальных заземлителей используется стальная или медная полоса с площадью поперечного сечения более  $100 \text{ мм}^2$  для стали и  $50 \text{ мм}^2$  для меди или многопроволочный медный канат с поперечным сечением не менее  $35 \text{ мм}^2$ . В качестве вертикальных заземлителей применяются стальные трубы, стержни и профильная сталь.

Заземлитель характеризуется значением сопротивления, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта  $\rho$ , в котором он находится.

Для приближенного расчета сопротивления заземления одиночного стержневого молниеотвода или линейной опоры используются следующие формулы:

- Сопротивление железобетонного фундамента

$$R_{\Phi} = 1,7 * \left( \frac{\rho}{2\pi t} \right) \ln \left( \frac{4t}{b} \right), \text{ где } t = h_{\Phi}$$

- Сопротивление горизонтальной полосы

$$R_{\text{пп}} = \frac{\left[ \left( \frac{\rho}{\pi l} \right) \ln \left( \frac{1,5l}{\sqrt{bt}} \right) \right] \delta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}} * n}$$

- Сопротивление вертикальной трубы или стержня

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$R_{TP} = \left( \frac{\rho}{2\pi l} \right) \cdot \ln \cdot \left( \frac{4l(2t+l)}{d(4t+l)} \right)$



где  $l$  – длина трубы или полосы;  
 $t$  – глубина залегания полосы, верхнего конца вертикального электрода или нижнего конца фундамента;  
 $b$  — ширина полосы или фундамента;  
 $d$  — диаметр трубы или стержня.

Рассчитанные по формулам сопротивления заземлителей называют стационарными.

При прохождении через заземлитель импульса тока молнии сопротивление заземлителя отличается от рассчитанного по формулам, так как при этом вокруг заземлителя образуются зоны искрения, которые как бы увеличивают размеры электродов. С другой стороны, быстрое нарастание импульсного тока создает падение напряжения на индуктивности протяженного заземлителя, что ограничивает отвод тока с удаленных его частей.

Влияния этих и ряда других факторов учитывается импульсным коэффициентом  $\delta_{\text{и}}$ .

Если заземлитель состоит из  $n$  труб или полос, то его импульсное сопротивление равно

$$R_{\text{фи}} = \frac{\delta_{\text{и}} * R_{\text{ф}}}{\eta_{\text{и}} * n},$$

где  $\eta_{\text{и}}$  –импульсный коэффициент использования заземлителя, учитывающий ухудшение условий растекания тока молнии вследствие взаимного экранирования электродов.

Импульсные коэффициенты даже для конкретного расположения и размеров электродов не являются величиной постоянной и зависят от амплитуды тока, удельного сопротивления и пробивной напряженности грунта.

Усредненные значения  $\delta_{\text{и}}$  и  $\eta_{\text{и}}$  для некоторых конструкций заземлителей приведены в табл. 1.

Расчет сопротивления заземлителя начинается с определения сопротивления железобетонного фундамента по формулам

Поскольку импульсное сопротивление фундамента, как правило, больше допустимого значения заземлителя ( $R_{\text{з}} = 10 \text{ Ом}$ ), то возникает необходимость сооружения дополнительного (искусственного) заземлителя. Параллельное соединение сопротивления фундамента и искусственного заземлителя не должно превышать 10 Ом. Поэтому импульсное сопротивление искусственного заземлителя вычисляется по следующей формуле

$$R_{\text{ии}} = \frac{R_{\text{з}} R_{\text{фи}}}{R_{\text{фи}} - R_{\text{з}}}$$

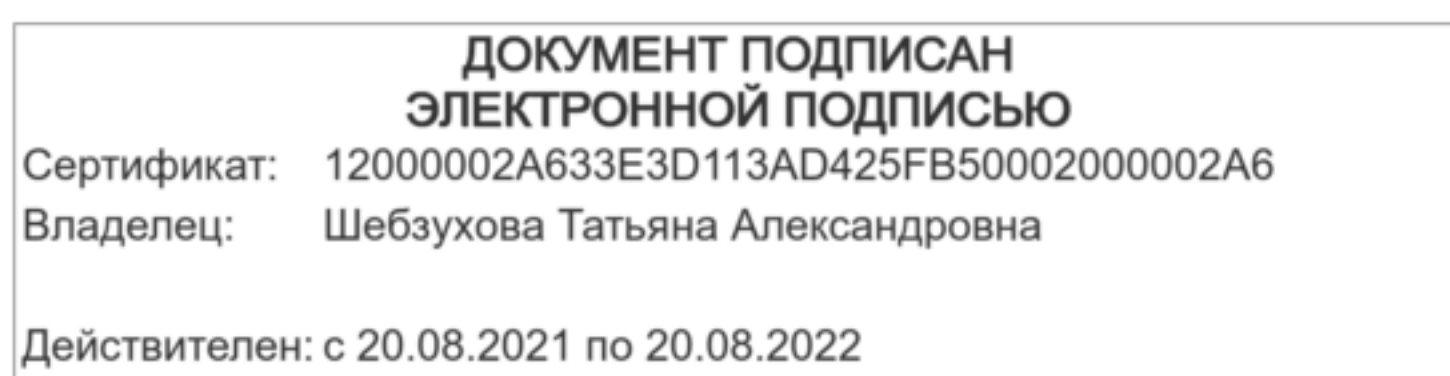




Таблица 1

| Заземлитель                                                                                                       | $\eta_{\text{и}}$ | $\delta_{\text{и}}$ при удельном сопротивлении $\rho$ , Ом·м |                |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|---------------|
|                                                                                                                   |                   | 100 (глина, чернозем)                                        | 200 (суглинок) | 500 (супесок) |
| Вертикальные стержни, соединенные полосой (расстояние между стержнями вдвое больше их длины) в количестве:        | 0,75              |                                                              |                |               |
| 2 – 4                                                                                                             |                   | 0,5                                                          | 0,45           | 0,3           |
| 8                                                                                                                 |                   | 0,7                                                          | 0,55           | 0,4           |
| 15                                                                                                                |                   | 0,8                                                          | 0,7            | 0,55          |
| Две горизонтальные полосы длиной по 5 м, расходящиеся в противоположные стороны от точки присоединения токоотвода | 1,5               | 0,65                                                         | 0,55           | 0,45          |

В качестве искусственного заземлителя в грунте с удельным сопротивлением  $\rho = (100 \div 200)$  Ом·м следует выбрать наиболее простой искусственный заземлитель, состоящий из двух горизонтальных полос шириной 0,04 м и длиной по 5÷10 м, симметрично расходящихся от точки присоединения токоотвода и расположенных на глубине 0,5 м.

Импульсное сопротивление такого заземлителя вычисляется по формулам и равно

$$R_{\text{пи}} = \frac{\left[ \left( \frac{\rho}{\pi l} \right) \ln \left( \frac{1.5l}{\sqrt{bt}} \right) \right] \delta_{\text{и}}}{\eta_{\text{и}} * n}$$

Значения коэффициентов  $\delta_{\text{и}}$ ,  $\eta_{\text{и}}$  выбирается по таблице 1.

Если импульсное сопротивление искусственного заземлителя в виде полос:

$$R_{\text{пи}} \leq R_{\text{ии}}$$

то общее импульсное сопротивление заземлителя

$$R_{\text{зи}} = \frac{R_{\text{фи}} \cdot R_{\text{пи}}}{R_{\text{фи}} + R_{\text{пи}}} \leq R_{\text{з}} = 10 \text{ Ом}$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Если неравенство не выполняется, то необходимо уменьшить импульсное сопротивление искусственного заземлителя. Для этого следует к горизонтальным полосам присоединить (с помощью сварки) вертикальные стержни в виде труб длиной  $2 \div 3$  м с диаметром 0,05 см. Трубы к полосам присоединять на расстоянии вдвое больше их длины.

Импульсное сопротивление вертикальных труб равно

$$R_{\text{три}} = \frac{\left( \frac{\rho}{2\pi l} \right) \ln \left( \frac{4l(2t+l)}{d(4t+l)} \right) \cdot \delta_{\text{и}}}{\eta_{\text{и}} \cdot n}$$

Значения коэффициентов  $\delta_{\text{и}}$ ,  $\eta_{\text{и}}$  выбирается по табл. 1. Изменяя количество или длину труб необходимо добиться, чтобы параллельное соединение  $R_{\text{пи}}$  и  $R_{\text{три}}$  было меньше или равно  $R_{\text{ии}}$ . Тогда

$$R_{\text{зи}} = \frac{R_{\text{фи}} \cdot R_{\text{пи}} \cdot R_{\text{три}}}{(R_{\text{фи}} R_{\text{пи}} + R_{\text{фи}} R_{\text{три}} + R_{\text{три}} R_{\text{пи}})} \leq R_{\text{з}} = 10 \text{ Ом}$$

Расчет импульсного сопротивления заземлителя по приведенной методике дает оценочный результат.

Но надо отметить, что сопротивление грунта величина переменная не только по глубине расположения элементов заземлителя, но оно изменяется в течение сезона грозовой деятельности в разной степени в разных районах страны.

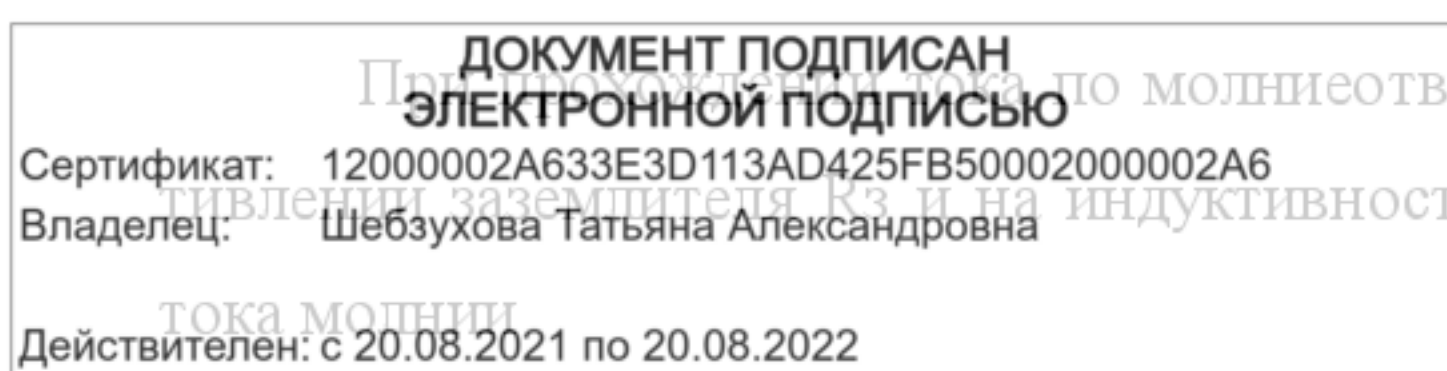
При измерениях удельного сопротивления грунта вводят так называемый сезонный коэффициент, который может изменяться от 1,4 до 2,6. Поэтому точные расчеты импульсных сопротивлений заземлителей на практике применяются редко.

Пространство вблизи молниеотвода, защищенное от попаданий молнии, называется его зоной защиты.

Зоны защиты молниеотводов установлены на основе лабораторных испытаний, и надежность их подтверждена многолетним опытом эксплуатации. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $H \leq 30$  м представляет собой круговой конус с вершиной на высоте  $0,9H$ , сечение которого на высоте  $h_x$  имеет радиус  $r_x$ .

Для объектов высотой  $h_x \leq 20$  м радиус  $r_x$  вычисляется по формуле

$$r_x = 1,5 \left( H - \frac{h_x}{0,92} \right)$$



При расчете зоны защиты молниеотвода создается падение напряжения на сопротивлении заземлителя  $R_{\text{з}}$  и на индуктивности токоотвода. При средней крутизне фронта



$$\alpha_{cp} = \frac{I_M}{\tau_\phi}$$

Максимальный потенциал в точке молниеотвода на расстоянии  $h_x = h$  от заземлителя, т.е. на высоте защищаемого объекта, наступает в момент максимума тока молнии

$$U_{hx} = R_3 I_M + L_o h \cdot \alpha_{cp}$$

где  $L_o$  — индуктивность единицы длины молниеотвода, зависящая от конструкции токоотвода.

Защищаемый объект должен полностью входить в зону защиты молниеотводов. Вместе с тем он должен располагаться на определенном расстоянии от них. Если это расстояние меньше допустимого, то при ударах молнии могут происходить перекрытия с частей молниеотвода на защищаемый объект. При установке отдельно стоящего стержневого молниеотвода должно соблюдаться безопасное расстояние по воздуху и в земле от молниеотвода и его заземлителей до элементов защищаемого объекта.

Минимально допустимое расстояние по воздуху  $l_{мин.в}$  от молниеотвода до защищаемого объекта рассчитывается с учетом допустимой напряженности электрического поля  $E = 500 \text{ кВ/м}$ , но не меньше 5 м.

$$l_{мин.в} = \frac{R_3 I_M + L_o h \cdot \alpha_{cp}}{500} \geq 5 \text{ м}$$

Максимальный потенциал в точке молниеотвода на уровне земли наступает также в момент максимума тока молнии и равен

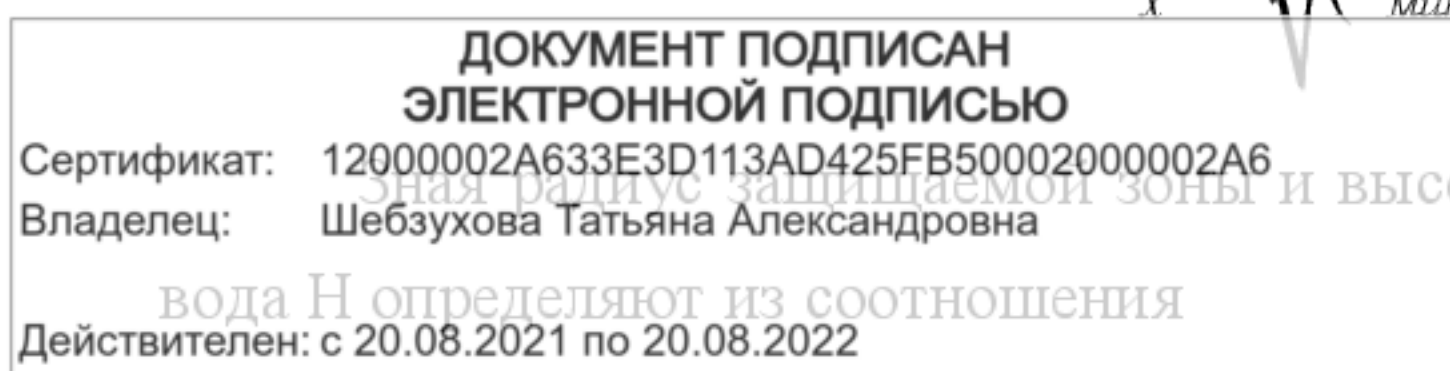
$$U_3 = R_3 I_M$$

Минимальное расстояние в земле  $l_{мин.з}$  между заземлителем и ближайшей к нему точкой заземления защищаемого объекта рассчитывается с учетом допустимой напряженности электрического поля в земле  $E = 300 \text{ кВ/м}$ , но не меньше 3 м.

$$l_{мин.з} = \frac{R_3 I_M}{300} \geq 3 \text{ м}$$

Радиус защищаемой зоны молниеотвода на высоте защищаемого объекта  $h$  определяется, используя теорему Пифагора

$$r_x = \sqrt{(l_{мин.в} + a)^2 + \left(\frac{e}{2}\right)^2}$$



Зная радиус защищаемой зоны и высоту защищаемого объекта, высоту молниеотвода  $H$  определяют из соотношения



$$H = \left( \frac{r_x}{1,5} \right) + 1,09h$$

В электроэнергетике часто принимают расчетные значения тока молнии и средней крутизны его фронта, соответственно, 60 кА и 30 кА/мкс, а индуктивность единицы длины токоотвода  $L_o = 1,7 \text{ мкГн/м}$ .

$$l_{\text{мин.д}} = 0,12R_3 + 0,1h$$

$$l_{\text{мин.з}} = 0,2R_3$$

Отметим, что на практике иногда приходится по известным  $I_{\text{мин.з}}$ ,  $I_{\text{мин.в}}$  и  $h$  находить по вышеприведенным формулам величину сопротивления заземления, обеспечивающую безопасность сближения молниеотвода и защищаемого объекта.

### **Указание к решению задачи №3**

Решить согласно ПУЭ.

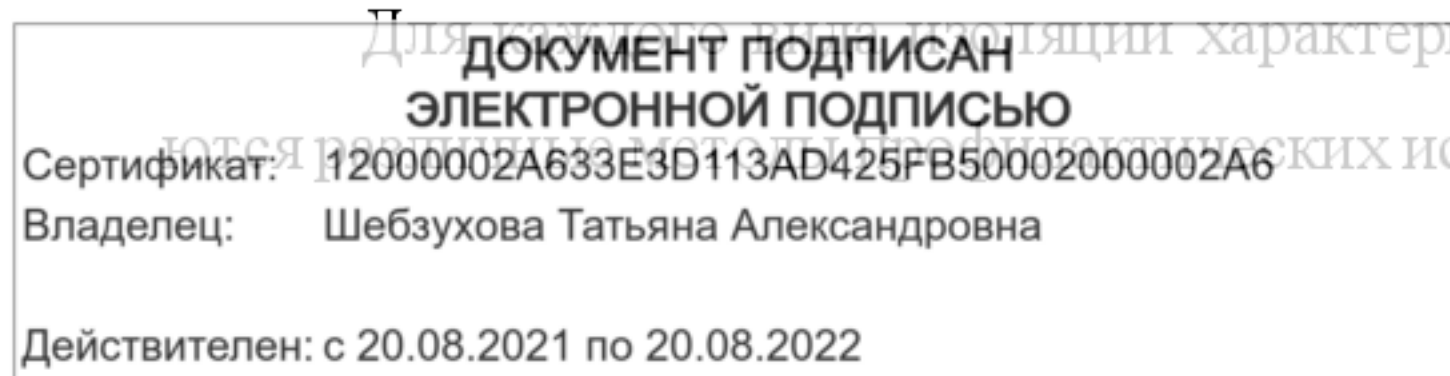
### **Указание к решению задачи №4**

В процессе эксплуатации высоковольтного оборудования из-за перегрева, увлажнения, механических повреждений и пере напряжений происходит общее старение изоляции. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты. Постепенно развиваясь, эти дефекты способны настолько снизить пробивное или разрядное напряжение, что изоляция может не выдержать перенапряжений, время от времени появляющихся в электрических системах, или даже рабочего напряжения.

В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены путем простого осмотра изоляции и для их выявления необходимы специальные методы испытаний, которые называются профилактическими.

Группа профилактических методов контроля изоляции, при которых используются по сравнению с рабочими малые напряжения и различные косвенные способы оценки характеристик изоляции называется неразрушающие испытания. Другую группу испытаний с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте, называют разрушающими испытаниями.

Для каждого вида изоляции характерны определенные виды дефектов и применяются соответствующие методы испытаний. Периодичность и нормы испытаний



устанавливаются стандартами и ведомственными инструкциями для каждого вида электрооборудования.

Согласно существующим представлениям основной причиной старения внутренней изоляции при воздействии сильных электрических полей являются так называемые частичные разряды (ЧР). ЧР возникают в газовых включениях или прослойках жидкого диэлектрика. Скорость разрушения изоляции зависит от интенсивности ЧР. Регистрация интенсивности ЧР во время эксплуатации высоковольтного оборудования и в лабораторных условиях проводится с помощью электрических, оптических и ультразвуковых методов.

Проникновение в изоляцию из окружающей среды влаги, различных примесей и кислорода значительно ускоряют процессы старения изоляции.

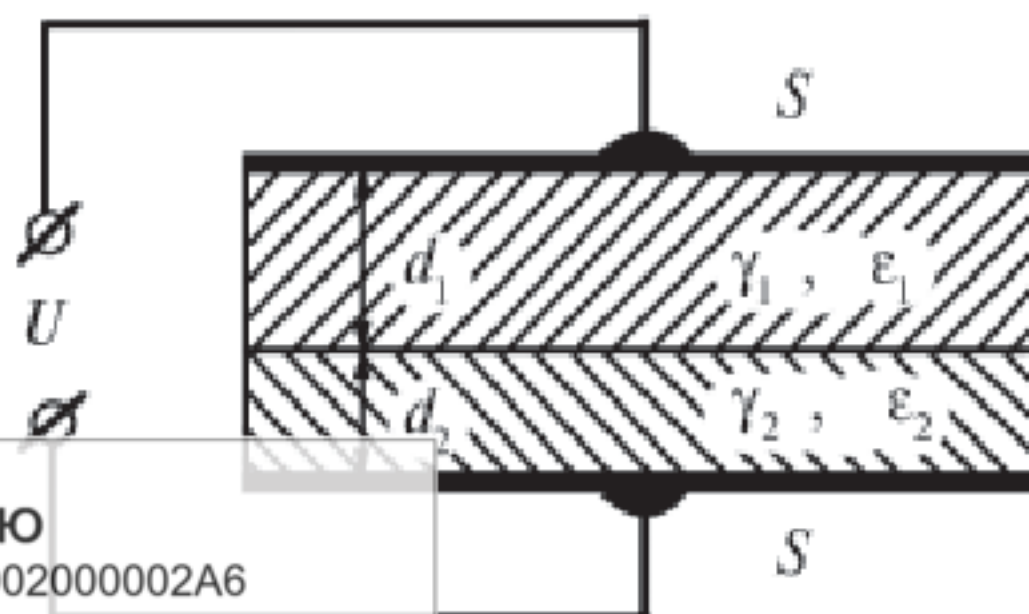
При неразрушающих методах испытаний для оценки качества изоляции используются измерения характера изменения характеристик диэлектриков во времени, от частоты испытательного напряжения и от температуры.

В качестве внутренней изоляции высоковольтного оборудования очень часто применяются комбинации диэлектриков, сочетание которых позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. В частности, очень большое распространение получила слоистая изоляция, в состав которой входят пропитанные маслами волокнистые материалы типа бумаги (кабели, конденсаторы, трансформаторы и др.).

Ухудшение качества слоистой изоляции в большинстве случаев происходит путем более или менее однородного изменения свойств одного из слоев, тогда как характеристика других слоев остаются практически неизменными. Это приводит к изменению неоднородности изоляции. По характеру этого изменения можно судить о состоянии изоляции.

В простейшем случае неоднородная изоляция состоит из двух слоев, каждый из которых характеризуется своей удельной проводимостью слоев  $\gamma$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Модель двухслойного диэлектрика представлена на рис. 2.

Для анализа процессов в модели двухслойной изоляции можно использовать схемы замещения, показанные на рис. 2. В схеме на рис. 3, а сопротивление утечки первого и второго слоев в установившемся режиме соответственно равны:



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 2 – Модель двухслойного диэлектрика



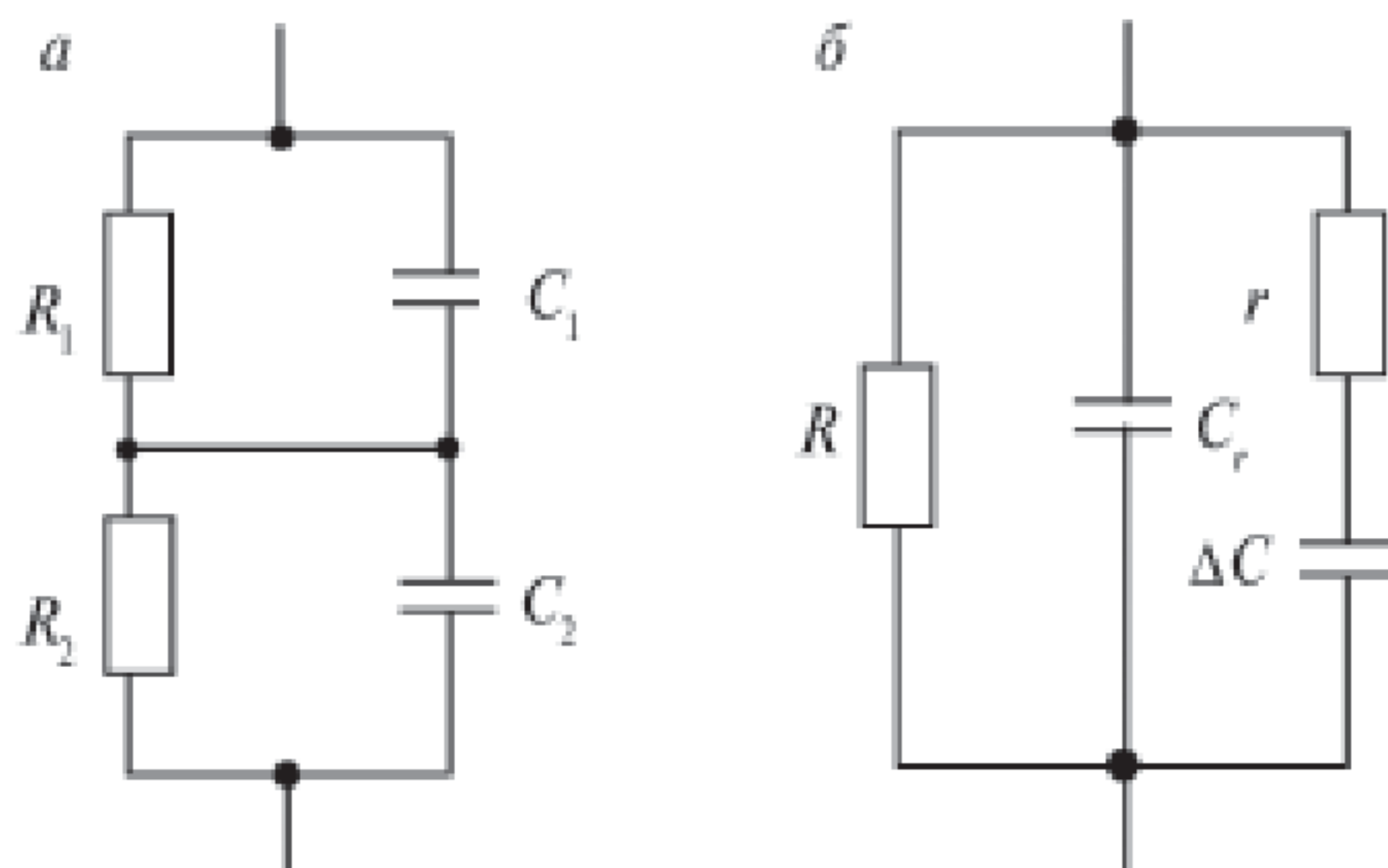


Рисунок 3 – Схема замещения двухслойного диэлектрика

При подключении диэлектрика к источнику с постоянным напряжением, кроме постоянного тока утечки из-за миграционной поляризации диэлектриков, в течение непродолжительного времени наблюдается так называемый ток абсорбции.

Со временем ток абсорбции спадает до нуля по экспоненциальному закону. В процессе старения изоляции, например увлажнении одного из слоев, ток абсорбции уменьшается. Это обстоятельство используется для контроля состояния изоляции.



### 5. План-график выполнения задания

Работа над контрольной работой может быть представлена в виде выполнения следующих этапов:

| №<br>п/п | Наименование этапа                           | Сроки выполнения                     |
|----------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1.       | Получения задания                            | На первом<br>практическом занятии    |
| 2.       | Первичная консультация с преподавателем      | На первом<br>практическом занятии    |
| 3.       | Работа с информационными источниками         | В течении сессии                     |
| 4.       | Написание контрольной работы                 | В течении сессии                     |
| 5.       | Предоставление контрольной работы на кафедру | В течении сессии                     |
| 6.       | Защита контрольной работы                    | На последнем<br>практическом занятии |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## 6. Критерии оценивания работы

В целях повышения качества выполняемых контрольных работ преподаватель руководствуется следующими критериями оценивания письменных работ студентов.

### **Оценка «зачтено (отлично)» выставляется, если студент:**

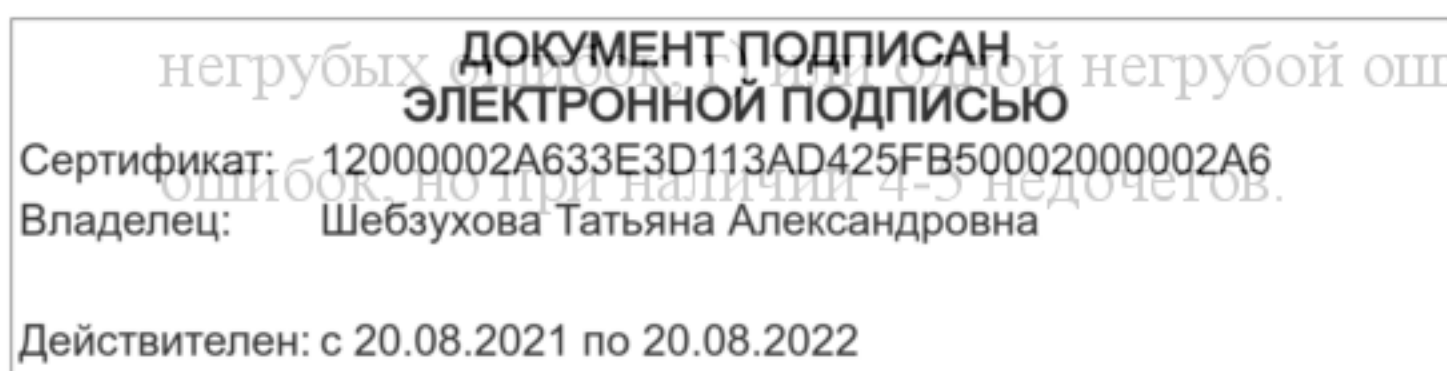
- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в строгом соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную учебную и страноведческую литературу;
- при выполнении упражнений показал высокий уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, проявил творческий подход при ответе на вопросы, умение глубоко анализировать проблему и делать обобщающие выводы;
- выполнил работу грамотно с точки зрения поставленной задачи, т.е. без ошибок и недочетов или допустил не более одного недочета.

### **Оценка «зачтено (хорошо)» выставляется, если студент:**

- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную литературу;
- при выполнении упражнений показал хороший уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, практически правильно сформулировал ответы на поставленные вопросы, представил общее знание информации по проблеме;
- выполнил работу полностью, но допустил в ней: а) не более одной негрубой ошибки и одного недочета б) или не более двух недочетов.

### **Оценка «зачтено (удовлетворительно)» выставляется, если студент:**

- представил работу в установленный срок, при оформлении работы допустил незначительные отклонения от изложенных требований;
- показал достаточные знания по основным темам контрольной работы;
- использовал рекомендованную литературу;
- выполнил не менее половины работы или допустил в ней а) не более двух грубых ошибок, б) или не более одной грубой ошибки и одного недочета, в) или не более двух-трех негрубых ошибок, г) или не более одной грубой ошибки и трех недочетов, д) или при отсутствии





**Оценка «незачтено (неудовлетворительно)» выставляется:**

- когда число ошибок и недочетов превосходит норму, при которой может быть выставлена оценка «зачтено (удовлетворительно)» или если правильно выполнено менее половины работы;
- если студент не приступал к выполнению работы или правильно выполнил не более 10 процентов всех заданий.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



## **7. Порядок защиты работы**

Написанная студентом контрольная работа сдается на кафедру в срок для рецензирования. Студент защищает расчетно-графическую работу до экзамена (зачета) перед преподавателем. Без защиты КР студент к экзамену (зачету) не допускается.

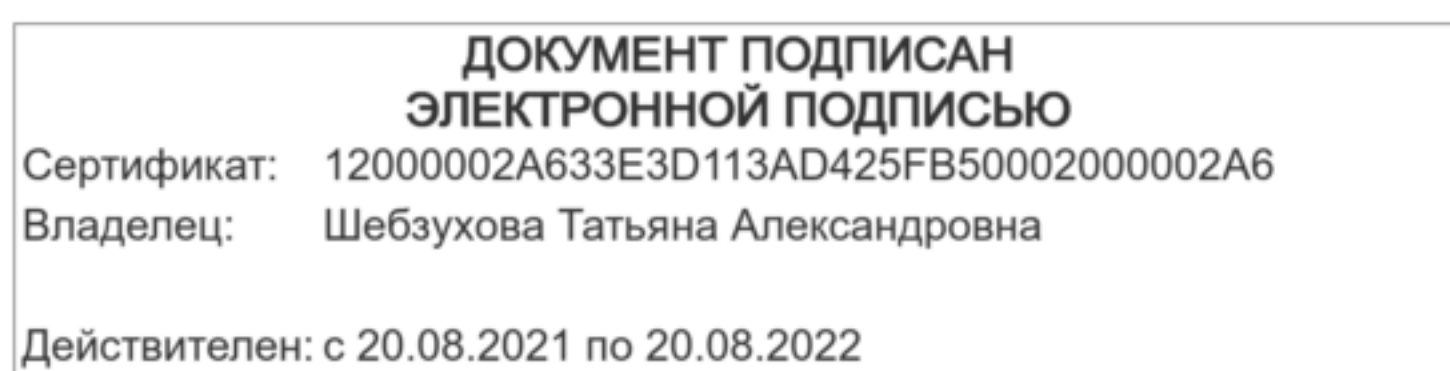
Работа не допускается к защите, если она не носит самостоятельного характера, списана из литературных источников или у других авторов, если основные вопросы не раскрыты, изложены схематично, фрагментарно, в тексте содержатся ошибки, научный аппарат оформлен неправильно, текст написан небрежно.

В ходе защиты контрольной работы задача студента — показать углубленное понимание вопросов конкретной темы, хорошее владение материалом по теме.

Защита расчетно-графической работы может проходить в различных формах по усмотрению преподавателя:

- в форме индивидуальной беседы студента с руководителем по основным положениям работы;
- в форме индивидуальной защиты в присутствии всей группы студентов;
- в форме групповой защиты – одновременной защиты контрольной работы по одному направлению. В этом случае каждый следит за ходом рассуждений товарищей, дополняет, уточняет их, что, несомненно, усиливает работу мысли и способствует развитию экономического мышления.

Любая форма защиты контрольной работы учит отстаивать свою точку зрения, убедительно аргументировать ее, что способствует перерастанию знаний в убеждения.



## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **8.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **8.1.2 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>

#### **8.1.3 Перечень дополнительной литературы:**

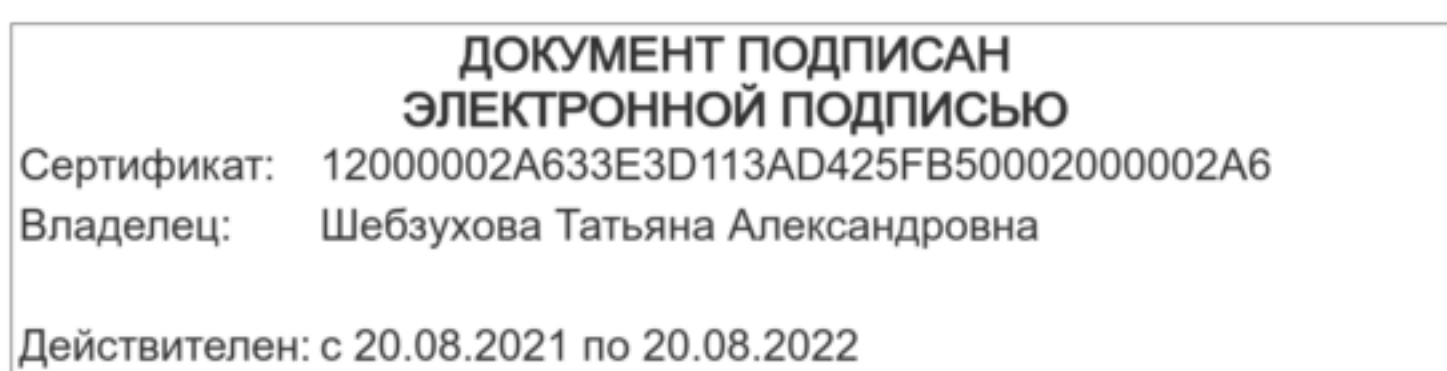
1. .Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

### **8.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Техника высоких напряжений».
2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным работам по дисциплине «Техника высоких напряжений».
3. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».
4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Техника высоких напряжений».

### **8.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины**

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks





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 организации самостоятельной работы обучающихся  
по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



## Содержание

- Введение
- 1 Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Техника высоких напряжений»
  - 2 План-график выполнения самостоятельной работы
  - 3 Контрольные точки и виды отчетности по ним
  - 4 Методические рекомендации по изучению теоретического материала
  - 5 Методические указания по подготовке к контрольной работе
  - 6 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

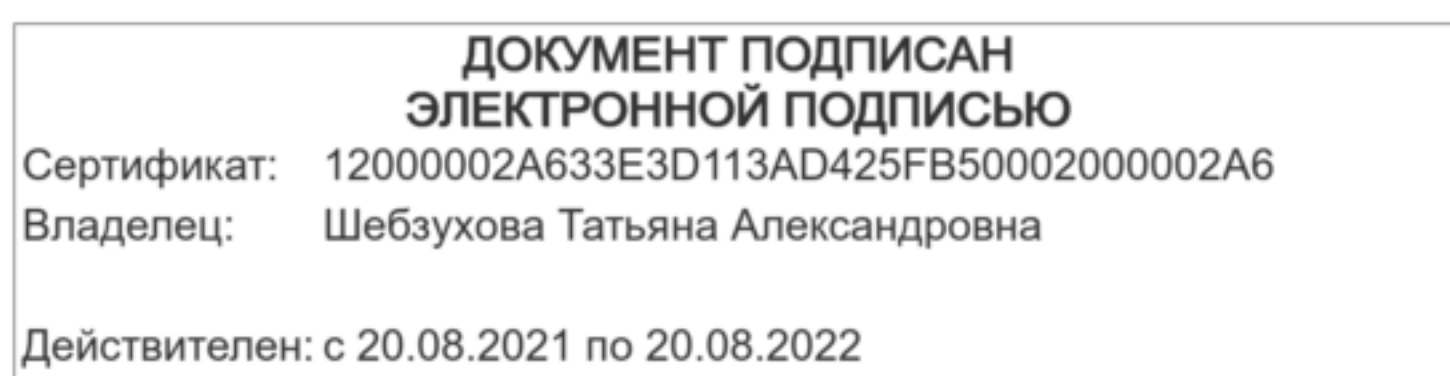
## Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.





## Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Техника высоких напряжений»

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

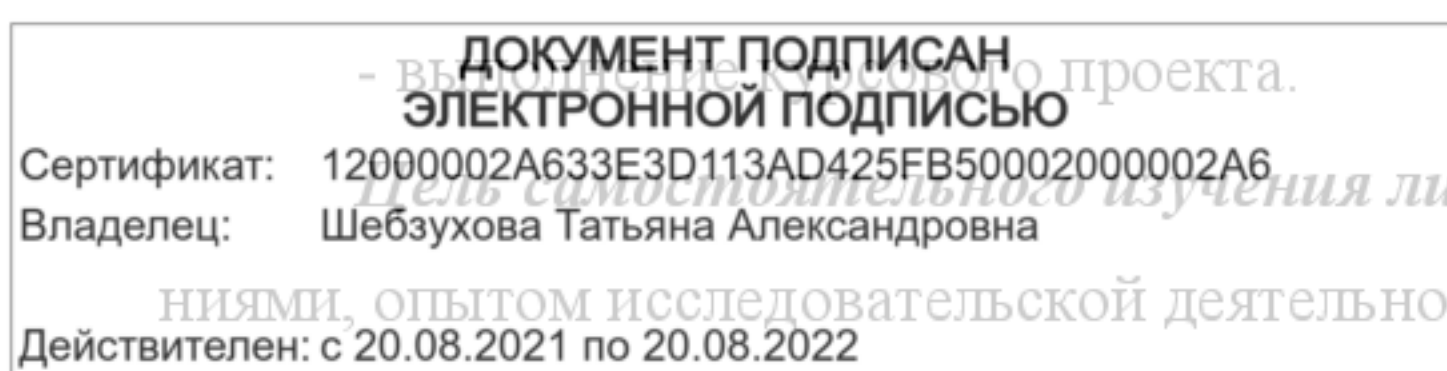
Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;



- в рамках учебного проекта.

Цель самостоятельного изучения литературы – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.



**Задачами** самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

**Цель самостоятельного решения задач** - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

**Задачами** самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

**Целью самостоятельного выполнения расчетно-графической работы** по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

**Задачами** данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовой работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

| Код, формулировка компетенции                                      | Код, формулировка индикатора                                                                                                     | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения | ИД-3 <sub>ПК-1</sub> Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения | <p>Знает основные физические явления, механизмы воздействия электромагнитных полей высокого напряжения на изоляцию в различных условиях эксплуатации.</p> <p>Умеет обосновывать выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.</p> <p>Владеет навыками выбора параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.</p> |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



### План-график выполнения самостоятельной работы

| Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов) | Вид деятельности студентов                         | Средства и технологии оценки                             | Объем часов, в том числе |                                    |       |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------|
|                                              |                                                    |                                                          | СРС                      | Контактная работа с преподавателем | Всего |
| 5 семестр                                    |                                                    |                                                          |                          |                                    |       |
| ПК-1 ИД-3 <sub>ПК-1</sub>                    | Самостоятельное изучение литературы по темам №1 -9 | Собеседование                                            | 54,18                    | 6,02                               | 60,2  |
|                                              | Подготовка к лекциям                               | Собеседование                                            | 0,27                     | 0,03                               | 0,3   |
|                                              | Подготовка к практическим занятиям                 | Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач | 0,54                     | 0,06                               | 0,6   |
|                                              | Подготовка к лабораторным работам                  | Собеседование                                            | 0,81                     | 0,09                               | 0,9   |
|                                              | Выполнение контрольной работы                      | Собеседование                                            | 9                        | 1                                  | 10    |
| Итого за 5 семестр:                          |                                                    |                                                          | 64,8                     | 7,2                                | 72    |
| Итого:                                       |                                                    |                                                          | 64,8                     | 7,2                                | 72    |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

## **Контрольные точки и виды отчетности по ним**

В рамках рейтинговой системы успеваемость студентов по каждой дисциплине оценивается в ходе текущего контроля и промежуточной аттестации.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



## Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

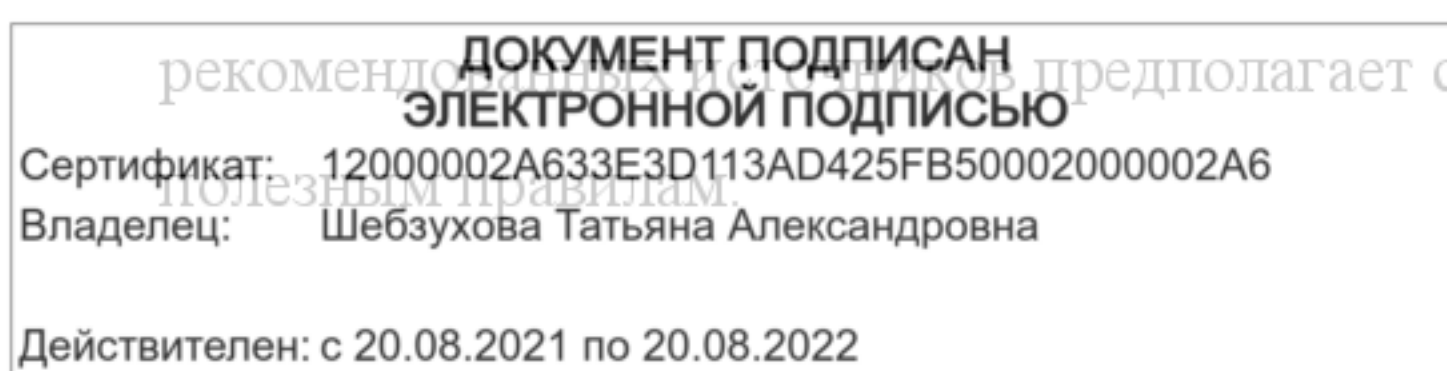
Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение

рекомендованной литературы предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.



Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

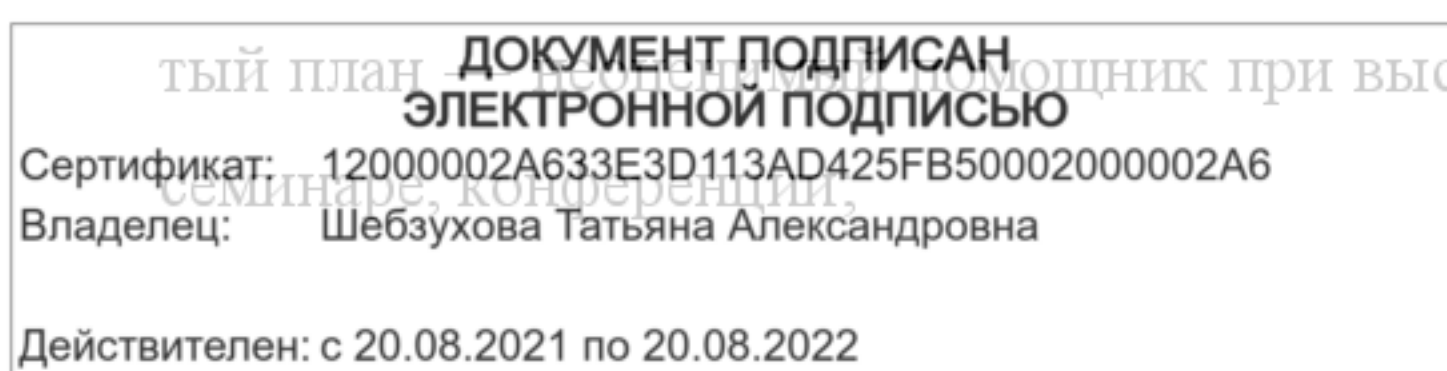
Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Разверну-

тый план — это документ, который используется при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции.





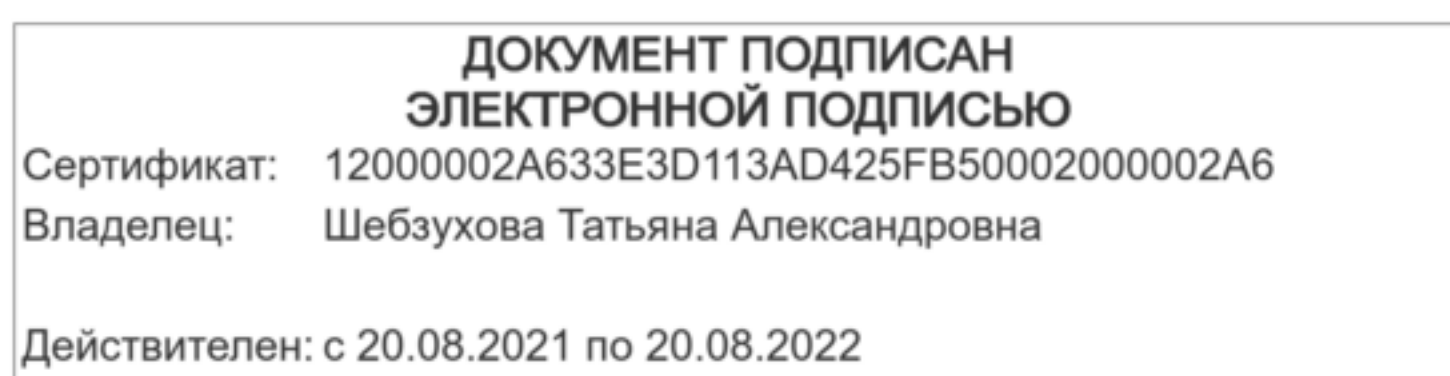
— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

#### Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.



### ***Методические указания по подготовке к контрольной работе***

Контрольная работа – это самостоятельная письменная работа студента, которая должна показать не только его владение теоретическим материалом, но и продемонстрировать практические умения проводить расчеты.

Цели выполнения контрольной работы заключаются:

- закрепить и систематизировать теоретические знания и практические навыки студента;
- научить работать с литературой – изучать, анализировать информацию из научных источников;

При выполнении контрольной работы реализуются следующие компетенции:

| Код, формулировка компетенции                                      | Код, формулировка индикатора                                                                                                     | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения | ИД-3 <sub>ПК-1</sub> Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения | <p>Знает основные физические явления, механизмы воздействия электромагнитных полей высокого напряжения на изоляцию в различных условиях эксплуатации.</p> <p>Умеет обосновывать выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.</p> <p>Владеет навыками выбора параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.</p> |

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



***Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины***

***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>

***Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине***

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Техника высоких напряжений».
2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным работам по дисциплине «Техника высоких напряжений».
3. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».
4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Техника высоких напряжений».

***Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks