

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра электромеханики

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

Практикум
по дисциплине
«Техника высоких напряжений»



Уфа 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра электромеханики

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

Практикум
по дисциплине
«Техника высоких напряжений»

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ

Уфа 2021

Авторы-составители: А. В. Лобанов, Ю. В. Рахманова, Л. Э. Рогинская

Техника высоких напряжений. Примеры и задачи: практикум по дисциплине «Техника высоких напряжений» [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т ; [авт.-сост. : А. В. Лобанов, Ю. В. Рахманова, Л. Э. Рогинская]. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-70.pdf

Рассмотрены типовые задачи и примеры по разделам курса «Техника высоких напряжений»: «Электрическое поле в изолирующей среде»; «Электрическая прочность диэлектриков».

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рецензент канд. техн. наук, доцент Ю. О. Уразбахтина

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Авторы-составители: *Лобанов Андрей Владимирович*
Рахманова Юлия Владиславовна
Рогинская Любовь Эммануиловна

Компьютерная верстка: *А. А. Шарипова*

Программирование и компьютерный дизайн: *А. П. Меркулова*

Подписано к использованию: 10.06.2021
Объем 943 Кб

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.
Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: rik@ugatu.su

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

ВВЕДЕНИЕ

Техника высоких напряжений имеет очень широкий спектр применений во многих областях современной индустрии. Важное место она занимает в развитии электроэнергетики России XXI века для передачи все возрастающих мощностей электрической энергии на большие расстояния и обеспечения стабильной работы электроэнергетических систем. Основное преимущество высокого напряжения при электропередаче состоит в увеличении передаваемой мощности, которая возрастает пропорционально квадрату номинального напряжения. В связи с этим большое значение приобретают вопросы создания нового и совершенствования существующего комплекса высоковольтного оборудования, предназначенного для генерирования, передачи и распределения электрической энергии: генераторов, трансформаторов, конденсаторов, изоляции линий электропередачи и подстанций.

Высокое напряжение используется в электрофизических установках для решения задач мощной импульсной энергетики: ускорителях пучков заряженных частиц, мощных лазерах, установках управляемого термоядерного синтеза. Применяется в технологических процессах, таких как электросепарация, электрофильтрация, электроокраска, магнитоимпульсная обработка, электрогидравлическая штамповка, плазмохимия, получение озона. Особая роль принадлежит такой быстроразвивающейся области нанотехнологии, как синтез наноструктурных материалов с новыми свойствами. Синтез таких материалов проводится в специальных установках при воздействии концентрированных потоков энергии в виде потоков плазмы и пучков заряженных частиц, основным узлом которых является высоковольтный импульсный генератор.

В связи с этим изучение дисциплины «Техника высоких напряжений» приобретает все возрастающую важность.

ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ИЗОЛИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

Основной характеристикой электрического поля в заданной точке является его напряженность.

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

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

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

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

Нулевым потенциалом условно обладают точки, удаленные в бесконечность от заряда или заземленные.

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

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

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

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

Из определения потенциала как энергии единичного заряда, внесенного в данную точку поля $\Delta\phi$, следует, что разность потенциалов между двумя точками поля есть приращение или убыль

этой энергии. Для заряда, по величине отличного от единицы, это приращение энергии можно рассматривать как работу ΔA , произведенную силой qE на отрезке пути Δa .

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

$$-\Delta A = qE \Delta a.$$

Отсюда может быть получена математическая связь между потенциалом и напряженностью:

$$-d\phi = -dA/q = E da,$$

или

$$E = -d\phi/da \text{ [В/м]}. \quad (1.1)$$

Используя зависимость (1.1), дадим новое определение напряженности: напряженность электрического поля есть скорость убывания (знак минус) потенциала по направлению силовых линий поля.

Диэлектрическая проницаемость (ϵ , Ф/м) – основная характеристика электрических свойств изолирующего материала, физически характеризующая интенсивность процессов поляризации в среде диэлектрика, происходящих под действием внешнего электрического поля. Математически она может быть представлена произведением двух величин:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon' \text{ [Ф/м]}, \quad (1.2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, установленная опытным путем; ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость материала (величина безразмерная).

Значения относительных диэлектрических проницаемостей для различных материалов приводятся в справочных материалах.

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

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

По мере протекания процесса поляризации в диэлектрике на поверхности электродов накапливаются заряды. Опыт показывает, что между величиной накопившегося заряда Q и величиной напряжения U между электродами существует связь, зависящая от геометрических размеров конденсатора и рода диэлектрика. Эту связь с количественной стороны характеризует емкость C .

Емкость есть отношение заряда к напряжению $C=Q/U$.

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

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

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

$$C = \frac{I * 10^6}{U2\pi f}.$$

Если расчет емкости производится в процессе конструирования изделия, то сложная форма проводящих поверхностей приводится к геометрически правильной системе: плоскость – плоскость, цилиндр – цилиндр, сфера – сфера, для которых можно установить единую математическую последовательность расчета емкости и напряженности.

Задачи

Задача 1.1. Между двумя точками в изолирующей среде, расположенными на расстоянии 2 мм, действует разность потенциалов 400 В. Определить среднюю напряженность электрического поля на заданном участке.

Решение. Используя зависимость (1.1) и считая, что изменение потенциала линейно, имеем

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta a} = \frac{0,4}{0,2} = 2 \text{ кВ/см.}$$

Задача 1.2. Определить диэлектрическую проницаемость кварцевого стекла, если относительная диэлектрическая проницаемость равна 4,0.

Решение. В соответствии с зависимостью (1.2) имеем $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon'$. Откуда, подставив известные величины, получим

$$\varepsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 = 0,35 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/м.}$$

Задача 1.3. Определить емкость конденсатора в мкФ, если при частоте 50 Гц ток в цепи с конденсатором равен 5 мА, а напряжение, приложенное к электродам – 400 В.

Решение: Используя известное из электротехники соотношение получим

$$C = \frac{I \cdot 10^6}{U 2\pi f} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{400 \cdot 314} = 0,04 \text{ мкФ.}$$

Задача 1.4. Конденсатор емкостью 3 мкФ заряжен до напряжения 4 кВ. Определить величину заряда, накопленного на его электродах.

Решение. Применяя известную зависимость, имеем

$$Q = C \cdot U = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^3 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Кл.}$$

Задача 1.5. Для измерения напряжения 110 кВ применена схема емкостного делителя, состоящая из двух последовательно

соединенных конденсаторов C_1 и электростатического вольтметра на напряжение 10 кВ, шунтированного конденсатором емкостью $C_2 = 100$ пФ. Определить емкость каждого из конденсаторов C_1 , если емкость вольтметра $C_B = 20$ пФ.

Решение. Эквивалентная емкость вольтметра и конденсатора C_2 равна сумме их емкостей:

$$C_{2B} = 20 + 100 = 120 \text{ пФ.}$$

Эквивалентная емкость двух конденсаторов C_1 , соединенных последовательно, равна

$$C_{11} = C_1/2.$$

Найдем эквивалентную емкость всей схемы:

$$C_{\text{ЭКВ}} = \frac{U_B \cdot C_{2B}}{U} = \frac{10 \cdot 120}{110} = 10,9 \text{ пФ.}$$

Кроме того, справедливо соотношение

$$C_{\text{ЭКВ}} = \frac{C_{2B} \cdot C_{11}}{C_{2B} + C_{11}},$$

откуда, после введения найденных величин, имеем

$$C_1 = 2 \cdot C_{11} = 24 \text{ пФ.}$$

Примеры для самостоятельного решения

Пример 1.1. Определить электрическое смещение в точке электрического поля напряженностью 10 кВ/см, если изолирующей средой является воздух.

Ответ. $0,885 \cdot 10^{-9}$ Кл/см².

Пример 1.2. Определить величину связанного заряда, индуцированного на проводящей пластинке в 1 см^2 , внесенной в электрическое поле перпендикулярно силовым линиям. Напряженность электрического поля 12 кВ/см . Изолирующей средой является трансформаторное масло с относительной диэлектрической проницаемостью, равной $2,5$.

Ответ. $2,65 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$.

Пример 1.3. Определить среднюю напряженность электрического поля на участке протяженностью $0,4 \text{ мм}$, если разность потенциалов между точками, ограничивающими участок, 600 В .

Ответ. 15 кВ/см .

Пример 1.4. Потенциалы электродов изолированного от земли конденсатора равны $\pm 2000 \text{ В}$. Определить напряжение, действующее между его выводами.

Ответ. 4000 В .

Пример 1.5. Определить величину заряда конденсатора емкостью 2 мкФ , если напряжение между его выводами 100 В .

Ответ. $2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$.

Пример 1.6. Плоский конденсатор с воздушной изоляцией имеет емкость 100 пФ и заряжен до напряжения 2 кВ . Определить напряженность электрического поля между его электродами, имеющими площадь 625 см^2 .

Ответ. $3,63 \text{ кВ/см}$.

Пример 1.7. Одиночная сфера в воздухе имеет емкость 20 пФ и заряжена до напряжения 30 кВ . Определить напряженность электрического поля у поверхности сферы, если ее радиус 20 см .

Ответ. $1,35 \text{ кВ/см}$.

Контрольные вопросы

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

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

2.1. Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде

В нормальных условиях, для которых принято атмосферное давление в 760 мм рт. ст., температура 293° К (20° С) и содержание влаги 11 г/м³, 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 10⁻⁶ 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.

При процессе ударной ионизации 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 λ заряженной частицы, которая определяет число столкновений частиц $1/\lambda$ на единицу длины газового промежутка, что в свою очередь зависит от плотности газовых частиц в объеме, т.е. от давления газа p и величины A , характеризующей размеры сталкивающихся частиц. Математически эту зависимость можно выразить формулой

$$\frac{1}{\lambda} = Ap. \quad (2.1)$$

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

$$I = I_0 e^{\alpha a}, \quad (2.2)$$

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

$$\alpha = Ape^{-\frac{U_{\text{и}}}{\lambda E}}, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{и}}$ – 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 α для воздуха составляет $10 \div 15 \text{ см}^{-1}$.

При процессе поверхностной ионизации 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 γ .

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 $\gamma = (0,02 \div 0,04)$, т.е. на каждые 100 соударений освобождаются с поверхности катода только 2–4 электрона.

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

Таким образом, пробой газа и любая другая форма газового разряда связана с движением в электрическом поле имеющих 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.

Задачи

Задача 2.1. Воздушный промежуток в 1 см между плоскими электродами характеризуется давлением 760 мм рт. ст. и напряженностью электрического поля 29 кВ/см. Определить число электронов, достигающих анода, если с катода отрывается 1 эл/с, а в промежутке происходит процесс ударной ионизации.

Решение. В соответствии с зависимостью $\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$ коэффициент ударной ионизации $\alpha = 10$. Прирост числа электронов на пути dx выражается формулой

$$dn = n \cdot \alpha dx,$$

откуда

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx,$$

и после интегрирования имеем

$$\ln n = \ln e^{\alpha x} + \ln k, \quad n = k \cdot e^{\alpha x}.$$

Так как при $x = 0$ $n_0 = k$, то $n = n_0 e^{\alpha x}$. Подставив заданные величины, получим:

$$n = 1 \cdot e^{10 \cdot 1},$$

$$\ln n = 10 \ln e = 10,$$

откуда

$$n = 2,2 \cdot 10^4 \text{ электр/с.}$$

Задача 2.2. Рассчитать число электронов в лавине, развивающейся в воздухе при различных атмосферных условиях под действием однородного электрического поля с напряженностью E , после прохождения лавиной пути x .

Дано: $t = 21^\circ\text{C}$, $P = 770$ мм рт. ст., $E = 32$ кВ/см, $x = 1$ см.

Найти: $n = ?$

Решение. Допустим, что в лавине, прошедшей расстояние x , содержится n электронов. На пути dx каждый из них произведет $\alpha_{\text{эф}} \cdot dx$ ионизаций, поэтому увеличение числа электронов в лавине на пути dx

$$\partial n = \alpha_{\text{эф}} n \partial x \rightarrow \frac{\partial n}{n} = \alpha_{\text{эф}} \partial x \rightarrow \int_0^x \frac{\partial n}{n} = \int_0^x \alpha_{\text{эф}} \partial x.$$

Если электрическое поле однородное и напряженность его всюду одинакова, то коэффициент свойства α не зависит от координаты x , поэтому получаем

$$n = e^{\alpha_{\text{эф}} x},$$

где $\alpha_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент ионизации; x – путь, пройденный лавиной.

Коэффициент $\alpha_{\text{эф}}$ представляет собой разность между коэффициентом ударной ионизации α и коэффициентом прилипания электронов η , равным числу актов захвата на пути в 1 см, т.е. $\alpha_{\text{эф}} = \alpha - \eta$.

Величина $\alpha_{\text{эф}}$ для воздуха рассчитывается по эмпирической формуле

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{0,2}{\delta} (E - 24,5\delta)^2,$$

где δ – относительная плотность воздуха, E – напряженность электрического поля, кВ/см.

Относительная плотность воздуха рассчитывается:

$$\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T},$$

где P_0 и T_0 – давление и температура при нормальных атмосферных условиях: $P_0 = 101,3$ кПа = 760 мм рт. ст., $T_0 = (273+20) = 293$ К, P и T – давление и температура воздуха в расчетных условиях.

Рассчитываем величину δ

$$\delta = \frac{770 \cdot 293}{760 \cdot (273 + 21)} = 1,009.$$

Рассчитываем коэффициент $\alpha_{\text{эф}}$ при напряженности поля $E = 32$ кВ/см

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{0,2}{1,009} \cdot (32 - 24,5 \cdot 1,009)^2 = 10,503 \frac{1}{\text{см}}.$$

Находим число электронов в лавине при $x = 1$ см

$$n = e^{10,503 \cdot 1} = 36424,6.$$

Задача 2.3. Для измерения напряжения, близкого к 200 кВ, используются шаровые разрядники. Определить, исходя из величины допустимой погрешности измерения, наименьший и наибольший диаметры их сфер.

Решение. Приняв за среднюю пробивную напряженность величину 30 кВ/см, определим необходимое расстояние между шарами, считая поле равномерным

$$a = \frac{U_{max}}{E} = \frac{200}{30} \approx 7 \text{ см.}$$

Точность измерений сохраняется при соблюдении зависимости

$$0,54\sqrt{r} \leq a \leq 2r,$$

откуда минимальный диаметр шаров $D = 7$ см.

Для расчета максимального диаметра примем крайнее условие:

$$0,54\sqrt{r} = a; r = \left(\frac{a}{0,54}\right)^2 = \left(\frac{7}{0,54}\right)^2 = 169 \text{ см,}$$

откуда максимальный диаметр шаров будет

$$D = 338 \text{ см.}$$

Примеры для самостоятельного решения

Пример 2.1. 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.

Ответ. $7,25 \cdot 10^9$.

Пример 2.2. Расстояние между токоведущими выводами трансформатора равно 120 см. Определить кратность перенапряжения, при котором происходит перекрытие этого промежутка, и коэффициент его импульсной прочности.

Ответ. Кратность 3,7; коэффициент импульсной прочности 1,14.

Пример 2.3. 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/м³.

Ответ. 156 кВ макс; 28,2 кВ макс/см.

Пример 2.4. 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.

Ответ. 12 300 эл.

2.2. Основные формы разрядов в газах и их использование

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/см² и 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, называемой квантом или фотоном, величину которой можно выразить как разность энергетических уровней двух орбит.

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

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

Из физики известно, что пучок солнечного света разлагается стеклянной призмой на лучи различных цветов, образуя спектр. Каждому цвету соответствуют определенные длины волн. Красному цвету, например, соответствуют электромагнитные колебания с длинами волн в пределах 6300–7700 Å.

Дуговой разряд – самостоятельный электрический разряд в газе, горящий при относительно низком напряжении, которое соответствует значениям потенциала ионизации атомов газа (единицы-десятки Вольт). Особенностью дуговых разрядов является существование больших токов (1...100 кА), которые ограничиваются только мощностью источника питания разряда.

Впервые дуговой разряд наблюдался между двумя угольными электродами в воздухе в 1802 г. В. В. Петровым. Светящийся токовый канал этого разряда при горизонтальном расположении электродов из-за гравитации дугообразно изогнут, что и обусловило название. Характерной чертой дугового разряда является наличие очень яркого, малого по размеру пятна на катоде (*катодное пятно*), в которое стянут разрядный ток. В процессе горения разряда катодное пятно хаотично перемещается по поверхности катода. Температура поверхности электрода в пятне достигает величины температуры кипения материала катода. Поэтому значительную роль в формировании тока дугового разряда играет термоэлектронная эмиссия. Над катодным пятном образуется слой положительного

пространственного заряда, который обеспечивает ускорение эмитируемых электронов до энергий, достаточных для ударной ионизации атомов и молекул газа. Этот слой создает высокую напряженность электрического поля у поверхности катода, особенно вблизи естественных микронеоднородностей поверхности, что приводит к усилению роли автоэлектронной эмиссии. Высокая плотность тока в катодном пятне – $10^2 \dots 10^7$ А/см² и постоянное перемещение катодного пятна создают условия для возникновения взрывной электронной эмиссии. Непосредственно к зоне катодного падения потенциала примыкает положительный столб анодной части дуги. На аноде формируется яркое анодное пятно, несколько большего размера и менее подвижное, чем катодное. Нагретый до высокой температуры $T = 6,000 \dots 12,000$ К, а иногда и выше ионизованный газ со степенью ионизации около 10^{-2} в столбе является термоионизованной плазмой, в которой концентрации электронов и ионов равны. Кроме описанной дуги с холодным катодом, существуют дуги с накаливаемым (термоэмиссионным) катодом, вакуумные дуги (горят в парах металлов, образованных за счет испарения электродов) и т. д.

Знание особенностей и закономерностей зажигания дуговых разрядов необходимо при проектировании и эксплуатации объектов электроэнергетики. Вследствие больших токов зажигание дугового разряда ведет к возникновению аварийного режима в силовых цепях и установках высокого напряжения, который может завершиться выходом из строя электрического оборудования.

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 коронирующего 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 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.

Общая характеристика коронного разряда. Коронный разряд – один из видов самостоятельного разряда, возникающий в широком диапазоне давлений – от сотен долей Па до атмосферного и выше. **Особенность коронного разряда состоит в том, что он может не завершиться пробоем промежутка.** Коронный разряд возникает у электрода с малым радиусом кривизны и горит в виде светящегося ореола – «короны» (отсюда и название). **Обязательным условием возникновения коронного разряда является значительная неоднородность электрического поля, $K_n \geq 3$.** Такое электрическое поле возникает у проводов линий электропередач, появление коронного разряда у которых приводит к потерям электрической энергии. Потери на корону могут быть существенными и часто оказываются сравнимыми с потерями джоулева тепла в проводах. Ионизационные процессы в коронном разряде происходят только вблизи электрода с малым радиусом кривизны, эту зону называют **чехлом короны**. В зависимости от полярности электрода различают отрицательную и положительную короны. За счет процессов ударной ионизации в чехле короны непрерывно создаются заряженные частицы обоих знаков. Частицы того же знака, что и коронирующий электрод, под действием электрического поля выходят из чехла

короны во внешнюю область и постепенно перемещаются к противоположному электроду.

Коронный разряд при постоянном напряжении. При постоянном напряжении различают два вида коронного разряда – униполярный и биполярный. Униполярный коронный разряд (униполярная корона) возникает в том случае, когда коронирующие электроды в промежутке имеют одинаковую полярность. При униполярной короне вся внешняя зона заполнена зарядами того же знака, что и коронирующий провод. Распределение зарядов в униполярной короне показано на рис. 2.1.

Биполярный коронный разряд (биполярная корона) возникает в том случае, когда коронирующие электроды имеют противоположную полярность. Распределение заряда в этом случае показано на рис. 2.2.

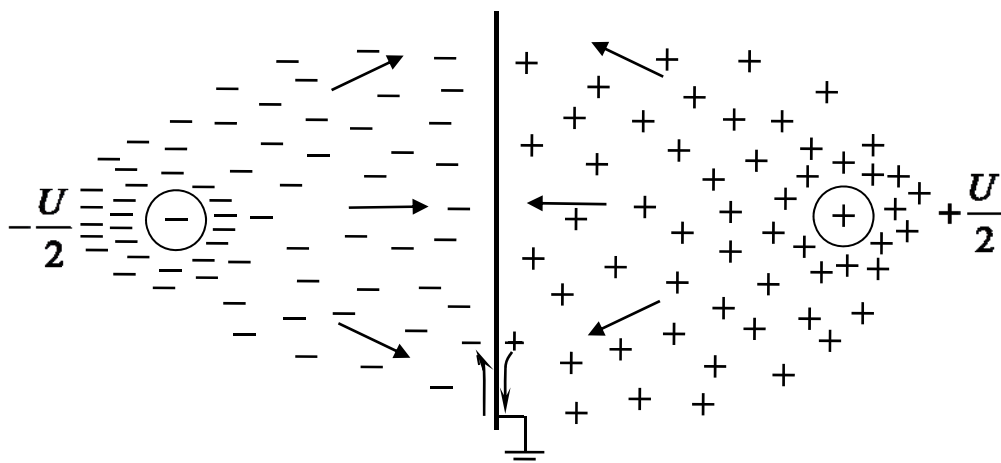


Рис. 2.1. Распределение заряда в униполярной короне

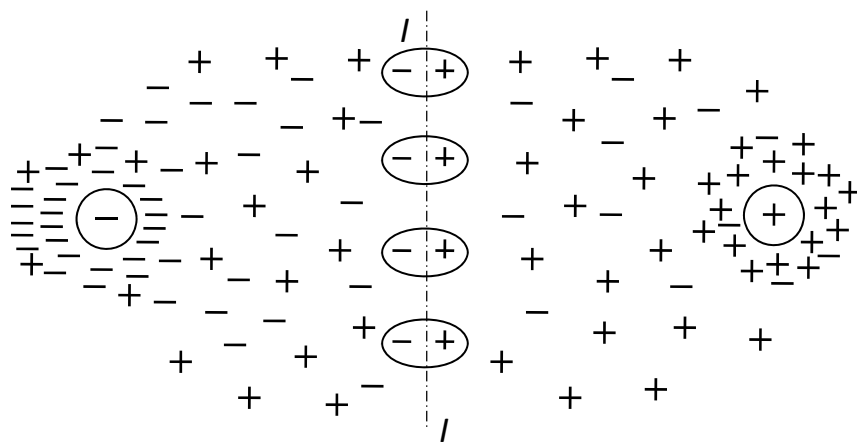


Рис. 2.2. Распределение заряда в биполярной короне

Коронный разряд при переменном напряжении. На переменном напряжении коронный разряд зажигается при достижении начального напряжения, равного напряжению зажигания короны $U_H = U_K$ при времени t_1 (рис. 2.3, а). Вокруг провода образуется зона ионизации, называемая чехлом короны (рис. 2.3, в). Из чехла короны положительные заряды выносятся в окружающее пространство и образуют внешний объемный заряд (ОЗ). Процесс коронирования продолжается до тех пор, пока напряжение не достигнет $U_{\text{макс}}$ при t_2 . Несмотря на повышение U до $U_{\text{макс}}$, напряженность на проводе остается постоянной и равной E_K из-за влияния объемного заряда. Затем напряжение начинает снижаться. Синхронно снижается и напряженность на проводе E_n , что приводит к погасанию короны. Но после погасания короны (после t_2) в пространстве вокруг провода остается положительный внешний объемный заряд, который еще удаляется от провода (рис. 2.3, в).

Расстояние, на которое удаляется объемный заряд, зависит от напряжения на проводе и составляет $\sim 40 \dots 100$ см. Разность потенциалов между проводом и ОЗ увеличивается по мере уменьшения напряженности на проводе до времени t_3 . Еще до достижения t_3 потенциал на проводе относительно ОЗ приобретает отрицательное значение (условно при t_3). И при t_4 (рис. 2.3, а, в), когда напряжение достигает U_0 , которое значительно меньше U_K , зажигается отрицательная корона. При этом отрицательно заряженные частицы начинают двигаться от провода во внешнюю область, а навстречу (к проводу) движутся положительно заряженные частицы из внешнего объемного заряда. Происходит релаксация заряженных частиц до полной компенсации положительного внешнего ОЗ (t_5). Затем накапливается отрицательный ОЗ во внешней области (t_6). Все это происходит за время от t_4 до t_6 (рис. 2.3, а, в). В момент времени t_6 (начало уменьшения напряжения) отрицательная корона гаснет. В дальнейшем все эти циклы повторяются, и зажигание короны на обеих полярностях происходит при U_0 . Между проводом и землей имеет место емкость C , которая заряжается и разряжается с частотой переменного тока. При этом между проводом и землей протекает емкостный ток i_c . (рис. 2.3, б):

$$i_c = C \frac{dU}{dt}. \quad (2.4)$$

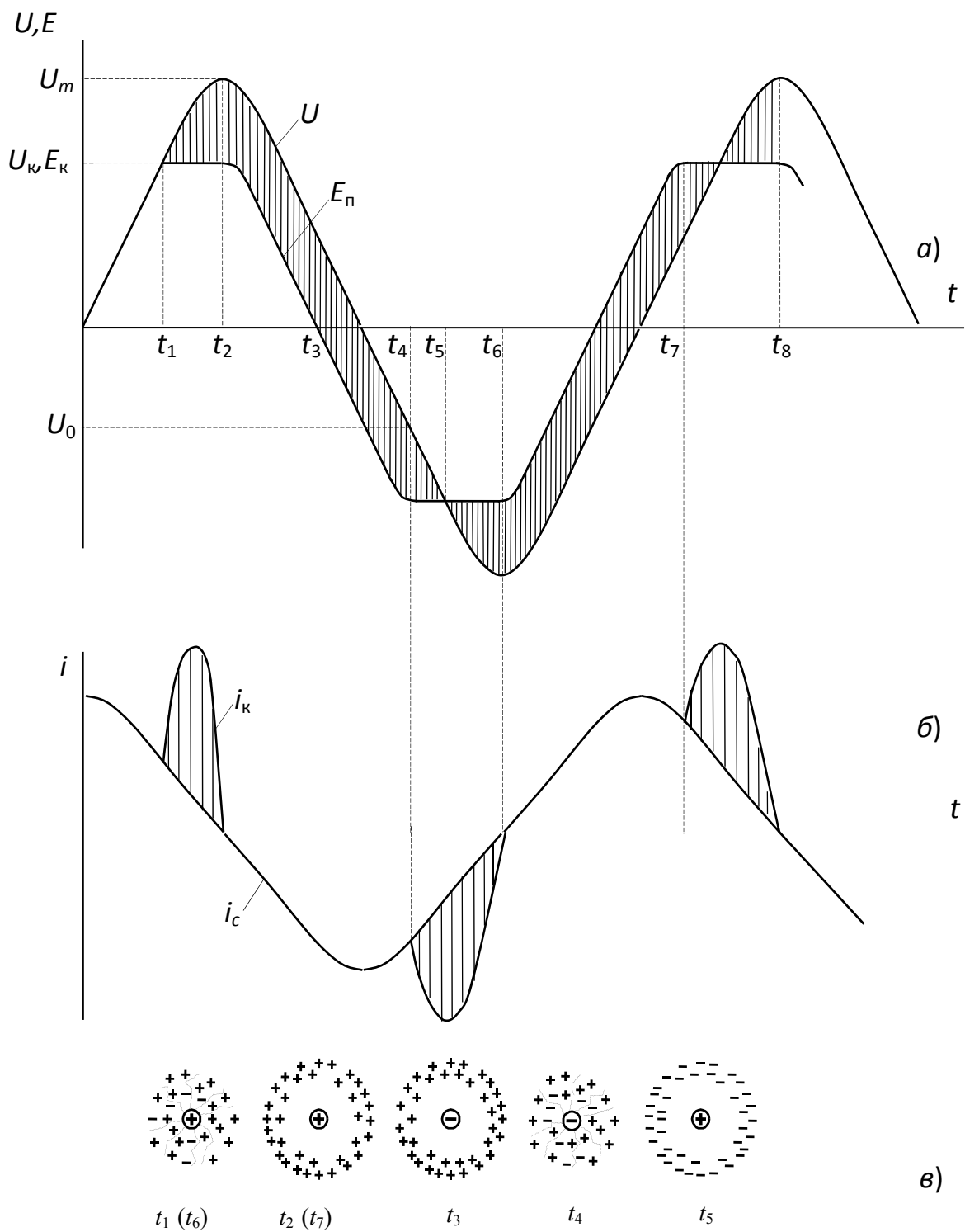


Рис. 2.3. Корона на проводе при переменном напряжении:
 а – изменение напряжения U и напряженности E во времени;
 б – изменение емкостного тока провода i и тока короны i_k во времени;
 в – чехол короны и объемные заряды в различные моменты времени

Возникновение коронного разряда в момент t_1 приводит к появлению тока короны i_k , который накладывается на емкостный ток линии и искажает синусоиду тока (рис. 2.3, б). Длительность пиков тока короны равна длительности ее горения, т. е. до времени t_2 (или $t_4 - t_6, t_7 - t_8$).

При переменном напряжении коронирование проводов более интенсивное, чем при постоянном напряжении, и при прочих равных условиях потери энергии на корону существенно больше.

На характеристики коронного разряда – начальное напряжение, потери энергии, радиопомехи, шум – значительное влияние оказывают погодные условия. Атмосферные осадки резко снижают начальное напряжение возникновения короны.

В ТВН наиболее распространенным является расчет 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.

Основы расчета потерь на корону. Потери энергии на корону экспериментально можно определить при помощи осциллографирования вольт-кулоновой характеристики. При этом потери за один период определяются как

$$P = \oint U \cdot dQ, \text{ Вт}, \quad (2.5)$$

где Q – величина объемного заряда в короне.

Из (2.5) следует, что потери пропорциональны площади, описываемой вольт-кулоновой характеристикой. Потери энергии при коронировании в единицу времени подсчитываются как

$$P = f \oint U \cdot dQ, \text{ Вт}, \quad (2.6)$$

где f – частота переменного тока.

При проектировании ЛЭП пользуются расчетными зависимостями потерь энергии при коронировании, т. к. использование методики расчета по вольт-кулоновой характеристике связано со значительными трудностями.

Распространенной формулой для расчета потерь на корону на переменном напряжении является эмпирическая формула Пика:

$$P = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_\phi - U_k)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км}\cdot\text{фаза}, \quad (2.7)$$

где δ – относительная плотность воздуха; f – частота, Гц; r_0 – радиус одиночного провода, см; S – расстояние между проводами, см; U_ϕ – действующее значение фазного напряжения, кВ; U_k – напряжение возникновения короны, кВ.

$$U_k = 21,2 \cdot \delta \cdot r_0 \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \text{ кВ}, \quad (2.8)$$

где m_1 – коэффициент гладкости провода; m_2 – коэффициент погоды. Для идеально гладкого провода $m_1 = 1$, для реального витого провода $m_1 = 0,85 \dots 0,92$ (зависит от конфигурации провода).

Для оценочного подсчета среднегодовых потерь все погодные условия разбивают на 4 группы: 1) хорошая погода; 2) дождь (включая мокрый снег и морось); 3) сухой снег; 4) изморозь (включая гололед и иней). Наибольшие потери в единицу времени возникают при изморози. Усредненная продолжительность различных групп погоды для средней полосы европейской части России и Западной Сибири приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Усредненная продолжительность различных групп погоды

Группа погоды	Продолжительность групп погоды за год (час)	Продолжительность групп погоды за год (%)
Хорошая погода	7120	81,3
Сухой снег	800	9,1
Дождь	500	5,7
Изморозь	340	3,9

На линиях электропередачи сверхвысокого напряжения используют расщепленные провода в фазах. В технике высоких напряжений принята следующая классификация классов напряжения:

- высокие напряжения (ВН) – 1...220 кВ;
- сверхвысокие напряжения (СВН) – 330...750 кВ;
- ультравысокие напряжения (УВН) ≥ 1150 кВ.

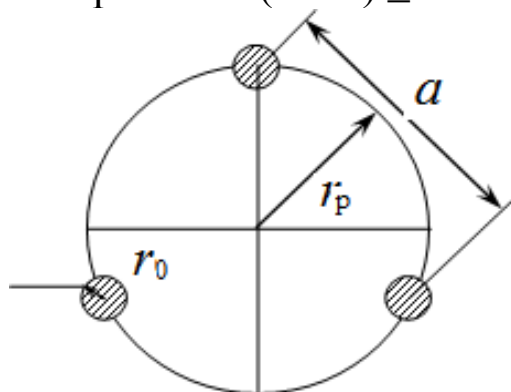


Рис. 2.4. Вид расщепленного на три составляющих провода фазы ЛЭП сверхвысокого напряжения: a – шаг расщепления; r_p – радиус расщепления; r_0 – радиус одиночных составляющих провода

На рис. 2.4 приведен вид расщепленного фазного провода ЛЭП 500 кВ с радиусом расщепления r_p , состоящего из 3 составляющих $n = 3$ радиусом r_0 .

Для определения потерь при коронировании для расщепленных проводов используют формулу Майра:

$$P_k = n \cdot r \cdot \kappa \cdot r_0^2 \cdot E_3 (E_3 - E_k) \left(2,3 \cdot \lg \frac{1350 \cdot E_3}{f \cdot r_0} - 1 \right) \cdot 10^{-5} \frac{\text{кВт}}{\text{км} \cdot \text{фаза}}, \quad (2.9)$$

где n – число проводов в фазе; f – частота, Гц; r_0 – радиус одиночного провода, см; E_k – напряженность возникновения короны, кВ/см; κ – коэффициент погоды; E_3 – эквивалентная напряженность, кВ/см:

$$E_3 = \frac{E_{\text{макс}} + E_{\text{ср}}}{2}. \quad (2.10)$$

Неточность расчета обусловлена упрощением учета погодных условий, которые делятся на две группы: «хорошая» погода ($\kappa = 44$; $E_k = 17$ кВ/см) и «плохая» погода ($\kappa = 31,5$; $E_k = 11$ кВ/см).

Для средней полосы европейской части России и Западной Сибири потери на корону для 3-фазных ЛЭП сверхвысокого напряжения могут рассчитываться по формуле Л. Егоровой и Н. Тиходеева:

$$P_k = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot U_k^2 \exp \left[8,7 \left(\frac{U_m}{U_k} - 0,53 \right) \right], \text{ кВт/км}, \quad (2.11)$$

где U_m – амплитудное значение фазового напряжения, кВ.

Для определения потерь на корону в течение года рассчитывают потери энергии для каждой группы погоды, а затем суммируют их с учетом продолжительности группы в течение года:

$$\sum P_k = \sum_{i=1}^4 P_{ki} \cdot \psi_i, \quad (2.12)$$

где ψ_i – относительная продолжительность группы погоды; P_{ki} – среднегодовая мощность потерь при i -й группе погоды.

Задачи

Задача 2.4. Для воздушной линии электропередачи трехфазного тока с линейным напряжением 115 кВ применены провода 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.

Решение. Для расчета воспользуемся зависимостью:

$$\text{для } m_2 = 1 \quad \Delta P_k = \frac{0,18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U_0)^2,$$

$$\text{для } m_2 = 0,8 \quad \Delta P_k' = \frac{0,18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U_0')^2.$$

Относительное увеличение потерь определяется из соотношения

$$k = \frac{\Delta P_k'}{\Delta P_k} = \left(\frac{U - U_0'}{U - U_0} \right)^2 = \left(\frac{115 - 87}{115 - 109} \right)^2 = 21,8,$$

где $U = 115$ кВ действ; U_0' и U_0 – критические напряжения, определяемые из следующих зависимостей для ясной и плохой погоды:

$$U_0' = 84,6 m_1 m_2 \delta r \log \frac{D}{r} = 84,6 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,53 \cdot \log \frac{400}{10,6} = 87 \text{ кВ},$$

$$U_0 = 84,6 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,53 \cdot \log \frac{400}{10,6} = 109 \text{ кВ}.$$

Задача 2.5. Определить потери активной мощности на корону для линии электропередачи при напряжении 154 кВ, если протяженность линии 100 км, провод радиусом 0,48 см, провода расположены треугольником с расстоянием между ними 500 см. Температура воздуха 0 °С, давление 710 мм рт. ст., коэффициент негладкости 0,85, погода ясная.

Решение. Влияние атмосферных условий на корону учтем с помощью величины относительной плотности воздуха:

$$\delta = \frac{0,386 \cdot p}{273 + t^0} = \frac{0,386 \cdot 710}{273} = 1,02.$$

Определим критическое фазное напряжение:

$$U_k = 21,1 \cdot 1,02 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,48 \cdot 2,3 \cdot \log \frac{500}{0,48} = 61 \text{ кВ действ.}$$

Действующее фазное рабочее напряжение сети

$$U_\phi = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{154}{1,73} = 89 \text{ кВ действ.}$$

Так как рабочее напряжение оказалось больше критического, то корона будет иметь место.

Для расчета потерь мощности на 1 км провода линии воспользуемся формулой Пика

$$\Delta P_k = \frac{241}{1,02} (50 + 25) \sqrt{\frac{0,48}{500}} (89 - 61)^2 \cdot 10^{-5} = 4,36 \frac{\text{кВт}}{\text{км}}.$$

Потеря мощности на все три провода

$$\Delta P_{k(3)} = 3 \cdot \Delta P_k = 13,1 \text{ кВт/км.}$$

Потери мощности на всю линию заданной длины

$$P_k = \Delta P_{k(3)} \cdot l = 13,1 \cdot 100 = 1310 \text{ кВт.}$$

Примеры для самостоятельного решения

Пример 2.5. Определить среднегодовые потери активной мощности на корону для линии напряжением 525 кВ, если продолжительность ясной погоды $T_x=7000$ ч, а ненастной погоды $T_d = 1760$ ч.

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.

Ответ. 148 кВт/км.

Пример 2.6. Линия электропередачи длиной 100 км выполнена на металлических опорах с гирляндами изоляторов, имеющих длину 2 м. В результате атмосферного перенапряжения произошло перекрытие гирлянды. Установить по критической длине дуги условие ее горения или самопогасания, если после отключения поврежденной фазы линии с рабочим напряжением 230 кВ остаточный ток емкостной проводимости равен 4 А. В расчете учитывается только реактивное сопротивление. Соотношение между

частичными емкостями проводов смежных фаз и фазы на землю принять равным 0,2.

Ответ. Критическая длина дуги 2,63 м, условий для самопогасания нет.

Пример 2.7. 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.

Ответ. Критическая напряженность 43,2 кВ_{макс}/см. Критическое напряжение 32 кВ_{макс}.

Пример 2.8. Определить потери мощности на корону для линии протяженностью 100 км с рабочим напряжением 230 кВ, если расстояние между проводами 4 м, радиус провода 0,95 см, коэффициент негладкости провода 0,85 и относительная плотность воздуха 0,9. Погода ясная. Для расчета воспользоваться формулой Пика.

Ответ. Критическое напряжение 162 кВ, потери 4630 кВт.

Пример 2.9. Определить критическое напряжение и максимальную напряженность электрического поля на поверхности провода линии передачи с номинальным напряжением 220 кВ. Провода 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).

Ответ. Напряжение критическое 240 кВ. Напряженность 22,5 кВ макс/см.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды разрядов в газовой среде и их особенности.

2. Поясните, почему каждый газ при тлеющем разряде в газосветной трубке имеет свой характерный цвет излучения?

3. В чем заключается положительная и отрицательная роль коронного разряда в электроустановках?
4. Изложите последовательность расчета потерь активной мощности на корону по обобщенным характеристикам и формулам.
5. Перечислите основные технические способы, применяемые для ограничения потерь мощности на корону.
6. Перечислите технические характеристики дугового разряда.
7. Что следует понимать под критической длиной дуги и под критическим током дугового разряда?
8. Как влияет расположение электродов и их конструкция на условия самопогасания открытой дуги?
9. При каких условиях имеет место самопогасание открытой дуги переменного тока при однофазном замыкании на землю?
10. Какое влияние на восстановление прочности промежутка оказывает ширина щели, в которой горела дуга?

Проверочные задания

Задача 1. Между двумя точками в изолирующей среде, расположенными на расстоянии 2 мм, действует разность потенциалов 400 В. Определить среднюю напряженность электрического поля на заданном участке.

Задача 2. Конденсатор емкостью 3 мкФ заряжен до напряжения 4 кв. Определить величину заряда, накопленного на его электродах.

Задача 3. Определить среднегодовые потери мощности на корону для одноцепной линии с проводами ЗхАСУ-240/300 при напряжении 525 кВ. Линия имеет горизонтально расположенные провода с расстоянием между ними 10,5 и два троса. Средняя высота подвеса провода над землей 13 м, радиус провода 1,12 см, шаг расщепления 300 мм. Длительность хорошей погоды $T_x=7000$ ч, длительность дождя, снега, изморози $T_d=1760$ ч.

Задача 4. Определить напряженности электрического поля в слоях плоского трехслойного конденсатора, заряженного

до напряжения 10 кВ, если емкости его слоев соответственно равны 6; 3; 1,5 мкФ при толщинах слоев 1,2 и 4 мм.

Задача 5. Определить среднегодовые потери активной мощности на корону для линии напряжением 525 кВ, выполненной проводом 2ХАСУ-240/300, если продолжительность ясной погоды $T_x=7000$ ч, а ненастной погоды $T_d=1760$ ч.

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.

Задача 6. Воздушный промежуток в 1 см между плоскими электродами характеризуется давлением 760 мм рт. ст. и напряженностью электрического поля 29 кВ/см. Определить число электронов, достигающих анода, если с катода отрывается 1 эл/с, а в промежутке происходит процесс ударной ионизации.

Задача 7. Определить потери мощности на корону для линии протяженностью 100 км с рабочим напряжением 230 кВ, если расстояние между проводами 4 м, радиус провода 0,95 см (АС-185), коэффициент негладкости провода 0,85 и относительная плотность воздуха 0,9. Погода ясная. Для расчета воспользоваться формулой Пика.

Задача 8. Определить емкость плоского однослойного конденсатора, имеющего площадь электродов 10 см^2 и расстояние между ними 0,1 мм при относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика, равной 6.

Задача 9. Определить критическое напряжение и максимальную напряженность 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.

Список литературы

1. Техника высоких напряжений: учеб. пособие / В. Ф. Важов и др. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 208 с.
2. Михалков А. В. Техника высоких напряжений: учеб. пособие. М.: Изд-во Высш. шк, 1965. 227 с.
3. Родионов Н. Н. Техника высоких напряжений: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 93 с.
4. Процук Ю., Терзи И. З. Техника высоких напряжений: сборник задач с решениями / под ред. И. К. Стратан. ТУМ. 2004.