

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОНЫ НА ПРОВОДАХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

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

1. Краткие сведения

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

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

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

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

При прочих равных условиях при изменении межэлектродных расстояний будут изменяться и значения начального напряжения короны. При этом градиенты потенциала электрического поля у поверхности с малыми радиусами кривизны будут одинаковыми, что позволяет по их величинам находить и соответствующие начальные напряжения короны для тех или иных систем электродов. Таким образом, начальные градиенты короны, т.е. градиенты потенциала у поверхности электродов с малыми радиусами кривизны, по достижении которых и возникает корона, являются более общей характеристикой коронирующих электродов, чем начальное напряжение короны.

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

Наиболее известны и распространены формулы Ф. Пика: для коаксиальных цилиндров

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

для параллельных проводов одинаковых радиусов r_0

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

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

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

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

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

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

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

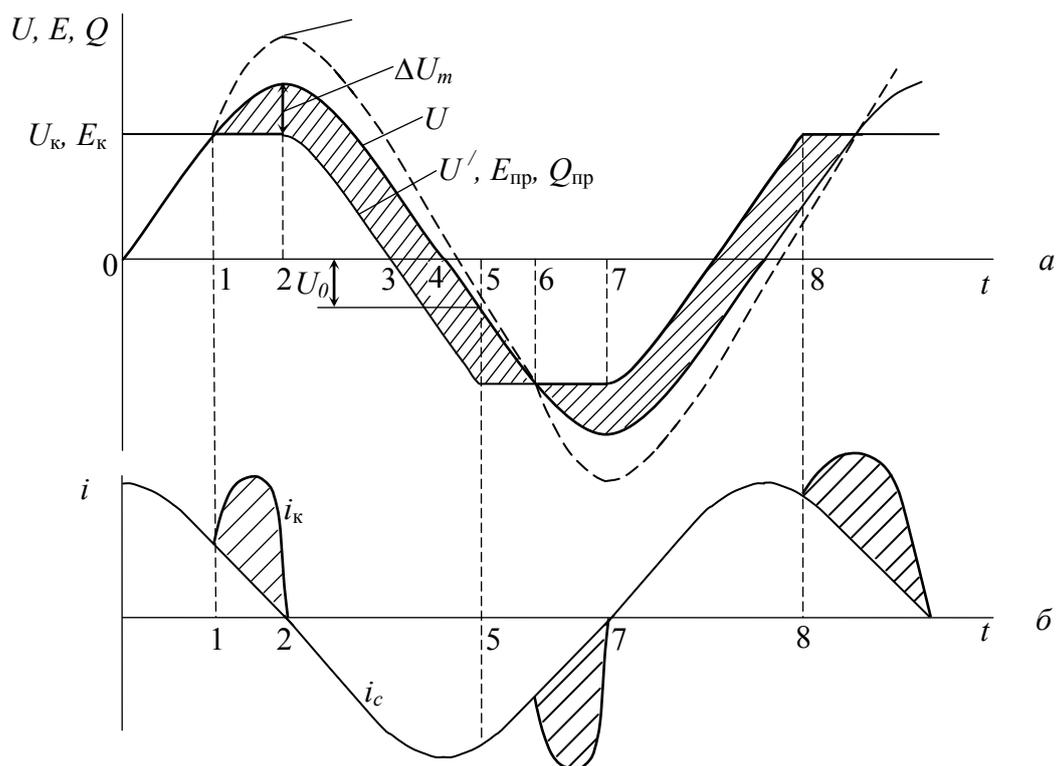


Рис. 1. Корона на проводах при переменном напряжении:
 а – изменение во времени напряжения и напряженности электрического поля на проводе и суммарный заряд; б – емкостный ток (i_c) и ток короны (i_k)

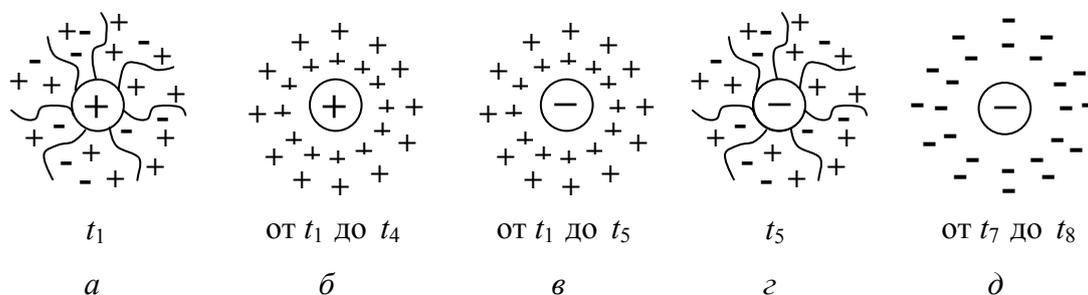


Рис. 2. Объемные заряды в окрестности провода
 в различные моменты времени

В момент времени t_1 , когда напряжение на проводе достигнет значения U_k (соответственно и $E = E_k$), загорится корона (рис. 2, а). По мере роста напряжения от U до U_m ($t_1 - t_2$) часть заряда с провода по образующимся стримерам под действием электрического поля перемещается в окружающее пространство, где создается избыточный положительный заряд (рис. 1, а). При этом наличие тока в каналах стримера высокой проводимости обуславливает сохранение неизменной критическую напряженность E_k на поверхности провода, а следовательно,

неизменным и заряд на проводе $Q_{\text{пр}} = 2\pi\epsilon r_0 E_{\text{к}} = \text{const}$. Создаваемое этим зарядом напряжение $U' = Q_{\text{пр}}/C_0$ также будет неизменным. Разница напряжений $\Delta U = U - U'$ поддерживается объемным зарядом $Q_{\text{об}}$, который с ростом напряжения постепенно увеличивается. Одновременно увеличивается и суммарный заряд $Q_{\Sigma} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{об}}$. После максимального значения напряжения источника (t_2) суммарный заряд с уменьшением напряжения уменьшается, в первую очередь, на проводе. Как только напряженность на проводе станет меньше критической, ионизация в чехле короны прекращается, каналы стримеров постепенно теряют свою проводимость, и объемный заряд оказывается отрезанным от провода (рис. 2, б).

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

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

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

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

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

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

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

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

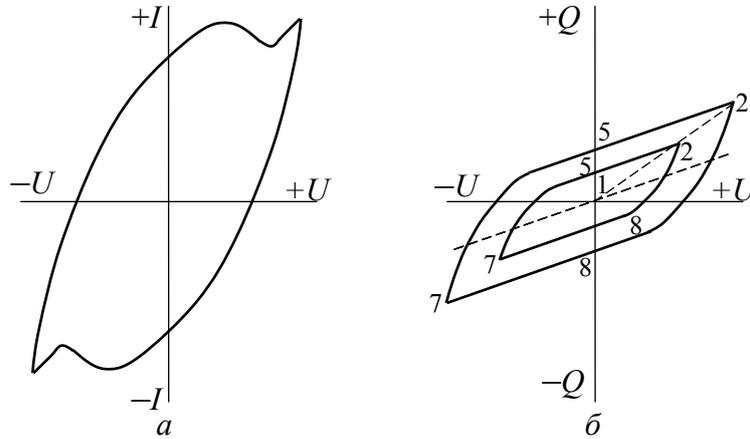


Рис. 3. Характеристики короны:

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

При наличии короны источнику возвращается только часть этой энергии, определяемая зарядом на проводе, а энергия, связанная с объемным зарядом вблизи провода, примерно равная $\Delta U \cdot Q_{об}/2$, сохраняется в виде остаточного электрического поля, которое затем компенсируется зарядом противоположного знака в последующий полупериод.

Таким образом, потери энергии на корону при переменном напряжении связаны с непрерывной перезарядкой чехла короны, которая происходит несинхронно с изменением напряжения. Потери энергии за

один период можно определить как $P_0 = \int_0^t U \cdot i \cdot dt$ или $P = \oint U dQ$, т. е.

потери пропорциональны площади так называемой вольт-кулоновой характеристики.

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

Вольт-кулоновые характеристики при различных амплитудах приложенного напряжения в стилизованном виде приведены на рис. 3, *б*, где цифрами отмечены характерные точки, соответствующие отдельным моментам времени на рис. 1, *a*. Прямолинейные участки вольт-

кулоновой характеристики соответствуют интервалам времени, когда корона не горит, изменяется только заряд на проводе и, следовательно, наклон вольт-кулоновой характеристики определяется геометрической емкостью линии.

Потери за единицу времени подсчитываются как

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

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

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

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

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

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

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

Начальные градиенты короны при дожде, как показали лабораторные исследования, меняются с интенсивностью дождя, что учитывается коэффициентом погоды. Результаты определения коэффициента погоды при дожде приведены на рис. 4.

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

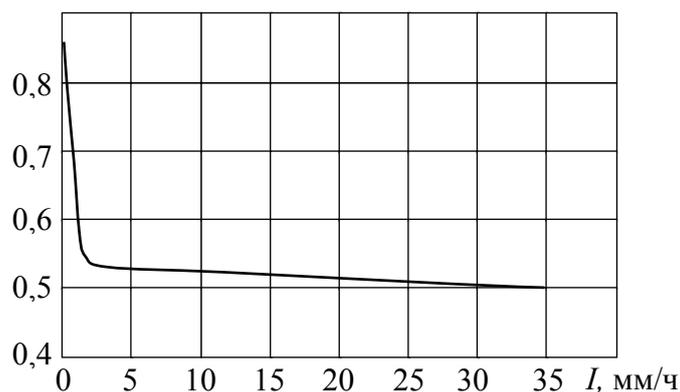


Рис. 4. Зависимость коэффициента погоды от интенсивности дождя

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

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

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

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

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

где f – частота, Гц; δ – относительная плотность воздуха; r_0 – радиус провода, см; S – расстояние между проводами, м; $U_{\text{ф}}$ – действующее значение фазного напряжения, кВ; U_0 – расчетная величина напряжения, близкая к критическому значению напряжения короны, кВ.

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

где m_1 – коэффициент гладкости провода; m_2 – коэффициент погоды.

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

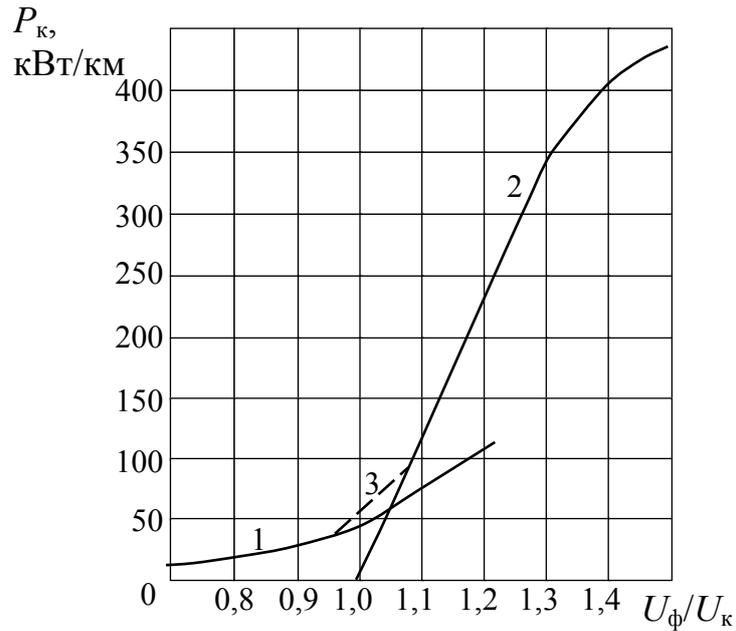


Рис. 5. Зависимость потерь на корону на линии класса 750 кВ от отношения U_ϕ / U_k :

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

2. Порядок работы

1. Ознакомиться с электрической схемой экспериментальной установки (рис. 6)

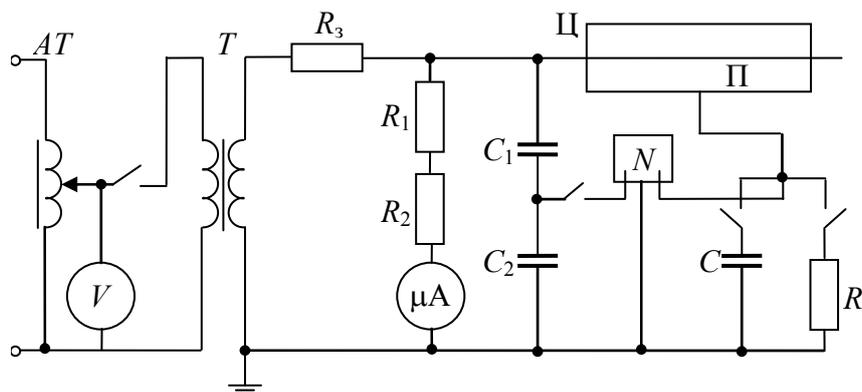


Рис. 6. Схема проведения опытов:

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

2. Определить напряжение зажигания короны для 4-х проводников различного диаметра (r_1, r_2, r_3, r_4), расположенных в цилиндре:
- по кривой тока;
 - по вольт-амперной характеристике;
 - по вольт-кулоновой характеристике.
- Данные занести в табл. 1.

Таблица 1

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

3. Снять вольт-кулоновую характеристику (с экрана осциллографа на кальку) для одного из проводов при различных напряжениях на коронирующем проводе. Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

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

4. Содержание отчета

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

5. Контрольные вопросы

- Какой вид разряда представляет корона?
- Какие неблагоприятные эффекты вызывает корона?
- Чем определяются потери энергии при коронировании на переменном напряжении?

4. Что характеризует коэффициент гладкости провода и коэффициент погоды?
5. На какие виды делятся погодные условия?
6. Какой вид погоды вызывает наибольшие потери энергии?
7. В чем отличие потерь энергии на местную корону и общую корону?
8. Чем определяется и какова величина U_{Φ}/U_{κ} для хорошей погоды?
9. Возможные пути снижения потерь на корону на линиях электропередачи.