

КОРОНА НА ПРОВОДАХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

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

1. Краткие сведения

Коронный разряд, или корона, – незавершенный самостоятельный разряд 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 этот 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. Вследствие периодического изменения полярности провода на ЛЭП переменного напряжения объемный заряд каждой фазы удаляется от провода только в течение полупериода и при перемене полярности начинает притягиваться к проводу.

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

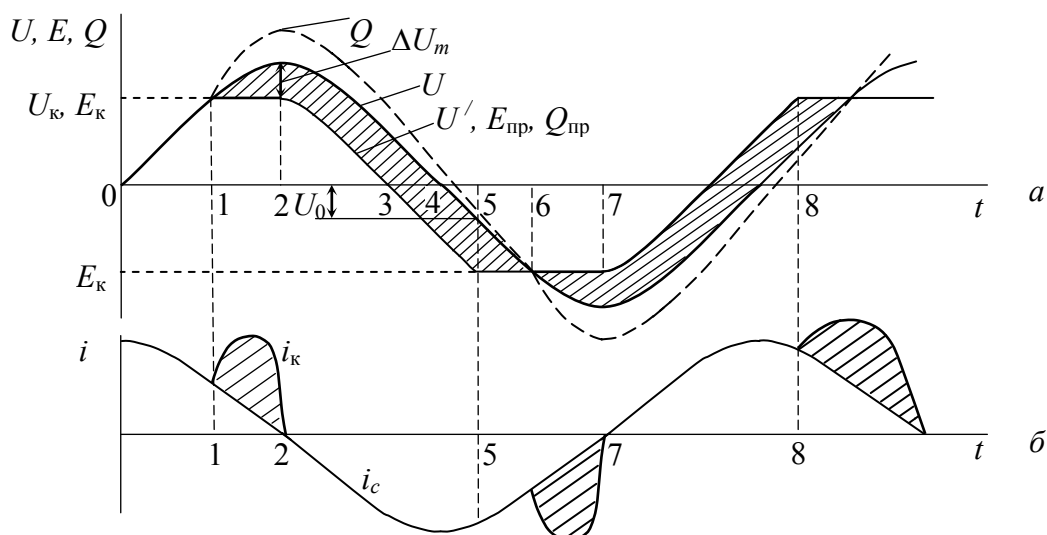


Рисунок 1 – Корона на проводах при переменном напряжении:
а – изменение во времени напряжения, напряженности электрического поля на проводе и суммарного заряда; б – емкостный ток (i_c) и ток короны (i_k)

В момент времени t_1 , когда напряжение на проводе достигнет значения U_k (соответственно и $E = E_k$), загорится корона (рис. 2, а). По мере роста напряжения от U до U_m ($t_1 - t_2$) в окружающем пространстве создается избыточный положи-

тельный заряд (рис. 2, а), который обуславливает сохранение неизменной критической напряженности E_k на поверхности провода, а следовательно, и неизменного заряда на проводе $Q_{пр} = 2\pi\epsilon r_0 E_k = \text{const}$. Создаваемое этим зарядом напряжение $U' = Q_{пр}/C_0$ также будет неизменным. Разница напряжений $\Delta U = U - U'$ поддерживается объемным зарядом $Q_{об}$, который с ростом напряжения постепенно увеличивается. Одновременно увеличивается и суммарный заряд $Q_{\Sigma} = Q_{пр} + Q_{об}$. После максимального значения 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 и объемный заряд оказывается отрезанным от провода (рис. 2, б).

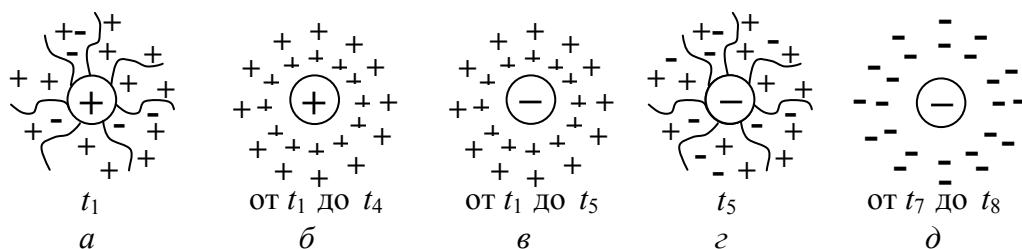


Рисунок 2 – Объемный заряд в окрестности провода в различные моменты времени

В момент времени t_3 (рис. 1, а) заряд на проводе $Q_{пр}$ 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

$$i_c = C_0 \cdot \frac{dU}{dt}.$$

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

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.

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. 4, где цифрами отмечены характерные точки, соответствующие отдельным моментам времени на рис. 1, а. Прямолинейные участки вольт-кулоновой характеристики (пунктир) соответствуют интервалам времени, когда корона не горит, изменяется только заряд на проводе и, следовательно, наклон вольт-кулоновой характеристики определяется геометрической емкостью линии.

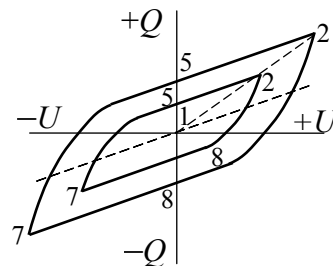


Рисунок 4 – Вольт-кулоновая характеристика короны

Потери за единицу времени подсчитываются как

$$P = f \cdot \oint U dQ,$$

т.е. представляют собой площадь вольт-кулоновой характеристики, помноженную на частоту. Из многочисленных эмпирических формул для определения мощности потерь на корону при переменном напряжении наиболее часто используют формулу Пика:

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

где f – частота, Гц; δ – относительная плотность воздуха; r_0 – радиус провода, см; S – расстояние между проводами, м; U_ϕ – действующее значение фазного напряжения, кВ; U_0 – напряжение зажигания короны на цилиндрическом проводе, кВ.

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

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

На линиях электропередачи используются почти исключительно витые провода, на которых величины начального напряжения короны ниже, чем на цилиндрических проводах. Это обстоятельство учитывают коэффициентом гладкости, который представляет собой отношение начального напряжения короны на реальном проводе к начальному напряжению короны на гладком цилиндрическом проводе такого же радиуса при прочих равных условиях. Для всех проводов независимо от их диаметров была получена величина коэффициента гладкости 0,85–0,9.

Различные атмосферные осадки – дождь, снег, туман, иней, изморозь и гололед – существенно влияют на коронирование проводов линии электропередачи, приводя к увеличению потерь энергии на корону (по сравнению с хорошей погодой). Это учитывается коэффициентом погоды, который представляет собой отношение начального напряжения короны при различных видах осадков к начальному напряжению короны при хорошей погоде.

Рекомендовано разделить все многообразие погодных условий на четыре группы: 1) хорошая погода (без осадков), 2) дождь (включая мокрый снег и морось), 3) сухой снег и 4) изморозь (включая гололед и иней).

Линии электропередач проектируют таким образом, чтобы исключить появление короны при хорошей погоде. Это достижимо при выполнении соотношения $U_{\phi} < U_0$, где U_{ϕ} – фазное напряжение ЛЭП, U_0 – напряжение зажигания короны.

2. Порядок работы

1. Собрать электрическую схему для исследования характеристик короны на проводах ЛЭП при переменном напряжении (рис. 5).
2. Определить напряжение зажигания короны для 4-х проводников различного диаметра (r_1, r_2, r_3, r_4), расположенных в металлическом цилиндре: а) по кривой тока; б) по вольт-амперной характеристике; в) по вольт-кулоновой характеристике. Данные занести в табл. 1.

Таблица 1. Напряжение зажигания короны по различным методикам

| Методика регистрации | U_0 , кВ при радиусе провода r , мм | | | |
|--------------------------------|---|--------|--------|--------|
| | $r_1=$ | $r_2=$ | $r_3=$ | $r_4=$ |
| Кривая тока | | | | |
| Вольт-амперная характеристика | | | | |
| Вольт-кулоновая характеристика | | | | |

3. Зарисовать вольт-кулоновую характеристику с экрана осциллографа на кальку для одного из проводов при различных напряжениях на коронирующем проводе. Рассчитать потери энергии по площади вольт-кулоновой характеристики. Данные занести в табл. 2.

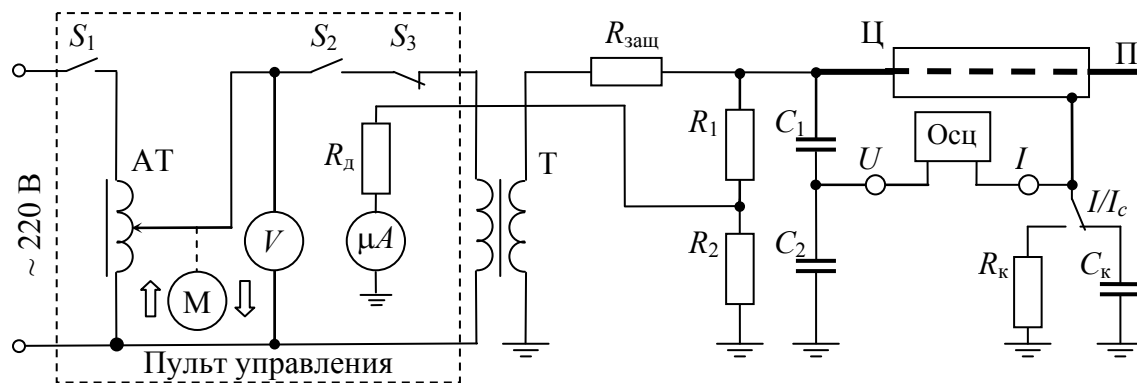


Рисунок 5 – Схема проведения эксперимента:

АТ – автотрансформатор; V – вольтметр; μA – микроамперметр; $R_{д}$ – добавочное сопротивление; S_1 – пакетный выключатель; S_2 – кнопка «Вкл.»; S_3 – кнопка «Выкл.»; M – электродвигатель; T – высоковольтный трансформатор; $R_{заш}$ – защитное сопротивление; R_1, R_2 – омический делитель напряжения; C_1, C_2 – емкостной делитель напряжения; Π – металлический цилиндр; Π – испытуемый провод; Осц – осциллограф; U – разъем для регистрации напряжения на осциллографе; I – разъем для регистрации тока или заряда на осциллографе; I/I_c – переключатель режимов измерения «Ток/Заряд»; R_k – резистор для получения кривой тока и вольт-амперной характеристики; C_k – конденсатор для получения вольт-кулоновой характеристики

Таблица 2. Потери энергии при коронировании провода

| Величина напряжения на коронирующем проводе U , кВ | $U_1=$ | $U_2=$ | $U_3=$ |
|--|--------|--------|--------|
| P_k по вольт-кулоновым характеристикам, отн.ед. | $P_1=$ | $P_2=$ | $P_3=$ |

3. Содержание отчета

1. Привести цель работы, сущность изучаемого явления, электрическую схему установки (рисовать самостоятельно), порядок проведения эксперимента, результаты измерений и проведенных расчетов.
2. По данным п. 2 построить зависимость напряжения зажигания короны от радиуса провода.
3. По данным п. 3 построить в относительных единицах зависимость потерь на корону от напряжения.
4. Пояснить, как влияет радиус провода на напряжение зажигания короны, превышение U_{ϕ} над U_0 на потери энергии при коронировании провода.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое коронный разряд?
2. Какие неблагоприятные эффекты вызывает корона?
3. На что теряется энергия при коронировании?
4. Что характеризуют коэффициент гладкости провода и коэффициент погоды?
5. На какие виды делится все многообразие погодных условий?
6. Какова должна быть величина U_{ϕ}/U_k для хорошей погоды?
7. Возможные пути снижения потерь на корону на линиях электропередачи.