

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГАТУ»)



ТЕХНИКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ЛЕКЦИЯ 2

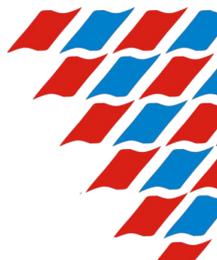
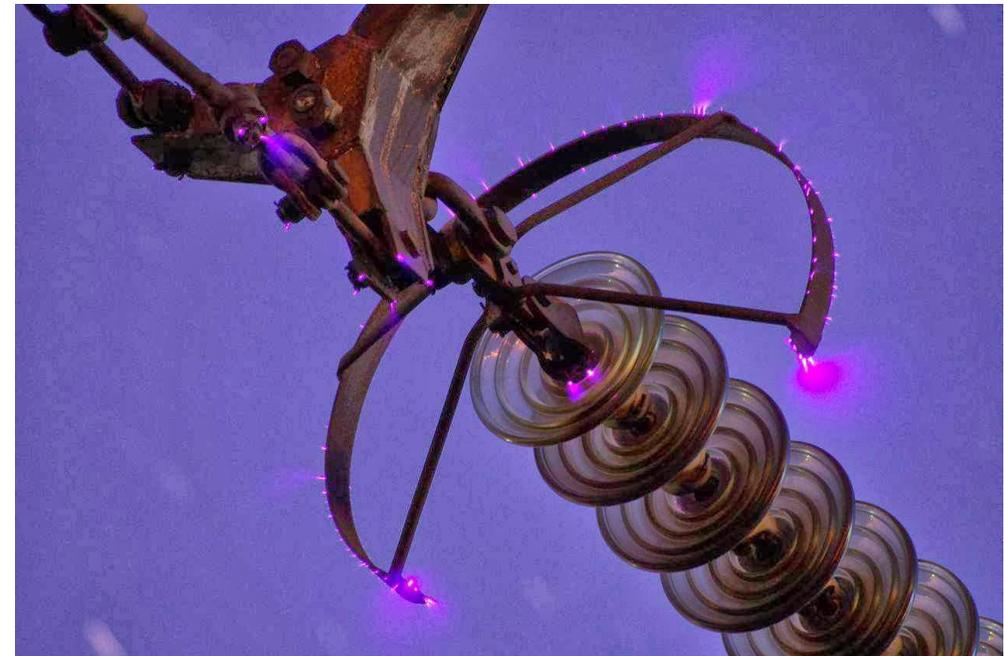
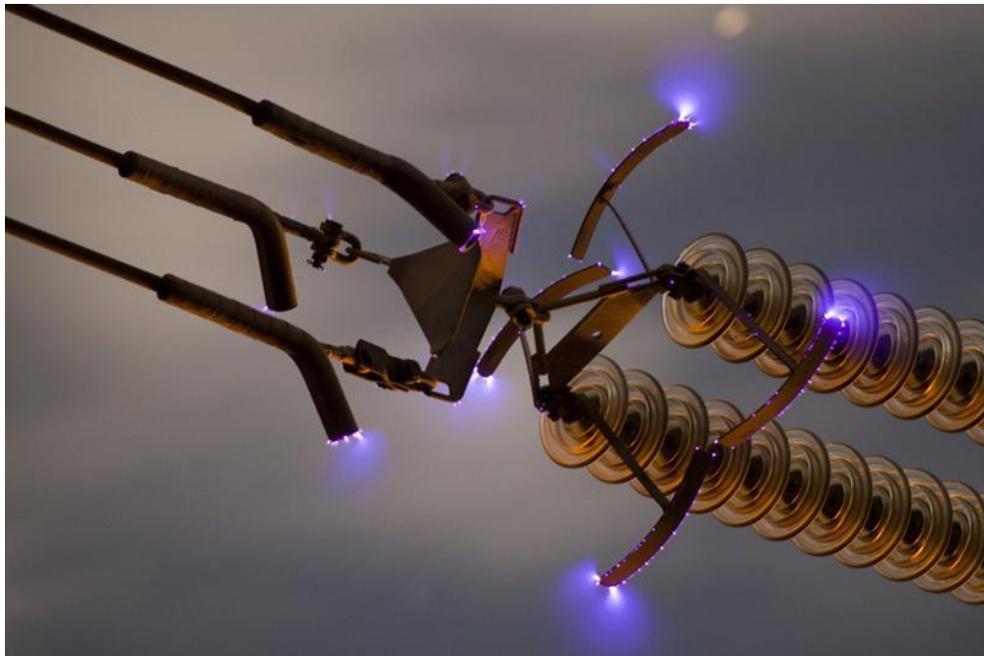
Лобанов Андрей Владимирович





Коронный разряд

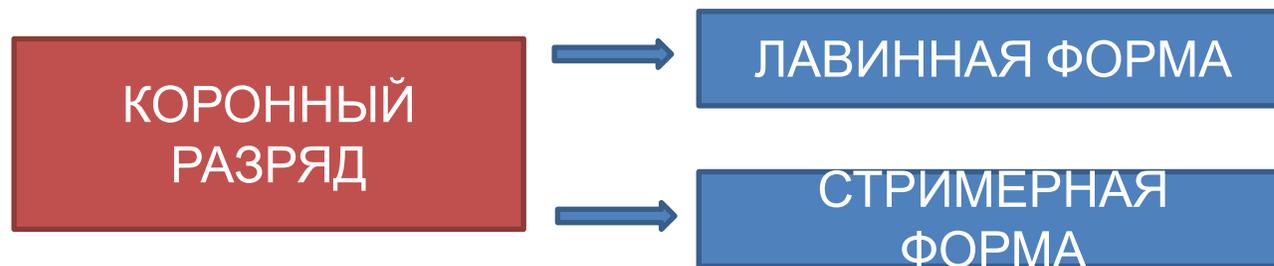
Коронный разряд — это самостоятельный разряд, при котором ударная ионизация электронами имеет место не на всей длине промежутка, а лишь в его части, у электродов.



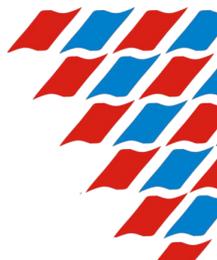


Коронный разряд

Пробой коронирующего промежутка происходит при напряжении большем чем начальное



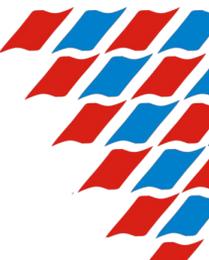
При коронированные происходят значительные потери электроэнергии, особенно в плохую погоду, продукты ионизации негативно влияют на изоляцию и металлическую арматуру, разряд является источником акустического шума и высокочастотного электромагнитного излучения.





Коронный разряд

При коронном разряде происходит ионизация воздуха и у поверхности провода образуется объемный заряд того же знака, что и полярность напряжения на проводе. Под действием сил электрического поля ионы, составляющие объемный заряд, движутся от провода. Для их **передвижения** необходимы затраты энергии, которые и определяют **потери энергии на корону**,



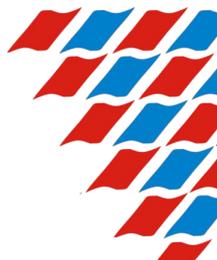


Коронный разряд

КОРОННЫЙ РАЗРЯД

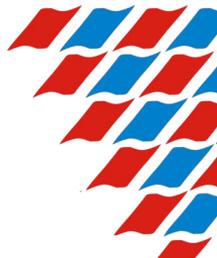
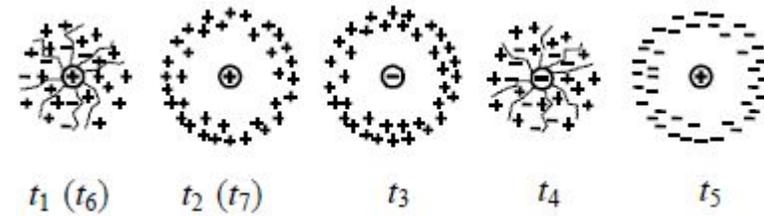
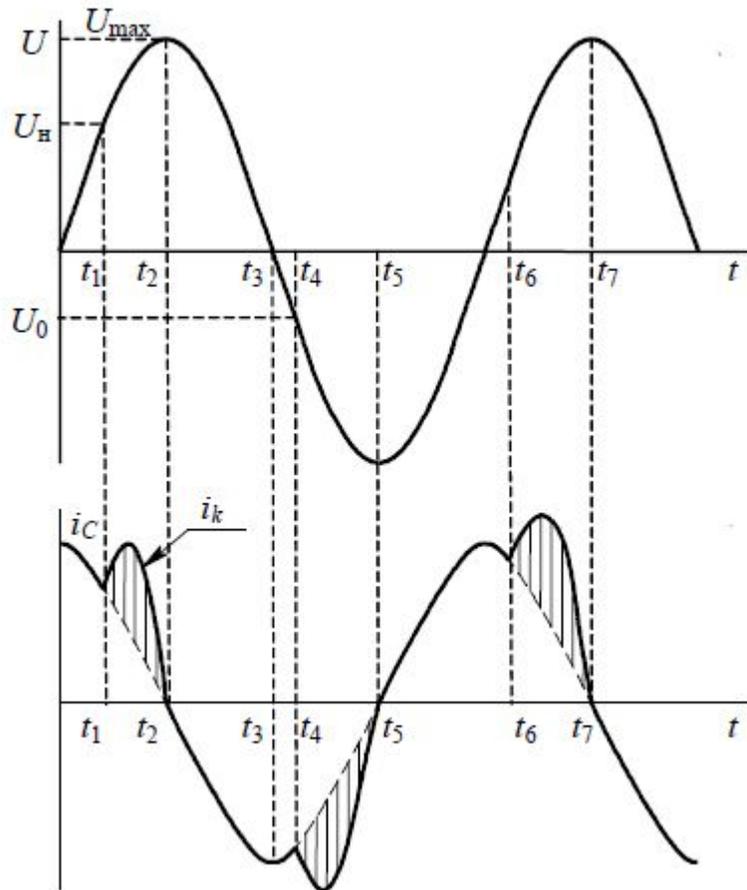
Униполярная корона - при коронировании одного провода (объемные заряды имеют тот же знак, что и провод и под действием электрического поля устремляются к земле и нейтрализуются)

Биполярная корона – коронируют два провода (объёмные заряды имеют разный знак и устремляются навстречу друг другу, происходит рекомбинация ионов различных знаков, часть ионов проникает в области соседних зарядов и усиливает коронирование.





Развитие коронного разряда



Потери энергии при коронировании

Формула Пика для одиночного провода:

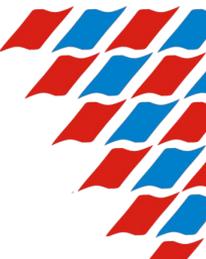
$$P = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_{\Phi} - U_{\text{к}})^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км-фаза,}$$

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; $U_{\text{к}}$ – напряжение возникновения короны, кВ;

$$U_{\text{к}} = 21,2 \cdot \delta \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \text{ кВ,}$$

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

Для идеально гладкого провода $m_1 = 1$, для реального витого провода $m_1 = 0,85 \div 0,92$ (зависит от конфигурации провода). Обычно принимают $m_1 \times m_2 = 0,8$ – при плохой погоде.





Потери энергии при коронировании

Для определения потерь при коронировании для расщепленных проводов используют формулу Майра

$$P_k = k \cdot n \cdot f \cdot r_0^2 \cdot E_3 (E_3 - E_k) \cdot \left(2,31 \lg \frac{1350 E_3}{f \cdot r_0} - 1 \right) \cdot 10^{-5}, \quad E_3 = \frac{E_{max} + E_{cp}}{2}.$$

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

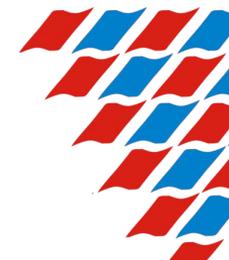
Средняя напряженность для расщепленного провода

$$E_{cp} = \frac{U_{cp}}{n \cdot r_0 \cdot \ln \frac{S}{r_{ЭКВ}}}.$$

Максимальная напряженность

$$E_{max} = k_y \cdot E_{cp}, \quad k_y = 1 + (n - 1) \cdot \frac{r_{ЭКВ}}{r_p};$$

$r_{ЭКВ} = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_p^{n-1}}$ – эквивалентный радиус одиночного провода, имеющего ту же емкость, что и расщепленная фаза; r_p – радиус расщепления фазы.



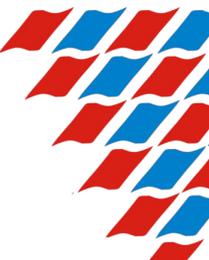


Потери энергии при коронировании

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

$$P = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot U_{\text{к}}^2 \cdot \exp \left[8,7 \cdot \left(\frac{U_{\text{м}}}{U_{\text{к}}} - 0,53 \right) \right] 10^{-5}, \text{ кВт/км},$$

где $U^{\text{м}}$ – амплитудное значение фазового напряжения, кВ.





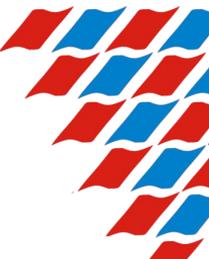
Потери энергии при коронировании

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:

$$\sum P_{\text{к}} = \sum_{i=1}^4 P_{\text{ки}} \cdot \psi_i,$$

где ψ^i – относительная продолжительность группы погоды,
 $P^{\text{ки}}$ – среднегодовая мощность потерь при i -й группе погоды.

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.

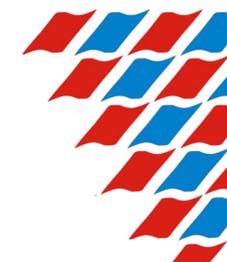




Потери энергии при коронировании

Продолжительность групп погоды за год

Группа погоды	Продолжительность групп погоды за год (ч)	Продолжительность групп погоды за год (%)
Хорошая погода	7120	81,3
Сухой снег	800	9,1
Дождь	500	5,7
Изморозь	340	3,9
Сумма	8760	100



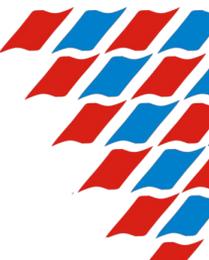


Твердые диэлектрики. Классификация

Неорганические диэлектрики: стекла, слюда, керамика, неорганические пленки (окислы, нитриды, фториды), металлофосфаты, электроизоляционный бетон.

Особенности неорганических диэлектриков

- негорючи,
- свето-, озono-, - терmostойки,
- повышенная электрическая прочность,
- низкие диэлектрические потери.



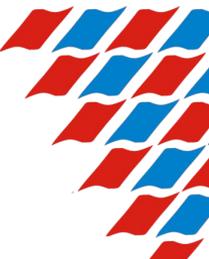


Твердые диэлектрики. Классификация

Органические диэлектрики: полимеры, воски, лаки, резины, бумаги, лакоткани.

Особенности органических диэлектриков

- горючи (в основном),
- малостойки к атмосферным и эксплуатационным воздействиям,
- имеют (в основном) простую технологию изготовления,
- более дешевы по сравнению с неорганическими диэлектриками,



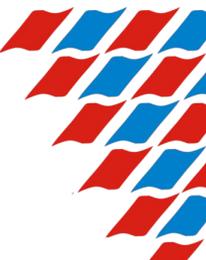


Твердые диэлектрики. Классификация

Применение в энергетике:

- линейная и подстанционная изоляция - это фарфор, стекло и кремнийорганическая резина в подвесных изоляторах ВЛ, фарфор в опорных и проходных изоляторах, стеклопластики в качестве несущих элементов, полиэтилен, бумага в высоковольтных вводах, бумага, полимеры в силовых кабелях;
- изоляция электрических приборов - бумага, гетинакс, стеклотекстолит, полимеры, слюдяные материалы;
- машин, аппаратов - бумага, картон, лаки, компаунды, полимеры;
- конденсаторы разных видов- полимерные пленки, бумага, оксиды.

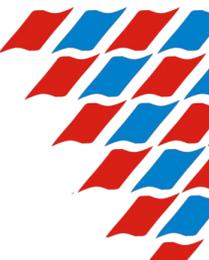
С практической точки зрения в каждом случае выбора материала электрической изоляции следует анализировать условия работы и выбирать материал изоляции в соответствии с комплексом требований. Для ориентировки целесообразно разделить основные диэлектрические материалы на группы по условиям применения.





Твердые диэлектрики. Классификация

1. Нагревостойкая электрическая изоляция. Это в первую очередь изделия из слюдяных материалов, некоторые из которых способны работать до температуры 700 °С. Стекла и материалы на их основе (стеклоткани, стеклослюдиниты). Органосиликатные и металлофосфатные покрытия. Керамические материалы, в частности нитрид бора. Композиции из кремнийорганики с термостойким связующим. Из полимеров высокой нагревостойкостью обладают полиимид, фторопласт.





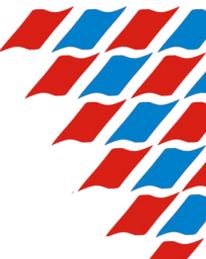
Твердые диэлектрики. Классификация

2. Влагостойкая электрическая изоляция. Эти материалы должны быть гидрофобны (несмачивание водой) и негигроскопичны (фторопласт). В принципе возможна гидрофобизация путем создания защитных покрытий на других негидрофобных диэлектриках.

3. Радиационно стойкая изоляция. Это, в первую очередь, неорганические пленки, керамика, стеклотекстолит, слюдинитовые материалы, полимеры (полиимиды, полиэтилен).

4. Тропикостойкая изоляция. Материал должен быть гидрофобным, чтобы работать в условиях высокой влажности и температуры, и стойким против плесневых грибков. Лучшие материалы: фторопласт, полимеры, худшие - бумага, картон.

5. Морозостойкая изоляция. Это требование характерно, в основном для резин, т.к. при понижении температуры все резины теряют эластичность. Наиболее морозостойка кремнийорганическая резина (до -90°C).



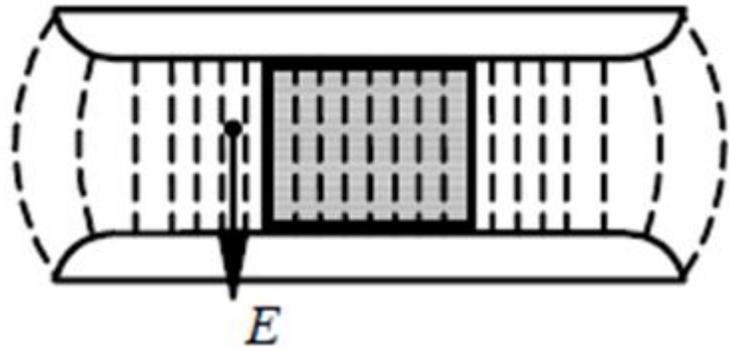
Твердые диэлектрики. Классификация

Фторопласт — современный конструкционный материал, который благодаря своим особенным эксплуатационным свойствам широко применяется в машиностроении, электротехнике, медицине, пищевой и химической промышленности. Оригинал статьи: <https://www.kp.ru/guide/chto-takoe-ftoroplast.html>

Этот материал отличается термостойкостью — его гибкость и эластичность сохраняются при температуре от -70 до $+270$ С, а также адгезией, минимальным поверхностным натяжением, устойчивостью к воздействию ультрафиолетовых лучей, влаги, жиров и органических растворителей. Он является физиологически и биологически безопасным. Химические свойства фторопласта — стойкость, даже более высокая, чем у благородных металлов и всех известных синтетических материалов, невосприимчивость к воздействию агрессивных кислот и щелочей. Разрушить данный полимер можно только трифторидом хлора или расплавами щелочных металлов. Материал хорошо обрабатывается фрезерованием, точением, шлифованием и сверлением.



Разряд в воздухе вдоль поверхности изоляторов

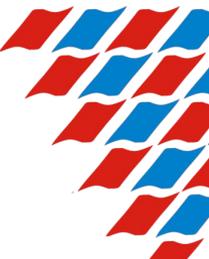


В конструкции силовые линии электрического поля параллельны поверхности диэлектрика и поле однородно.

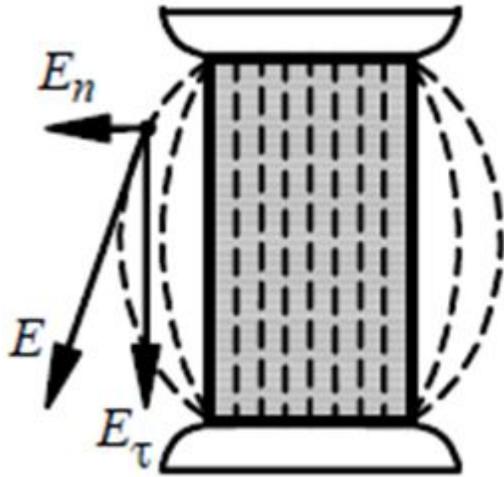
Конструкция сравнительно редко встречается в реальных условиях, но удобна при выявлении влияния характеристик диэлектрика на возникновение разряда.

Электрическая прочность промежутка с диэлектриком меньше, чем прочность чисто воздушного промежутка. Это связано:

- с адсорбцией влаги из окружающего воздуха на поверхности диэлектрика
- с микроразорами между твердым диэлектриком и электродом

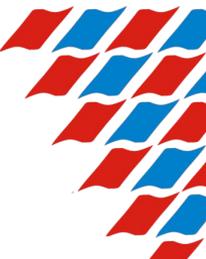


Разряд в воздухе вдоль поверхности изоляторов

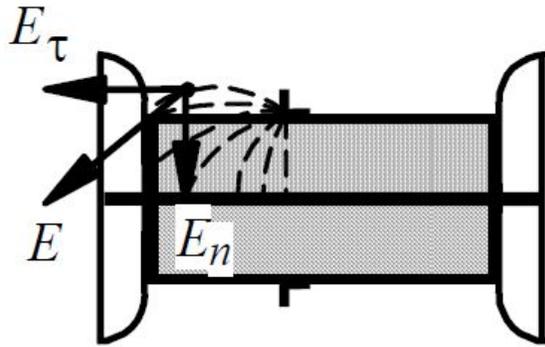


В конструкции поле неоднородно и тангенциальная составляющая напряженности поля на поверхности диэлектрика E_τ преобладает над нормальной составляющей E_n .

Поле неоднородное, следовательно, как и в случае чисто воздушного промежутка, разрядное напряжение меньше, чем в однородном поле. Влияние гигроскопичности диэлектрика и микрозазоров здесь качественно такое же, как и в первой конструкции, но оно слабее выражено, т. к. электрическое поле и без того существенно неоднородно.

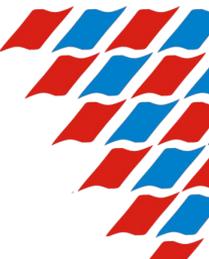


Разряд в воздухе вдоль поверхности изоляторов



В конструкции поле также неоднородно, но преобладает нормальная составляющая.

Большая нормальная составляющая электрического поля способствует сближению канала стримера с поверхностью диэлектрика, что повышает вероятность повреждения диэлектрика. Электрическая прочность этой конструкции еще меньше, чем второй. Каналы стримеров, развивающихся вдоль поверхности диэлектрика, имеют значительно большую емкость по отношению к внутреннему (противоположному) электроду и через стримерные каналы проходит сравнительно большой ток.





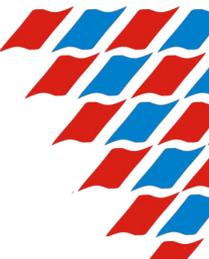
Разряд в воздухе вдоль поверхности изоляторов

Термически ионизированный канал разряда, развивающегося вдоль диэлектрика, на поверхности которого нормальная составляющая напряженности поля превышает тангенциальную составляющую, называют **каналом скользящего разряда**.

формула Теплера

(определение значения напряжения, необходимого для перекрытия изолятора)

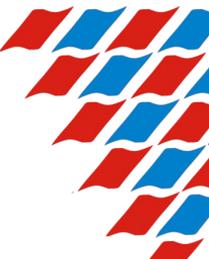
$$U_p = \chi \cdot L^{0,2} \left(\frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4} ;$$





Разряд вдоль проводящей и загрязненной поверхности изоляторов

В условиях эксплуатации поверхности изоляторов всегда загрязняются. Как правило, сухие загрязнения, имеющие высокое сопротивление и не влияющие на распределение напряжения по поверхности изолятора, не снижают заметно его разрядного напряжения. Увлажнение слоя загрязнения морозящим дождем или росой приводит к уменьшению сопротивления слоя загрязнения, изменению распределения напряжения по поверхности изолятора и в результате — к снижению его разрядного напряжения.

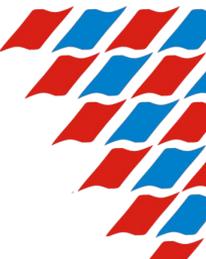




Разряд вдоль проводящей и загрязненной поверхности изоляторов

Механизмы перекрытия изолятора под дождем и при загрязненной и увлажненной поверхности:

- 1) Под действием приложенного к изолятору напряжения по увлажненному слою загрязнения проходит ток утечки, нагревающий его.
- 2) Нагрев происходит неравномерно.
- 3) Образуются подсушенные участки с повышенным сопротивлением.
- 4) Подсушенные участки перекрываются искровыми каналами, называемыми **частичными перемежающими дугами**.
- 5) Ток утечки возрастает, происходит подсушивание слоя загрязнения, а следовательно и к увеличению его сопротивления.
- 6) Удлинение дуг, перекрытие изолятора (случайное событие).





Разряд вдоль проводящей и загрязненной поверхности изоляторов

Из приведенной картины развития разряда следует, что разрядные напряжения изоляторов будут тем выше, чем меньше ток утечки:

$$I_{\text{у}} = \frac{U}{R_{\text{у}}},$$

где $I_{\text{у}}$ – ток утечки по изолятору;
 $R_{\text{у}}$ – сопротивление утечки по поверхности изолятора.





Разряд вдоль проводящей и загрязненной поверхности изоляторов

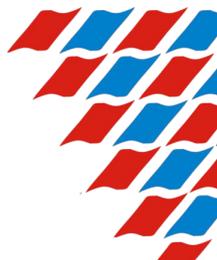
Если слой загрязнения имеет толщину Δ с удельным объемным со-противлением ρ , то для цилиндрического гладкого изолятора диаметром D

$$R_y = \frac{\rho \cdot L_y}{\pi \cdot \Delta \cdot D},$$

где L_y – длина пути утечки.

$$I_y = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_y}.$$

$$U_{\text{вл.р}} = \frac{I_y \cdot \rho \cdot L_y}{\pi \cdot \Delta \cdot D}.$$





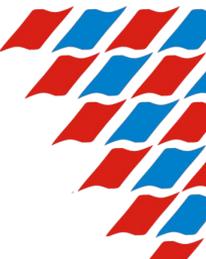
Разряд вдоль проводящей и загрязненной поверхности изоляторов

Следовательно, разрядное напряжение изолятора будет возрастать с увеличением длины пути утечки и уменьшением диаметра изолятора:

$$U_{\text{вл.р}} = \frac{I_{\text{у}} \cdot \rho \cdot L_{\text{у}}}{\pi \cdot \Delta \cdot D}.$$

Так как процессы подсушки поверхности изолятора происходят относительно медленно, то при кратковременных перенапряжениях они не успевают развиться и напряжение перекрытия бывает выше, чем при длительном воздействии напряжения.

Влагоразрядное напряжение изолятора зависит от характеристик слоя загрязнения, его количества и состава, а также от интенсивности и вида увлажнения.





Спасибо за внимание!

