



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

РАСЧЕТ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАРУЖНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

По назначению изоляторы делятся на **линейные** и **станционно-аппаратные**, которые, в свою очередь делятся на **опорные** и **проходные**.

Изоляторы могут изготавливаться не только для наружных, но и для внутренних установок, предназначенных для работы в закрытых помещениях. Для наружной установки изоляторы изготавливают с нормальной и усиленной внешней изоляцией, т.е. с увеличенной длиной пути утечки тока по поверхности изолятора (за счет применения ребер). Изоляторы внутренней установки имеют обычно гладкую поверхность.

Изолятор состоит из **диэлектрика** (фарфор, стекло, стеатит, ситаллы) и **металлической арматуры** для крепления изолятора в условиях эксплуатации. В качестве наружной изоляции применяются полимерные изоляторы на основе эпоксидных компаундов, полиэфирных смол с минеральными наполнителями.

Такие изоляторы имеют высокую электрическую прочность и достаточную трекингостойкость. С целью повышения механической прочности изоляторов производится их армирование стекловолокном (**стеклопластиковые изоляторы**).

ЛИНЕЙНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Применяются для крепления и изолирования проводов и тросов воздушных линий электропередачи и контактных проводов электрифицированных железных дорог.



Штыревые



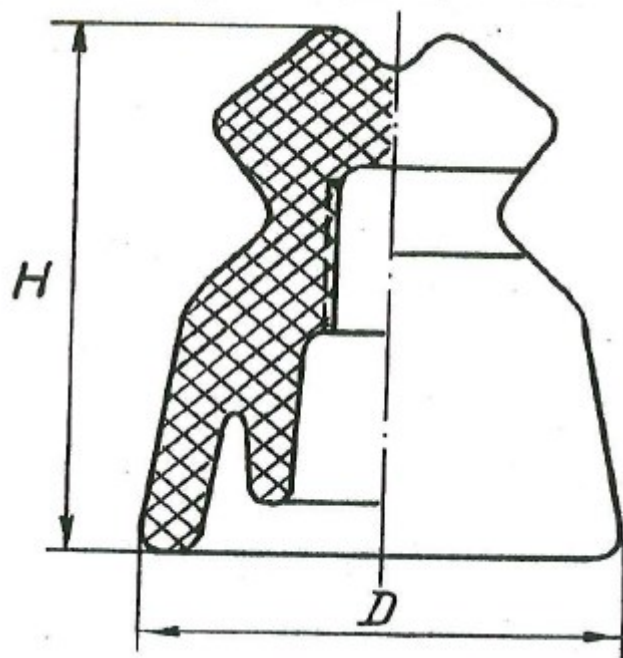
Подвесные

Штыревые изоляторы

применяются на ЛЭП до 35 КВ и монтируются на опорах с помощью крюков или штырей.

Низковольтные штыревые изоляторы из фарфора или стекла применяются для изолирования и механического крепления проводов на линиях электропередачи, линиях связи и радиотрансляционных сетях напряжением до 1000 В.

Выпускаются изоляторы типа ШФН, ТФ, НС, РФ. Обозначения: **Ш** - штыревой, **Ф** - фарфоровый, **С** - стеклянный, **Н** - низковольтный, **Т** - телефонная связь, **Р** - радиотрансляционная сеть.



Фарфоровый изолятор типа
ШФН

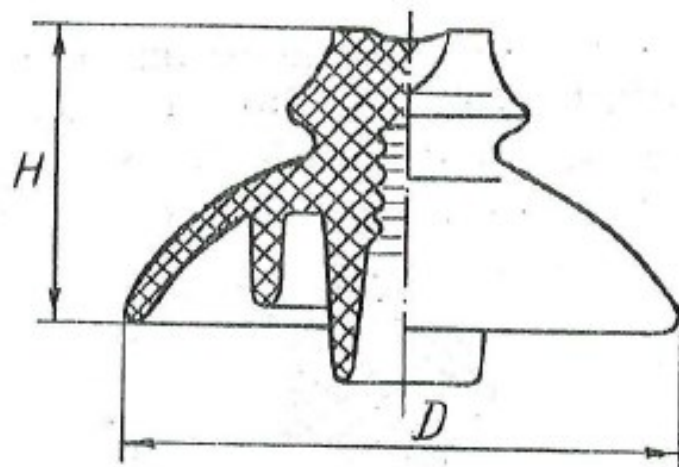
Фарфоровый изолятор типа ШФН предназначен для электропередач переменного тока на напряжение до 660 В и постоянного тока — до 440 В.

Изолятор состоит из головки, шейки и юбки. На угловых опорах и на ответвлениях провод крепят на шейке, а на промежуточных на шейке или на головке (в канавке). Во внутренней части головка имеет глухое отверстие для крепления изоляторов на штырях или на крюках

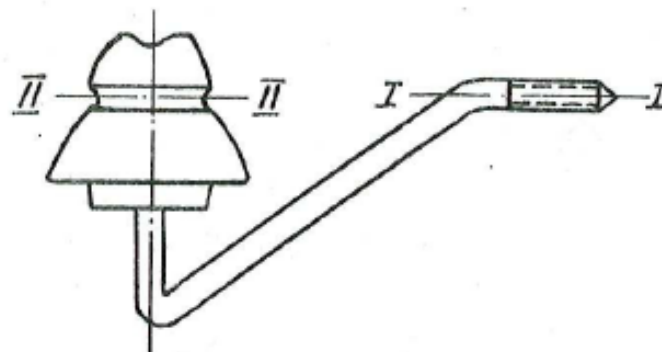
Высоковольтные штыревые изоляторы применяются на ЛЭП напряжением выше 1000 В. На напряжения более 35 КВ В России штыревые изоляторы не применяются.

За рубежом выпускаются штыревые стеклянные линейные изоляторы на 20,35 и 45 кВ из двух, трех или четырех элементов. В маркировке изоляторов буквы обозначают: **Ш** - штыревой, **Ф** - фарфоровый, **С** - стеклянный, **СС** - сетевой стеклянный, **ССЛ** - ситалловый линейный, **ЖБ** - изолятор для установки на железобетонных опорах. Числа 6, 10, 20, 35 обозначают **номинальное напряжение в кВ**. Буквы **А, Б, В** обозначают исполнение изолятора.

Для надежного крепления изолятора на опоре крюку придают форму, при которой ось части крюка I-I, ввертываемой в опору, лежит в одной плоскости с проводом II-II. Этим предотвращается проворачивания крюка при натяжении провода. Верх гнезда (отверстия) штыревого изолятора вынесен на уровень шейки с целью уменьшения изгибающего момента, действующего на материал изолятора



Штыревой высоковольтный изолятор
типа ШФР10-В



Расположение штыревого изолятора на
крюке

Изоляторы на 20 и 35 кВ изготавливаются ИЗ двух или трех изоляционных элементов.

Геометрические размеры и конфигурация изолятора, полученные в результате электрического расчета, должны обеспечивать выполнение требований, предъявляемых к изолятору, т.е. **длина пути утечки** изолятора L и сухоразрядное расстояние $l_{\text{схр}}$ должны иметь значения, при которых разрядные характеристики изолятора ($U_{\text{схр}}$, $U_{\text{мр}}$, $U_{\text{имп.р}}$) должны быть не менее указанных ГОСТ 1516-76.

Толщину фарфора в головке изолятора находят по одной из формул:

$$E_{\text{пр}} = 1.55d^{-0.37}, \text{ МВ/м при } R > 0.4d$$

$$E_{\text{пр}} = 0.65d^{-0.5}, \text{ МВ/м при } R < 0.4d$$

где d — толщина фарфора, м;

R - радиус закругления электрода, м.

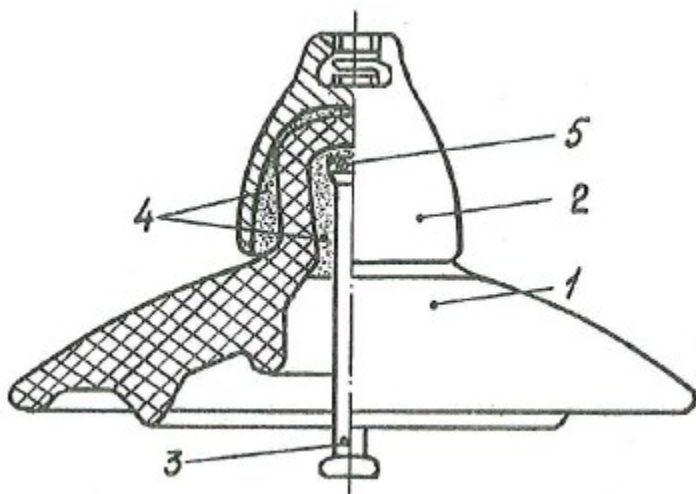
Величину пробивной напряженности для фарфоровых изоляторов принимают равной (4-5) МВ/м.

Подвесные изоляторы

При $U_H > 35$ кВ на ЛЭП применяют подвесные изоляторы, которые можно разделить на шарнирные (тарельчатые), стержневые (с кольцевыми или винтовыми ребрами) и палочные (гладкие стержневые).

Подвесной шарнирный изолятор состоит из фарфора или закаленного стекла (1), армированных металлическими элементами - шапкой (2) из ковкого чугуна с добавками висмута, магния, бора и стержнем (3) из стали, которые, во избежание коррозии, оцинковываются.

При армировании изоляторов применяются эластичные промазки (битум, клей ИКФ-130) для компенсации усилий, возникающих из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения элементов изолятора.



Подвесной шарнирный изолятор
с конусной головкой

Арматура соединяется с корпусом изолятора посредством армировочных цементно-песчаных связок 4). Во избежание повреждения тела изолятора при ударах между арматурой и изоляционным элементом помещаются демпфирующие прокладки (5) из картона, пробки или кирзы.

Толщина стенки головки изолятора практически не превышает 20-30 мм.

Шапка и стержень изолятора обеспечивают шарнирное соединение одного изолятора с другим и с деталями линейной арматуры при сборке гирлянд с помощью специального замка. При эксплуатации гирлянды подвергаются растягивающим усилиям, но благодаря специальной форме головки изолятора и стержня изоляционный материал работает на сжатие, что позволяет изготавливать изоляторы на очень большие механические нагрузки (до 30-50 т)



Так как в эксплуатации подвесные изоляторы подвергаются одновременно электрическим и механическим воздействиям, вибрациям, то за основную характеристику изолятора принимается электромеханическая прочность. Поэтому при испытаниях к ним прикладывают одновременно при плавном повышении растягивающую механическую нагрузку и напряжение промышленной частоты, равное (75—80)% от разрядного в сухом состоянии.

Изоляторы из фарфора в процессе их изготовления покрываются глазурью (коричневая, белая), что улучшает их механические свойства на (15-20)%, повышает влагостойкость, способствует самоочистке под действием ветра и дождя, повышает электрические характеристики, улучшает внешний вид.

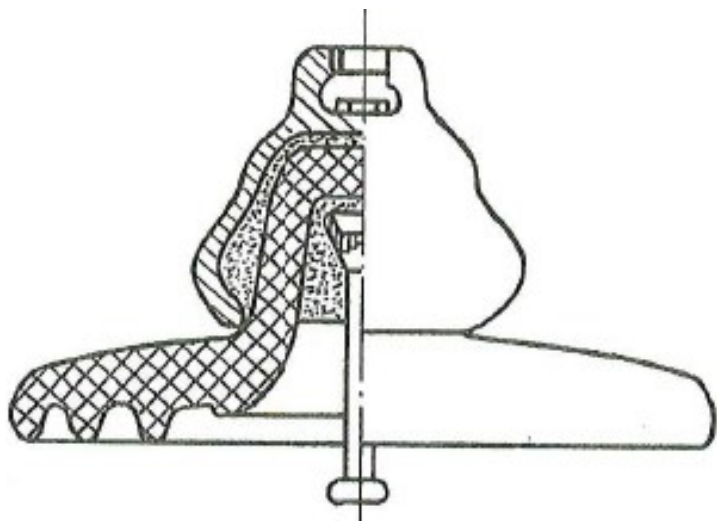
В условном обозначении подвесных шарнирных изоляторов буквы означают: П - подвесной, Ф - фарфоровый, С - стеклянный, Г - грязестойкий. Цифры, обозначающие класс изоляторов, соответствуют значению минимальной разрушающей электромеханической нагрузки в тс. Каждому классу могут соответствовать несколько исполнений - А, Б, В. Одно исполнение изолятора от другого отличается конструкцией, размерами, разрядными характеристиками, массой, длиной пути утечки.

Примеры обозначений:

ПФГ5-А, ПФ6-В, ПС12-А, ПСГ6-А и т.д.

Кроме изоляторов с конусной головкой изготавливаются изоляторы с цилиндрической головкой (ниже). В изоляторах с конической головкой угол конусности составляет 10-15°, а с цилиндрической - 2°.

Для надежного соединения фарфора со связкой поверхность головки покрывается до обжига фарфоровой крошкой, которая затем спекается с материалом головки, образуя одно целое. В данной конструкции совершенно исключена возможность перемещения заделки относительно головки. В стеклянных изоляторах для этих целей в нижней части головки формируется специальный выступ.



Подвесной изолятор с цилиндрической головкой

Изоляторы с цилиндрической головкой имеют более высокую механическую прочность, благодаря более равномерному распределению механических напряжений в головке изолятора. Они имеют более высокие технико-экономические показатели, меньшую строительную высоту.

Процесс изготовления таких изоляторов легче поддается механизации, но требования в отношении допусков на размеры более жесткие. В России выпускаются только изоляторы с конической головкой.

С некоторым приближением можно принять, что подвесном тарельчатый изолятор в верхней части головки образует сферическим конденсатор, а в нижней - цилиндрический конденсатор. Оптимальная конструкция изолятора должна обеспечивать равнопрочность как в сферической, так и в цилиндрической частях, т.е. пробивные напряжения и максимальные напряженности в них должны быть одинаковы.

Для сферической части:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \frac{(R-r)r}{R}, \text{ кВ}$$

а для цилиндрической части:

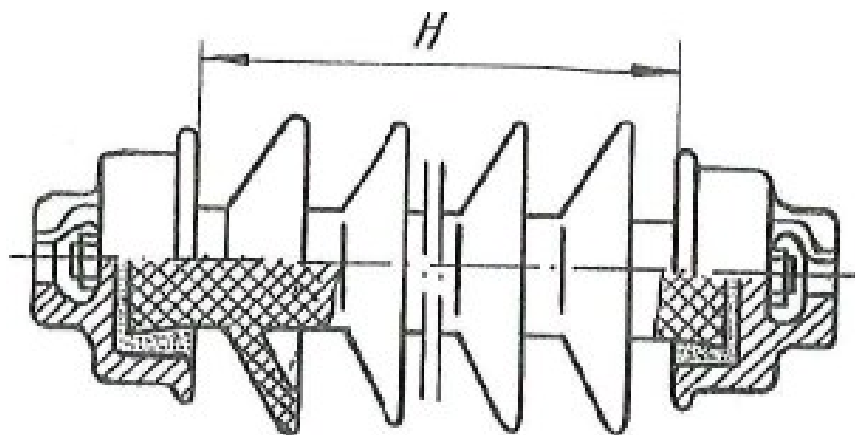
$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} r \ln \frac{R}{r}, \text{ кВ}$$

где R и r - наружный и внутренний радиусы сферы и цилиндра соответственно. Обычно для фарфора выбирают $E_{\text{пр}} = (8-10) \text{ кВ/мм}$.

Для районов с сильным загрязнением атмосферы разрабатываются специальные типы изоляторов с большим отношением $L/H > 3$ (L – длина пути утечки, H – строительная высота изолятора). Наиболее желателен путь изготовления изоляторов с малой строительной высотой, что позволяет уменьшить длину гирлянд и высоту опор.

Длина пути утечки изолятора L , строительная высота H и диаметр изолятора D должны обеспечить величины требуемых разрядных напряжений в соответствии с ГОСТом или специальными ТУ.

Подвесной стержневой изолятор с ребрами представляет собой сплошной стержень из изоляционного материала (фарфор, стекло, ситаллы), армированный с обоих концов металлическими шапками с помощью цементной связки с применением демпферных прокладок.



Подвесной стержневой изолятор с ребрами



Изолятор типа СФ-110/2,25 (С - стержневой, Ф - фарфоровый, 110 - номинальное напряжение в кВ; 2,25 — минимальная разрушающая нагрузка в тс) имеет следующие технические характеристики: Длина пути утечки $L = 188,0$ см; строительная высота $H = 124,5$ см; Диаметр стержня $D_c = 75$ мм; диаметр ребер $D_p = 150$ мм; $U_{схр} = 420$ кВ; $U_{мр} = 300$ кВ; $U_{имп.р} = 630$ кВ, масса изолятора с арматурой составляет 31,3 кг.

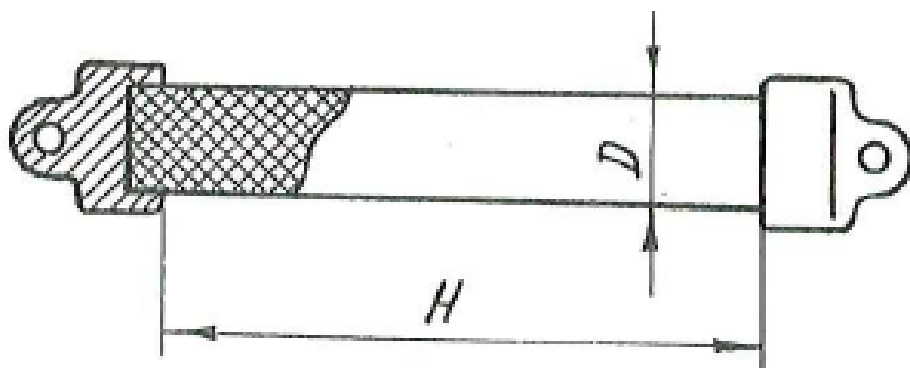
Особенностью таких изоляторов является то, что они непробиваемы. Поэтому расчет $U_{пр}$ для них не проводится.

Изолятор СФ-110/2,25 заменяет гирлянду из семи изоляторов ПФ6-А, масса которой с арматурой достигает 63 кг.

В России такие изоляторы используются в основном для оттяжек воздушных выключателей, а также в качестве специальных (фиксаторных) изоляторов для электрифицированного железнодорожного транспорта. Имеются опытные партии таких изоляторов из стекла и ситаллов. Ситаллы получают путем кристаллизации стекол при проведении специальных технологических процессов. Ситаллы по механической прочности превосходят не только стекло и фарфор, но и некоторые металлы. Они могут успешно работать в таких изоляционных конструкциях, где основным требованием к диэлектрику является его высокая механическая прочность (например, стержневые изоляторы, некоторые типы аппаратных изоляторов). .

Подвесные **палочные** изоляторы (рисунок) изготавливаются из стекловолокна, пропитанного эпоксидным компаундом, или из ситаллов. Изоляторы имеют небольшой диаметр $D = (3-5)$ см. Минимальные размеры изолятора при отсутствии ребер улучшают его самоочистку, снижают токи утечки, т.к. сопротивление поверхностного слоя возрастает.

Массовый выпуск таких изоляторов не налажен. Опытные партии изоляторов, проходивших испытание в Узбекистане, Донбассенерго, показали удовлетворительные характеристики. Изоляторы из стеклопластика обладают хорошей стойкостью к удару, в частности при расстреле из ружей.



Подвесной стержневой изолятор
гладкий (палочный)

Новые изоляционные конструкции

В Германии и США – изоляторы из
пластикового материала
(**силиконоэластомер**)

Большое распространение в Италии, Германии и ряде других стран получают изоляционные траверсы на основе **стеклопластиков**, которые позволяют отказаться от традиционно применяемых подвесных изоляторов и уменьшать массу и габариты опор.

ГИРЛЯНДЫ ИЗОЛЯТОРОВ. ВЫБОР ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ В ГИРЛЯНДЕ

На линиях 35 кВ и выше Для обеспечения заданного изоляционного расстояния подвесные изоляторы тарельчатого типа соединяются в гирлянды. Строительная высота гирлянды при этом будет равна

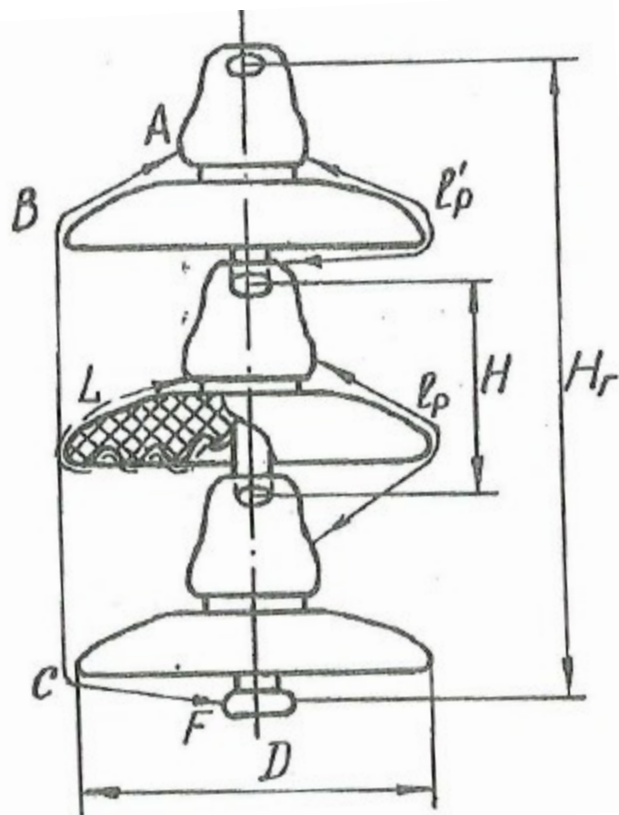
$$H_r = nH,$$

где n — число элементов (изоляторов) в гирлянде; H — строительная высота изолятора.

Благодаря шарнирному соединению изоляторов, гирлянда приобретает гибкость, которая способствует снижению механических нагрузок на изоляторы при сильном ветре и обрыве провода.

На промежуточных опорах используются **поддерживающие** гирлянды, воспринимающие вес прикрепленного провода, а на анкерных, угловых и концевых опорах - **натяжные**, которые воспринимают натяжение провода. В натяжных гирляндах изоляторы расположены горизонтально. Для обеспечения высокой надежности работы при больших механических нагрузках число параллельных цепей изоляторов может достигать 4-6.

Коэффициент запаса прочности для подвесных изоляторов составляет 2,0-2,7.



Пути разряда и путь утечки подвесных изоляторов.

Разрядное напряжение гирлянды подвесных изоляторов не представляет собой сумму разрядных характеристик отдельных элементов, т.к. разряд по гирлянде развивается несколько иначе, чем на отдельном элементе. Путь разряда изолятора в гирлянде l_p несколько отличается от пути разряда одиночного изолятора l'_p и от длины пути утечки изолятора L .

Разрядное напряжение гирлянды зависит от числа и типа изолятора, а также от наличия защитной арматуры.

Для устранения каскадирования дуги («прилипание» к поверхности изолятора) применяются защитные устройства в виде колец и рогов, которые отводят дугу от гирлянды изоляторов. Разряд пойдет по воздуху, если вылет рога $A > (0,3 - 0,4)H_r$. Защитная арматура применяется на ЛЭП напряжением 220 кВ и выше.



Но при $U_H > 750$ кВ защитная арматура не применяется, т.к. выравнивание напряжения вдоль гирлянды достигается за счет наличия расщепленных проводов в фазе и специальной («утопленной») подвеской гирлянды, при которой провода фазы располагаются на уровне тарелки первого изолятора или выше.

Для увеличения разрядного напряжения гирлянды на практике принимают $l_p/H \geq 1,3$. В этом случае разряд идет по пути ABCF, т.е. по воздуху. Выдерживаемое напряжение в сухом состоянии гирлянды при этом будет наибольшим.

Для увеличения l_p/H увеличивают диаметр тарелки D или сокращают строительную высоту изолятора H за счет уменьшения размеров шапки и стержня. Первый путь менее желателен, т.к. приводит к увеличению размеров, веса и стоимости изолятора.

В незагрязненных районах уровень изоляции ЛЭП определяется внутренними и атмосферными перенапряжениями. В районах с интенсивными естественными и промышленными загрязнениями уровень изоляции определяется **рабочим напряжением, т.е. нормальным эксплуатационным режимом.**

Можно считать, что электрическая прочность чистых изоляторов под дождем при коммутационных перенапряжениях практически не снижается. Однако разрядное напряжение загрязненных изоляторов при коммутационных волнах снижается во время увлажнения, причем это снижение зависит от длительности волны.

При частоте коммутационных волн $f = 50-100$ Гц разрядное напряжение в 1,5-2,0 раза выше, чем при промышленной частоте.

Поэтому основной характеристикой электрической прочности изоляторов является влагоразрядная напряженность по строительной высоте $E_{врН}$ при длительном воздействии напряжения.

В соответствии с Руководящими указаниями по выбору и эксплуатации изоляции в районах с загрязненной атмосферой выбор числа элементов в гирлянде в зависимости от степени загрязненности атмосферы производится по $\lambda_{уд \text{ эф}}$ для нормального эксплуатационного режима.

Минимально допустимая эффективная длина пути утечки (для поддерживающих гирлянд, аппаратной и опорной изоляции):

$$L_{\text{эф}} = \lambda_{\text{уд эф}} U_{\text{раб л}}, \text{ см}$$

где $\lambda_{\text{уд эф}}$ – удельная эффективная длина пути утечки, которая зависит от степени загрязненности атмосферы и класса напряжения ЛЭП (берется из таблиц), см/кВ,
 $U_{\text{раб л}}$ – наибольшее рабочее линейное напряжение, кВ.

Необходимая длина пути утечки изоляционной конструкции (гирлянды):

$$L_{\Gamma} = L_{\text{эф}} k = \lambda_{\text{уд эф}} k U_{\text{раб л}}, \text{ см}$$

где k – поправочный коэффициент или коэффициент использования длины пути утечки (из таблиц или определяется аналитически).

Количество изоляторов в гирлянде на металлических и железобетонных опорах:

$$n = \frac{L_{\Gamma}}{L} = \frac{\lambda_{\text{уд эф}} k U_{\text{раб л}}}{L}$$

где L – длина пути утечки изолятора, см.

При расчетах n округляется в большую сторону, если число десятых после запятой в расчетной цифре превышает 3.

На деревянных опорах число элементов в гирлянде берется на один меньше.

Число изоляторов, устанавливаемых в натяжных гирляндах, $m=n+a$, где a – число дополнительных изоляторов. Для $U_H=110-150$ кВ, $a=1$; $U_H=220-330$ кВ, $a=2$; $U_H=500$ кВ, $a=3$ и для $U_H=750$ кВ, $a=4$.

Точки подвеса провода к опорам с помощью гирлянд изоляторов являются ослабленными точками. Именно в этих точках происходит наибольшее число аварий на ЛЭП, связанных с перекрытиями изоляции как при рабочем напряжении (при увлажнении), так и при перенапряжениях, а также за счет разряда с провода на стойку опоры при отклонении гирлянды с проводом ветром. Поэтому для предотвращения перекрытий при качании гирлянды длина траверсы принимается больше, чем необходимо для надежной работы линии при отсутствии ветра.

В условиях равномерного и слабонеравномерного поля пробивное напряжение твердой изоляции можно оценить по формуле:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \cdot d, \text{ кВ}$$

где $E_{\text{пр}}$ - электрическая прочность твердых диэлектриков, кВ/мм;
 d - толщина диэлектрика, мм.

Электрическую прочность электротехнического фарфора, широко используемого в качестве наружной изоляции, в условиях слабонеоднородного поля (радиус закругления полусферического электрода R , см) для плоских образцов толщиной $d = 0,5 \div 4,4$ см можно определить по формулам:

$$E_{\text{пр}} = 85 \cdot d^{-0,37}, \text{ кВ/см}$$

при $R \geq 0,4 d$

$$E_{\text{пр}} = 65 \cdot d^{-0,5}, \text{ кВ/см}$$

при $R < 0,4 d$

Эти формулы можно использовать для расчета толщины фарфора в головке штыревых изоляторов для ЛЭП ($E_{\text{пр}} = 40\text{-}50$ кВ/см).

Для трубчатых образцов из фарфора с толщиной стенки d при $R/r = 1,5-3,5$

$$E_{\text{пр}} = 65 \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{d}} \right), \text{ кВ/см}$$

Оптимальная конструкция подвесного тарельчатого изолятора должна обеспечить равнопрочность фарфора (стекла) как в сферической (верхняя часть головки изолятора), так и в цилиндрической (нижняя часть изолятора) частях, т.е. пробивные напряжения и максимальные напряженности в них должны быть равны.

Для сферической части

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \frac{r(R-r)}{R}, \text{ кВ}$$

Для цилиндрической части

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r} \text{ кВ}$$

где R и r - наружный и внутренний радиусы сферы и цилиндра, соответственно.
Для фарфора обычно выбирают $E_{\text{пр}} = 80 \div 100 \text{ кВ/см}$.

При изменении толщины диэлектрика, находящегося в неравномерном электрическом поле, величина пробивного напряжения определяется из квадратичной зависимости

$$U_{\text{пр}2} = U_{\text{пр}1} \sqrt{\frac{d_2}{d_1}},$$

где $U_{\text{пр}1}$ - пробивное напряжение, определяемое опытным путем, для образца произвольной толщины равной d_1 ;

$U_{\text{пр}2}$ - пробивное напряжение для образца толщиной d_2 .

Полуэмпирическая формула для расчета импульсной электрической прочности $E_{\text{пр}}$ твердых диэлектриков в резконеоднородном поле «острие-плоскость» на импульсах, полученная Ю.Н.Вершининым, в которой он учитывает структуру диэлектрика, его энергетические параметры:

$$E_{\text{пр}} = K K_{\text{в}} (A^0_c)^{1,1} \exp \left(\frac{a}{\text{в} + \lg d} + \frac{m}{n + \lg \tau} \right), \text{ В/см}$$

где d - толщина диэлектрика, см ($d = 0,001 \div 4,0$ см);

τ - длительность импульса, мкс ($\tau = 0,1 \div 10$ мкс);

A^0_c - удельная работа каналообразования, т.е. работа, необходимая для превращения 1 см^3 вещества в плазменное состояние, ккал/см³;

$K_{\text{в}} = 1,0$ при 50% - ной вероятности пробоя;

$K = 5,3$; $a = 31,0$; $\text{в} = 5,32$; $m = 1,5$; $n = 2,13$ (импульс положительный)

Для выбора $U_{\text{раб}}$ твердой изоляции можно использовать формулу:

$$U_{np} = \frac{U_{np}}{K_{зан}}, \text{ кВ}$$

где $K_{зан}$ - коэффициент запаса электрической прочности изоляции ($K_{зан} = 1,2 \div 10,0$).

Тепловой пробой наблюдается при длительном приложении напряжения, которое вызывает прогрессирующий разогрев диэлектрика за счет диэлектрических (джоулевых) потерь.



Вследствие нарушения теплового равновесия (баланса), когда генерируемое в диэлектрике тепло P при заданном напряжении больше отводимого Q , что приводит к прогрессирующему росту температуры диэлектрика и его пробое (теория Фока и Семенова).

Пробивное напряжение плоского диэлектрика при отводе тепла через поверхности обоих электродов равно (при переменном токе):

$$U_{np} = 3,79 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta_0}} \cdot \varphi(C), \quad \text{кВ}$$

при одностороннем охлаждении

$$U_{np} = 1,9 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta_0}} \cdot \varphi(C), \quad \text{кВ}$$

где λ - коэффициент теплопроводности диэлектрика, Вт/см·град;

f - частота напряжения, Гц;

ε и $\operatorname{tg} \delta_0$ - относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрика при начальной температуре, равной температуре окружающей среды;

α - температурный коэффициент возрастания потерь в выражении

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}, \quad \frac{1}{C};$$

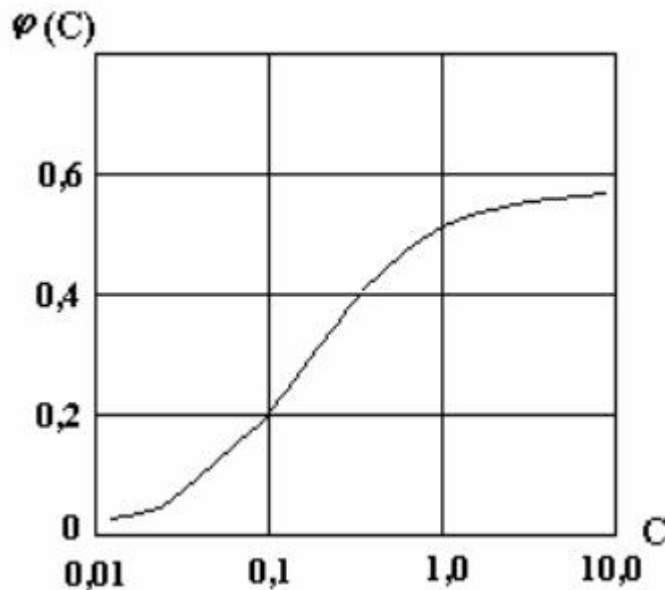
C – безразмерный параметр, характеризующий условия отвода тепла через электроды в окружающую среду.

Пренебрегая перепадом температуры в электродах, параметр C можно определить (при двухстороннем охлаждении):

$$C = \frac{K \cdot d}{2\lambda},$$

где K - коэффициент теплоотдачи, Вт/см² · град;
 d – толщина диэлектрика, см.

Функция $\varphi(C)$ определяется из рисунка или из таблицы.



Функция $\varphi(C)$ для расчета пробивного напряжения твердых диэлектриков.

Коэффициенты теплопроводности материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности, λ	
	Вт/см·град	Кал/с·см·град
Бакелит намотанный	0,003	0,00007
Полистирол	0,0008	0,00019
Полихлорвинил	0,0009	0,00022
Полиэтилен	0,003	0,00072
Фторопласт-4	0,0025	0,00060
Бумага, пропитанная соволом	0,0016	0,00038
Бумага, пропитанная маслом	0,0017	0,00041
Электрокартон (пропитанный)	0,0017	0,00041
Гетинакс	0,0017	0,00041
Фарфор	0,01	0,0024

При одностороннем охлаждении

$$C = \frac{K \cdot d}{\lambda}.$$

Для цилиндрического образца U_{np} определяется по формуле (слайд 7). Параметр C для этого случая определяется из формулы:

$$C = \frac{K}{\lambda} r \cdot \ln \frac{r}{r_0},$$

где r, r_0 - наружный и внутренний радиусы диэлектрика, см.

При одностороннем охлаждении плоского диэлектрика на постоянном напряжении:

$$U_{np} = \varphi(C) \sqrt{\frac{8\lambda}{\alpha \cdot \gamma_0}}, \quad B$$

где α - температурный коэффициент электропроводности диэлектрика в выражении

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}$$

γ_0 - электропроводность диэлектрика при температуре окружающей среды t_0 , См/см.

Рассчитанные пробивные напряжения должны быть больше максимального рабочего напряжения.

Ионизационная форма пробоя (электрическое старение) характеризуется сравнительно медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, развивающимися под действием электрического поля или разрядов в газовых или масляных прослойках и включениях.

Основной характеристикой этой формы пробоя является зависимость времени жизни от напряжения, частоты и температуры.

Закономерности электрического старения успешно используются для разработки методики прогнозирования (расчета) срока службы и надежности электрической изоляции.

Пример: уравнение для определения среднего срока службы для полимеров:

$$\tau = C \cdot U^{-m} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W_{\tau}}{K \cdot T}\right),$$

где параметры C , m , $\frac{\Delta W_{\tau}}{KT}$ зависят от характеристик материалов и определяются экспериментально.

Для изоляции класса А, имеющей большое распространение в электрических машинах и аппаратах, зависимость среднего срока службы изоляции от температуры выражается по Монтзингеру эмпирической формулой:

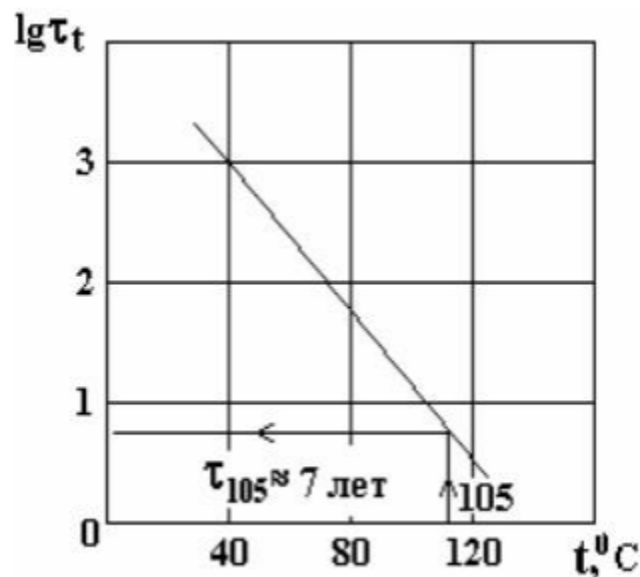
$$\tau_t = \tau_{t_M} \cdot 2^{\frac{t_M - t}{\Delta}},$$

τ_t - срок службы изоляции при температуре t °С, годы

τ_{t_M} - нормированный срок службы изоляции при максимальной нормированной температуре t_M ;

Δt - постоянная, численно равная величине приращения t , при которой срок службы τ_t изменяется вдвое.

Логарифм срока службы изоляции класса А
от температуры



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1

Кабель на номинальное напряжение 220 кВ должен выдерживать трехкратное перенапряжение. Определить минимально допустимую пробивную напряженность изоляции, если диаметр токоведущей жилы равен 40 мм, а внешний радиус кабеля 42 мм.

Задача 2

Между цилиндрическими электродами в масляной ванне произведен электрический пробой гетинаксовой пластинки толщиной 0,2 мм. Амплитуда пробивного напряжения при этом равна 6 кВ. Определить пробивное напряжение гетинаксовой пластинки толщиной 2,0 мм.

Задача 3

Определить пробивное напряжение теплового пробоя микалентной компаундированной изоляции электрической машины на отдельных стержнях обмотки при толщине изоляции $d=0,3$ см и температурах 20 и 60 °С. Примем следующие значения коэффициентов: коэффициент теплоотдачи $K=0,0017$ Вт/см²·град; коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda=0,0026$ Вт/см·град; диэлектрическая проницаемость $\varepsilon=5$; коэффициент возрастания потерь $\alpha=0,017$ 1/°С; тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С $\text{tg } \delta_{20} = 0,042$.

Задача 4

Средний срок службы изоляции класса А при температуре 1050С составляет 7 лет (рис.1). Параметр t принять для различных видов изоляции класса А в пределах 5-12 °С.

Определить средний срок службы изоляции при 90°С, если $\Delta t = 8^{\circ}\text{C}$.

Задача 5

Определить пробивное напряжение кабеля с радиусом токоведущей жилы 0,9 см и толщиной изоляции 1,1 см, если пробивная напряженность изоляции равна 80 кВ/мм.

Задача 6

Пробивное напряжение изоляции кабеля с диаметром жилы 15,3 мм и толщиной изоляции 10 мм равно 96 кВ. Определить пробивную напряженность электрического поля изоляции.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1

Сферический конденсатор залит трансформаторным маслом с пробивной прочностью 200 кВ/см . Радиус наружного электрода 12 см . Определить радиус внутреннего электрода и максимальное напряжение, которое можно приложить к данному конденсатору.

Задача 2

Определить пробивное напряжение проходного цилиндрического изолятора, работающего под напряжением 110 кВ . Изолятор имеет три слоя изоляции: бакелизированная бумага, масло и фарфор с пробивными напряженностями электрического поля 110 кВ/см ; $63,7 \text{ кВ/см}$ и $65,0 \text{ кВ/см}$, при диэлектрических проницаемостях, соответственно $4,3$; $2,5$ и $5,5$. Токоведущий стержень имеет радиус 2 см , а внешние радиусы слоев изоляции, соответственно, равны 3 см ; 14 см и $16,5 \text{ см}$. Под пробоем всех его слоев следует подразумевать последовательный пробой всех его слоев. Иметь в виду, что после пробоя одного из слоев изолятор нужно рассматривать как двухслойный, а затем - однослойный.

Задача 3

Цилиндрический двухслойный конденсатор имеет радиус внутреннего электрода 1,4 см, а наружного - 4,6 см. Относительная диэлектрическая проницаемость внутреннего слоя изоляции равна 6, наружного - 2. Определить необходимые толщины слоев изоляции с учетом равенства максимальных напряженностей электрических полей. К конденсатору приложено напряжение равное 130 кВ.

Задача 4

При намотке бумажного цилиндрического конденсатора между слоями образовалась воздушная тонкая прослойка. Определить напряженность электрического поля в этой прослойке, приняв радиусы электродов $r=1$ см; $R=6$ см, радиус расположения прослойки $r_1=2$ см, диэлектрическую проницаемость материала изоляции $\epsilon = 6$, а во втором варианте-3. Амплитуда приложенного напряжения 28,5 кВ.

Задача 5

Косинусный конденсатор с бумажно-масляной изоляцией имеет реактивную мощность равную 36 квар при рабочем напряжении промышленной частоты 10,5 кВ. Определить емкость конденсатора C , общее количество секций и емкость отдельной секции.

Задача 6

Определить размеры токоведущего стержня конденсаторного ввода $U_n=150$ кВ с бумажно-масляной изоляцией при токовой нагрузке 800 А.

Допустимые рабочие градиенты в диэлектрике конденсатора

Тип конденсатора (диэлектрик)	<i>Е_{раб}</i> , кВ/мм	Частота
Воздушный	0,5-0,7	-
Газонаполненный (азот 15-20атм)	1,3-3,0	10^5
Вакуумный	3-6	10^6
Маслонаполненный	1,3-1,5	10^5
Стекланный	25-30	постоян
Керамический	1-2	10^5 и

Бумажный с твердой пропиткой (в зависимости от толщины бумаги и числа слоев)	8-15	постоян. ток
Металло-бумажный однослойный	15-20	
Металло-бумажный многослойный	30-35	
Бумажный с жидкой пропиткой (четыре слоя бумаги)	30-35	
Бумажный косинусный при рабочем напряжении 1 кВ и выше ($d = 80$ мкм)	12-14	50
Бумажный печной с водяным охлаждением	4-9	10^3-10^4
Бумажный для включения в линии электропередачи	7,5-9	50
Бумажный для ГИН	45-60	-
Бумажный для ГИТ	35-40	-
Полистирольный (2-3 слоя пленки толщиной 0,02-0,03 мм)	12-17	постоян. ток
Бумажно-гленочный (2 слоя полипропилена + 1 слой бумаги), $d = 30-36$ мкм	35-38	50

Нормированные испытательные кратковременные напряжения промышленной частоты для изоляторов (действующие значения, кВ)

Класс напря- жения, кВ	Наибольшее рабочее напряжение (линейное), кВ	Испытатель- ное одномо- нутное нап- ряжение внутренней изоляции вводов, кВ	Испытательное нап- ряжение при плавном подъеме, кВ		Примеча- ние
			внешняя изоляция		
			в сухом состоянии	под дождем	
1	2	3	4	5	6
35	40,4	95	110	85	
110	126,0	265	295	215	
115	172,0	340	375	290	ГОСТ
220	252	490	550	425	1516.1-76
330	363,0	630	700	550	
500	525,0	800	900	740	
750	787,0	950	1050	900	ГОСТ 206.90-75