

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Техника высоких напряжений (ТВН)

представляет собой науку о характеристиках вещества и процессах в нем при экстремальных электромагнитных воздействиях - высоких напряжениях и сильных токах, а также о технологическом использовании этих процессов. Один из основных разделов техники высоких напряжений посвящен свойствам и характеристикам изоляционных конструкций электрооборудования высокого напряжения и условиям их надежной эксплуатации при воздействии рабочего напряжения, грозовых и внутренних перенапряжений. **Основная задача ТВН – создание и обеспечение надежно работающей электрической изоляции установок высокого напряжения.**

Терминология и определения:

- **Электрическим пробоем** изоляции называют явление потери изоляцией изоляционных свойств при превышении напряжением на изоляции критического значения. Это значение напряжения называют **пробивным напряжением изоляции** $U_{пр}$.
- **Электрической прочностью диэлектрика** $E_{пр}$ называют среднее значение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке непосредственно перед пробоем, поскольку проще всего измерять и оценивать именно эту величину:
- **Перекрытием** называют разряд по границе раздела двух сред, чаще всего это граница твердый диэлектрик - газ. Напряжение перекрытия $U_{пер}$ всегда существенно меньше пробивного напряжения $U_{пр}$ чисто газовой промежутка с теми же электродами.
- Наиболее изученным является пробой газовых промежутков; механизмы пробоя жидких и твердых диэлектриков отличаются большим разнообразием и значительно более сложны. В то же время именно газовая изоляция (воздух) является основным видом изоляции в электроустановках и изучение поведения ее в электрических полях большой напряженности имеет

МАТЕРИАЛЫ

МАГНИТНЫЕ	ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ	ПРОВОДНИКОВЫЕ	ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ	СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ
СТАЛЬ, ФЕРРИТ, ПЕРМАЛЛОЙ	ФАРФОР, СТЕКЛО, БУМАГА, СЛЮДА	МЕДЬ, АЛЮМИНИЙ, БРОНЗА, ЛАТУНЬ	КАРБИД КРЕМНИЯ, ОКИСЬ ЦИНКА	КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО, БЕЛАЯ ЭИАЛЬ, АЛЮМИНИЙ

Основные обозначения

ρ – удельное электрическое сопротивление;

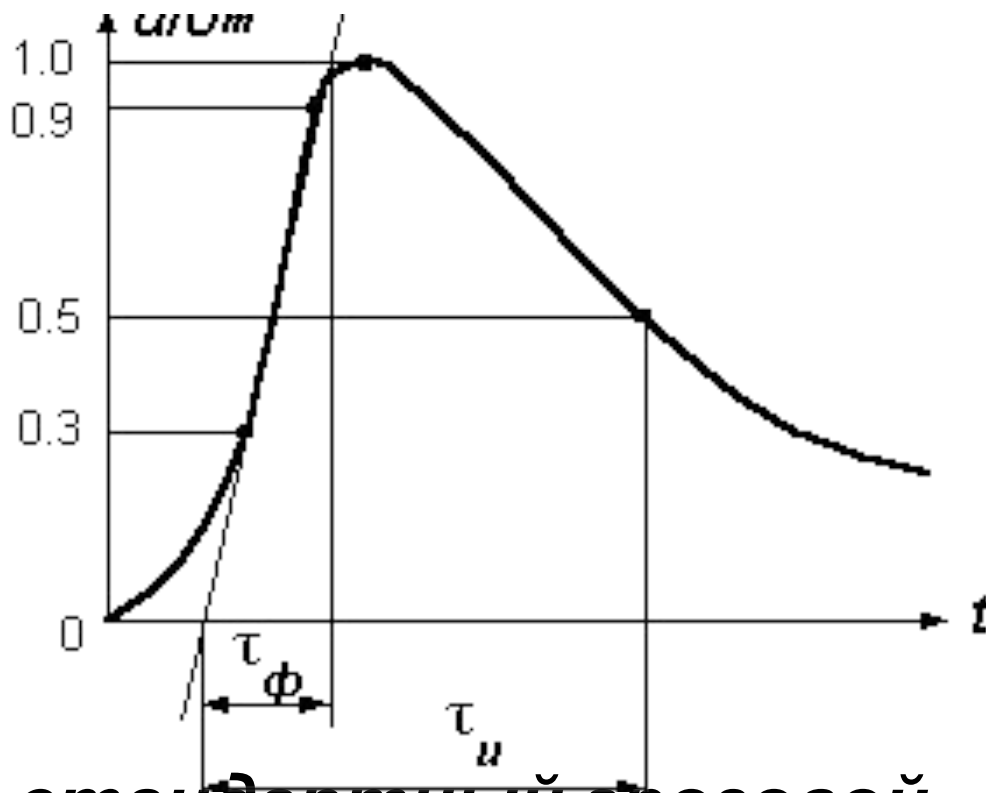
μ – относительная магнитная проницаемость;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;

δ - угол потерь (магнитных или диэлектрических).

λ - длина волны;

- τ – постоянная времени.



стандартный грозовой импульс

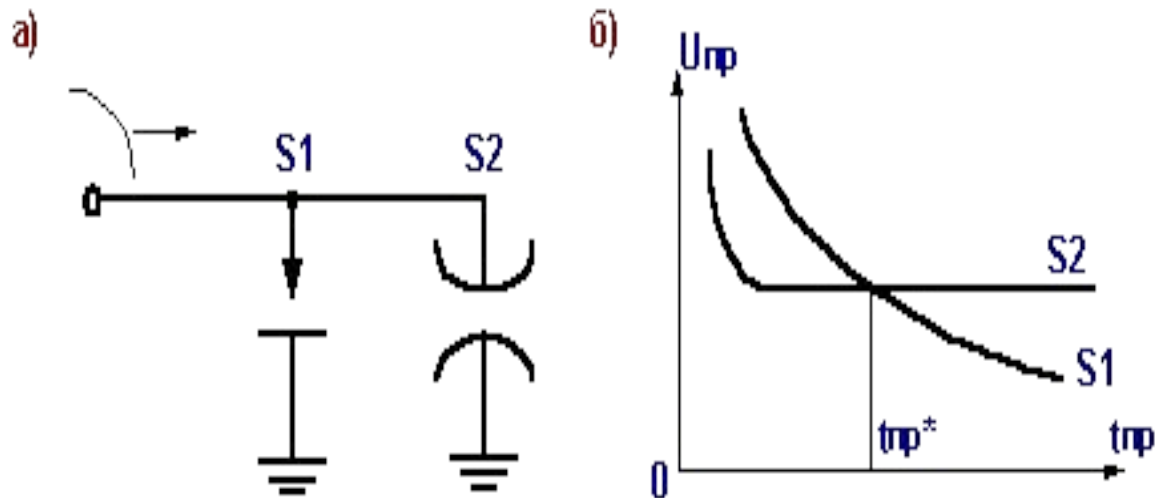
ГОСТ 1516.2-97 определяет время нарастания импульса напряжения и длительность импульса. Для выделения наиболее значимой части импульса на его фронте проводят прямую линию через точки, соответствующие 0,3 и 0,9 амплитуды импульса и по пересечению этой линией оси абсцисс и линии максимального значения импульса определяют длительность фронта τ_ϕ , а по времени достижения спада импульса до половины максимального значения определяют длительность импульса τ_u . Для стандартного грозового импульса $\tau_\phi = 1.2 \text{ мкс} + 30\%$, $\tau_u = 50 \text{ мкс} + 20\%$.

Изоляционные промежутки

По степени однородности электрического поля, зависящей от формы электродов, различают два вида изоляционных промежутков:

- - **изоляционные промежутки с однородным и слабонеоднородным электрическим полем (СНП);**
- - **изоляционные промежутки с резконеоднородным электрическим полем (РНП).**

Количественной характеристикой степени однородности поля является ***коэффициент неоднородности.***



Вольт-секундные характеристики промежутков разных типов

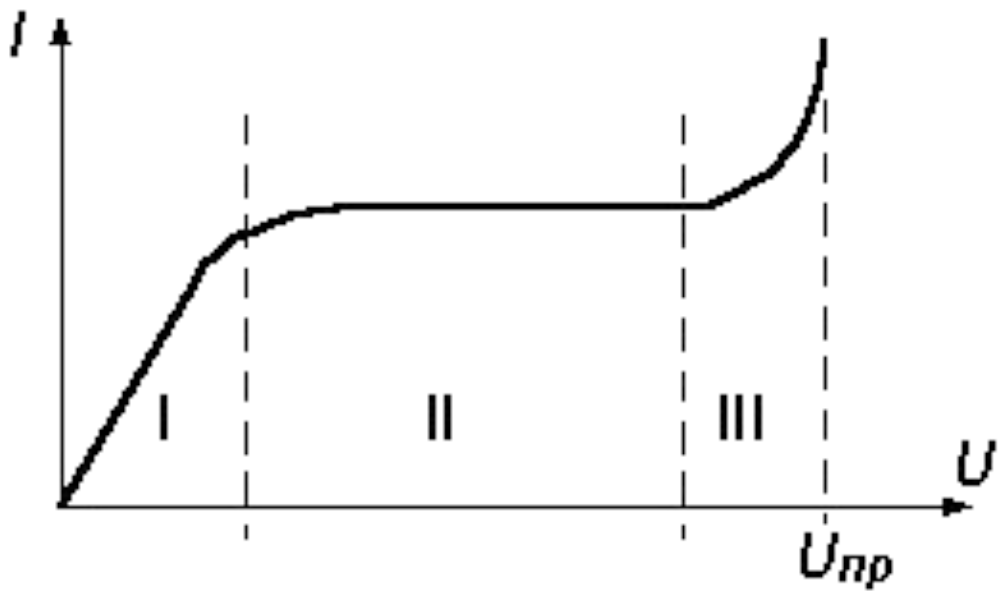
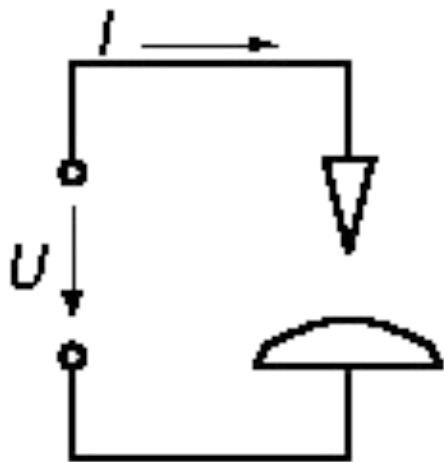
Вольт-секундные характеристики промежутков с однородным и слабонеоднородным электрическим полем имеют более пологий вид по сравнению с промежутками с резконеоднородным полем. Защитный промежуток 1 не обеспечит защиту изоляции S2 при предразрядных временах менее $t_{пр}^*$, хотя на частоте 50 Гц пробивное напряжение S1 может быть меньше, чем у S2.

Виды токов в изоляции

Изоляция электроустановки служит для предотвращения протекания электрического тока между изолируемыми частями.

В нормальном состоянии через изоляцию могут протекать *три вида токов*:

- **емкостные токи** при переменном напряжении, которые зависят от емкости изоляции и могут быть большими по величине;
- **абсорбционные токи** (токи различных видов замедленной поляризации), сказывающиеся при постоянном и при переменном напряжениях;
- **сквозные токи**, чрезвычайно малые по величине, которые протекают при постоянном напряжении через длительное время после его включения.



Вольт-амперная характеристика газового промежутка

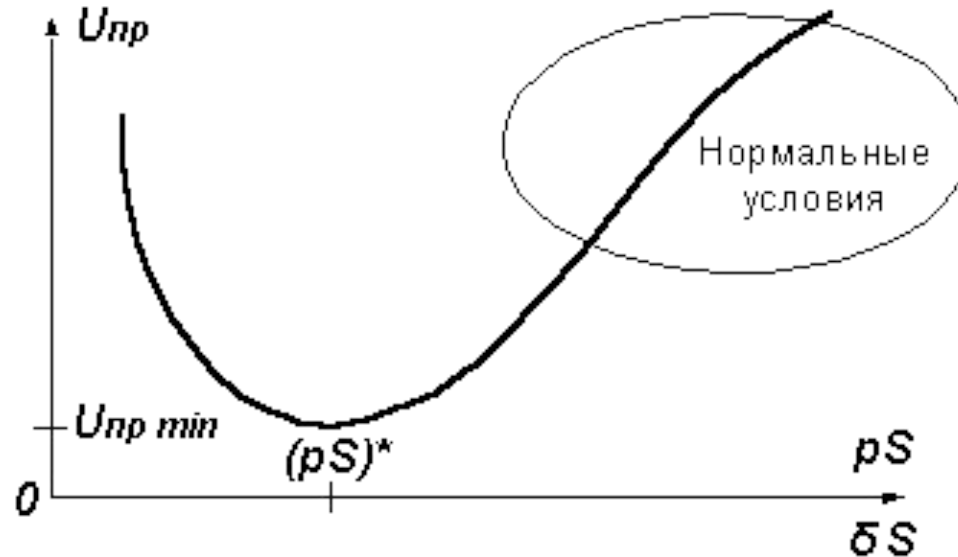
В газовых изоляционных промежутках при небольших напряжениях выполняется закон Ома, область при повышении напряжения наступает насыщение, при котором все генерируемые внешними ионизаторами заряженные частицы достигают электродов и роста тока при росте напряжения не происходит (область, плотность тока при этом составляет примерно 10^{-15} А/м² при напряженности поля около 0,6 В/м).

Только при больших напряжениях, когда возникает ионизация за счет большой напряженности электрического поля, начинается резкий рост электрического тока (область, приводящий к независимости разряда от внешних ионизаторов (самостоятельная ионизация)).

Диэлектрические потери и угол потерь

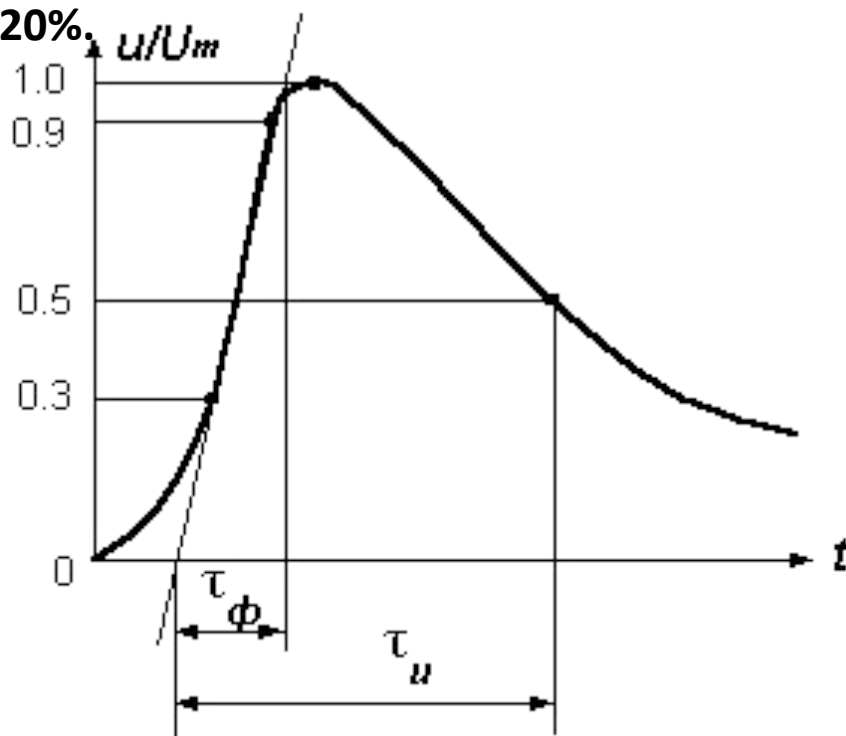
- **Любая изоляция нагревается** при приложении к ней напряжения. Причиной нагрева являются сквозные токи через изоляцию, нагрев за счет замедленных видов поляризации, ионизация газовых включений в твердой изоляции и неоднородность структуры изоляции.
- **Диэлектрическими потерями** называют мощность нагрева изоляции за счет приложенного к ней напряжения. Диэлектрические потери при переменном напряжении обычно существенно больше, чем при постоянном напряжении той же величины, что и действующее значение переменного напряжения, и основную роль в нагреве на переменном напряжении до начала ионизации чаще всего играют поляризационные потери.
- **Углом диэлектрических потерь** называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фазы между напряжением на изоляции и током через изоляцию. $\text{tg } \delta$ показывает соотношение между активной мощностью нагрева изоляции и реактивной емкостной мощностью в изоляции. Понятие угла диэлектрических потерь применимо только для синусоидальных напряжений и токов.

Пробивное напряжение газового промежутка с однородным (ОП) и слабонеоднородным (СНП) электрическим полем зависит как от расстояния между электродами, так и от давления и температуры газа. Эта зависимость определяется **законом Пашена**, согласно которому пробивное напряжение газового промежутка с ОП и СНП определяется произведением относительной плотности газа δ на расстояние между электродами $S, U_{пр} = f(\delta S)$. Относительной плотностью газа называют отношение плотности газа в данных условиях к плотности газа при нормальных условиях (20° С, 760 мм рт. ст.).



Вид зависимости закона Пашена

ГОСТ 1516.2-97 определяет время нарастания импульса напряжения и длительность импульса. Для выделения наиболее значимой части импульса на его фронте проводят прямую линию через точки, соответствующие 0.3 и 0.9 амплитуды импульса и по пересечению этой линией оси абсцисс и линии максимального значения импульса определяют длительность фронта τ_{ϕ} , а по времени достижения спада импульса до половины максимального значения определяют длительность импульса $\tau_{и}$. Для стандартного грозового импульса $\tau_{\phi} = 1.2$ мкс + 30%, $\tau_{и} = 50$ мкс + 20%.



Определение параметров апериодического импульса

ИЗОЛЯТОРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Изоляторами называют электротехнические изделия, предназначенные для изолирования разнотенциальных частей электроустановки, то есть для предотвращения протекания электрического тока между этими частями электроустановки, и для механического крепления токоведущих частей.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОЛЯТОРОВ

- **По расположению токоведущей части** различают опорные, проходные и подвесные изоляторы, назначение которых прямо определяются их названиями.
- **По конструктивному исполнению** изоляторы делятся на тарельчатые (изоляционная часть в форме тарелки), стержневые (изоляционная часть в виде стержня или цилиндра) и штыревые (изолятор имеет металлический штырь, несущий основную механическую нагрузку).
- **По месту установки** различают линейные изоляторы, используемые для подвески проводов линий электропередачи и контактной сети, и стационарные изоляторы, используемые на электростанциях, подстанциях (в том числе и тяговых) и постах секционирования. В последнем плане одни и те же типы изоляторов, например, подвесные тарельчатые, могут быть и линейными, и стационарными.

Основные характеристики изоляторов

Основными характеристиками изоляторов являются разрядные напряжения, геометрические параметры и механические характеристики, а также номинальное напряжение электроустановки, для которой предназначен изолятор.

К разрядным напряжениям изоляторов относят три напряжения перекрытия и одно пробивное напряжение:

сухоразрядное напряжение $U_{схр}$ - напряжение перекрытия чистого сухого изолятора при напряжении частотой 50 Гц (эффективное значение напряжения);

мокроразрядное напряжение $U_{мкр}$ - напряжение перекрытия чистого изолятора, смоченного дождем, падающим под углом 45° к вертикали, при напряжении частотой 50 Гц (эффективное значение напряжения);

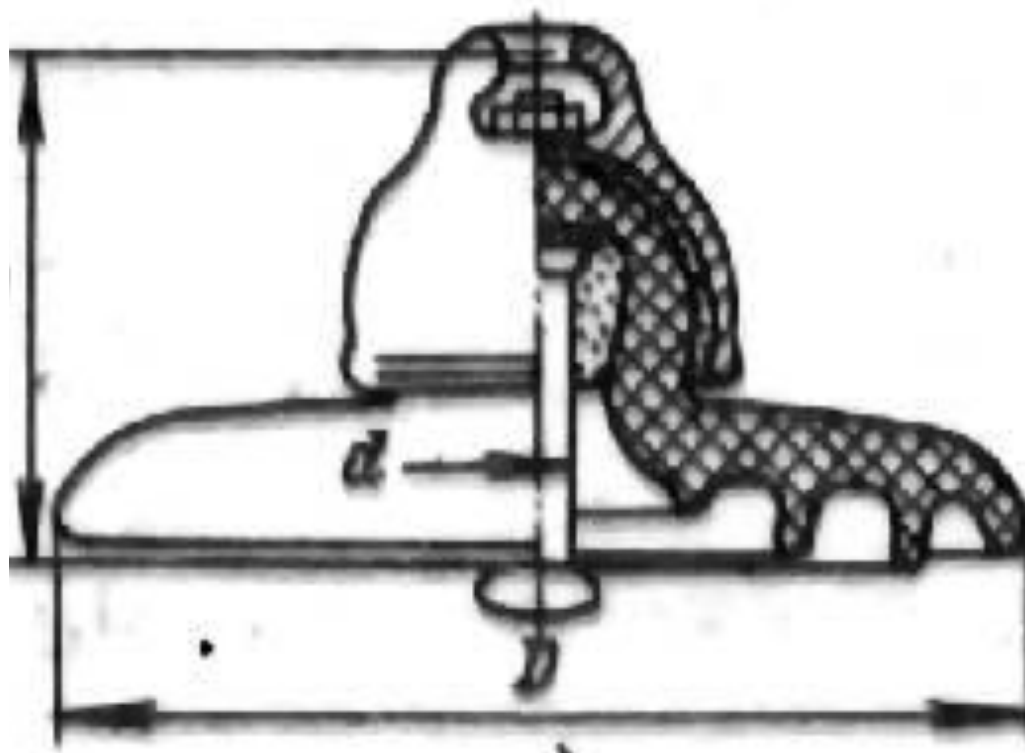
импульсное разрядное напряжение $U_{имп}$ - пятидесятипроцентное напряжение перекрытия стандартными грозowymi импульсами (амплитуда импульса, при которой из десяти поданных на изолятор импульсов пять завершаются перекрытием, а оставшиеся пять не приводят к перекрытию);

пробивное напряжение $U_{пр}$ - напряжение пробоя изоляционного тела изолятора на частоте 50 Гц, редко используемая характеристика, поскольку при пробое вызывает необратимый дефект изолятора и напряжение перекрытия должно быть меньше пробивного напряжения.

Геометрические параметры

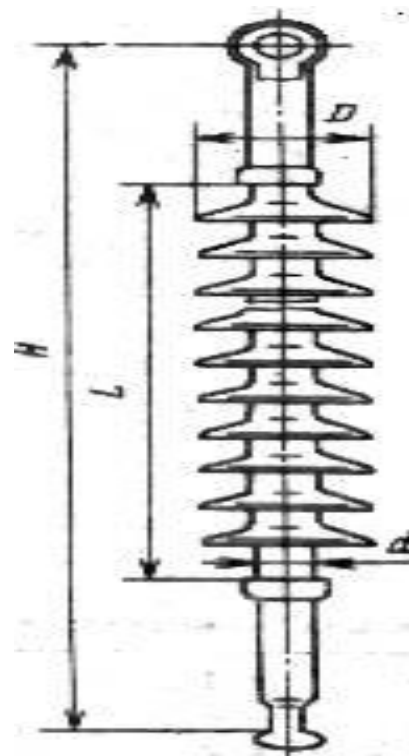
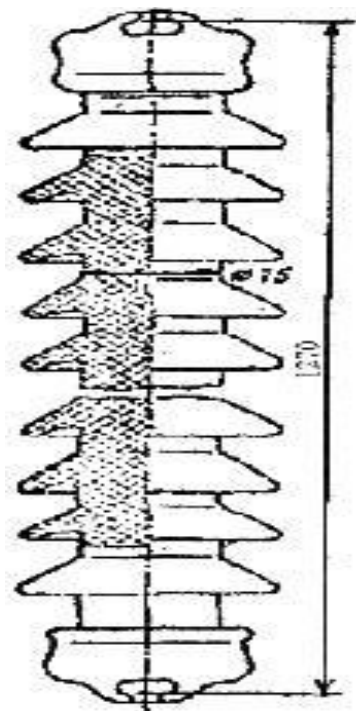
Изоляторов:

- **строительная высота H_c** , то есть габарит, который изолятор занимает в конструкции после его установки; у некоторых изоляторов, например, у тарельчатых подвесных, строительная высота меньше реальной высоты изолятора;
- **наибольший диаметр D** изолятора;
- **длина пути утечки** по поверхности изолятора l_y
- **кратчайшее расстояние между электродами по воздуху l_c**
- (сухоразрядное расстояние), от которого зависит сухоразрядное напряжение;
- **мокроразрядное расстояние l_m** , определяемое в предположении, что часть поверхности изолятора стала проводящей из-за смачивания дождем, падающим под углом 45° к вертикали



Эскиз изолятора ПФ-70А

Изоляторы воздушных линий электропередачи чаще всего бывают тарельчатые, штыревые и стержневые. Эти изоляторы спроектированы так, чтобы в сухом состоянии пробивное напряжение превышало пробивное напряжение перекрытия примерно в 1.6 раза, что обеспечивает отсутствие пробоя при перенапряжениях



Стержневой фарфоровый
и стержневой полимерный
изоляторы

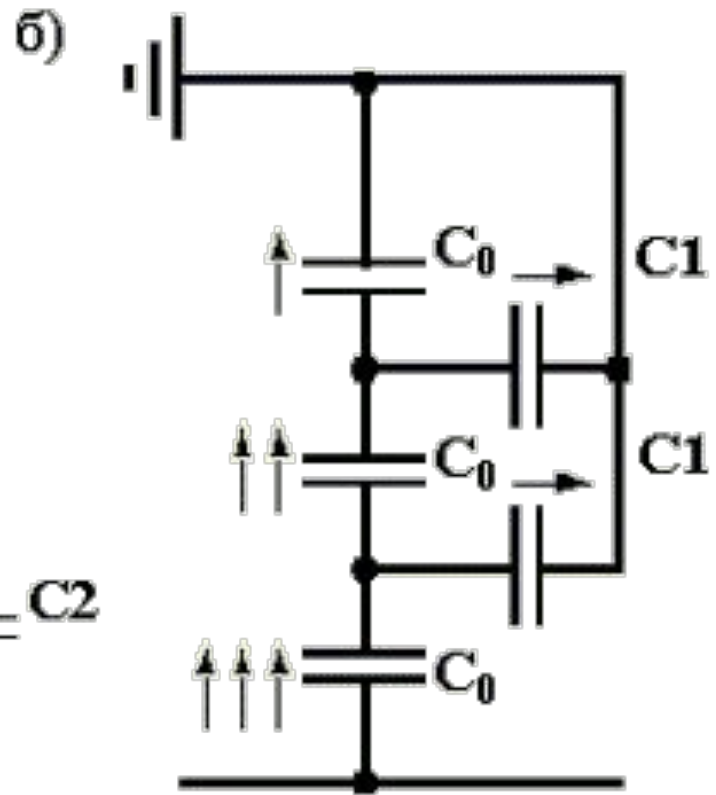
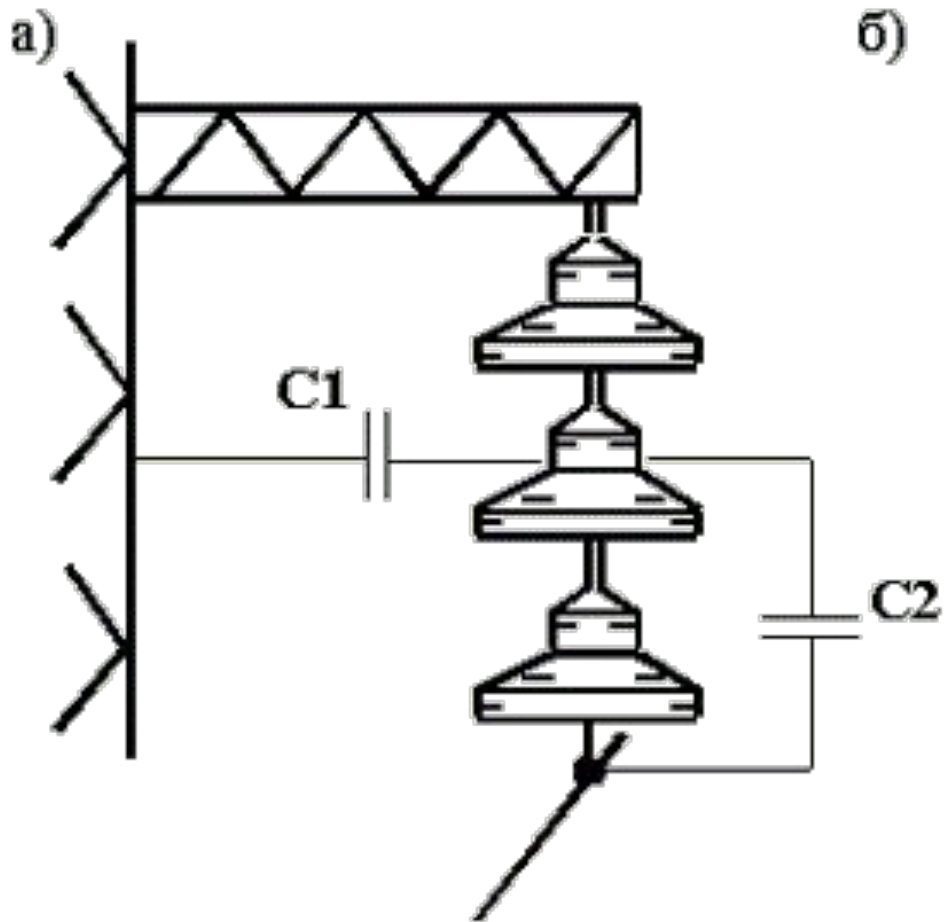


Изолятор ШФ-10В

- **Штыревые изоляторы** крепятся на опоре с помощью металлического штыря или крюка (Из-за большого изгибающего усилия на такой изолятор применяют штыревые изоляторы на напряжения не выше 35 кВ).

Шесть подгрупп изоляторов для контактной сети:

- **подвесные изоляторы**, которых больше всего;
- **фиксаторные изоляторы**, используемые для изоляции фиксаторных узлов;
- **консольные изоляторы**, которые используют в изолированных консолях и которые могут быть тех же марок, что и фиксаторные;
- **секционирующие изоляторы** - особый вид изоляторов, используемых в конструкциях секционных изоляторов (секционные изоляторы, собственно, изоляторами уже не являются, это сборные конструкции для секционирования контактной сети);
- **штыревые изоляторы**, используемые для крепления проводов линий продольного электроснабжения, располагаемых на опорах контактной сети;
- **опорные изоляторы**, используемые в мачтовых разъединителях.



Гирлянда изоляторов и схема замещения гирлян

КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Основными видами повреждений изоляции контактной сети являются:

- перекрытия изоляторов из-за их загрязнения, пробой изоляторов из-за нарушения изоляционной части,
- перекрытия изоляторов птицами,
- механические изломы стержневых изоляторов.

Этим повреждениям способствуют скрытые дефекты изоляторов, наличие влаги в атмосфере и попадание ее в армировку изолятора, нагрев изоляторов солнечными лучами (почти 100% случаев пробоя изоляции происходит в теплый период года), загрязнение атмосферы различными химическими веществами, по которым происходит поверхностное перекрытие. Опыт эк

Основные методы контроля изоляции контактной сети

- **Изоляторы контактной сети подвергают контролю перед установкой и в процессе эксплуатации.**
- **Не допускаются к монтажу и заменяются в процессе эксплуатации изоляторы, имеющие следующие дефекты:**
 - **- трещины в оконцевателях, качание, сползание или проворачивание их в заделке, видимое искривление (несоосность) деталей у всех типов изоляторов;**
 - **- сколы фарфора ребер общей площадью более 3 см² или видимые трещины;**
 - **- в стекле - трещины, сколы, посечки, морщины, складки, натеки, свищи, видимые внутренние газовые пузыри и инородные включения;**
 - **- у полимерных изоляторов - механические повреждения (надрезы, проколы, кратеры, ссадины), разгерметизация защитного чехла или покрытия, следы токопроводящих дорожек (треков) на длине более одной трети пути утечки;**
 - **- коррозия стержня тарельчатого изолятора до диаметра 12 мм.**

Основными видами контроля изоляции контактной сети являются:

- **осмотры** при обходах и объездах вагоном-лабораторией.;
- **диагностирование фарфоровых тарельчатых изоляторов** производится *приборами дистанционного контроля* их состояния (тепловизорами, электронно-оптическими дефектоскопами типа <Филин> и др.) или *измерительными штангами*;
- **дефектировка штангой** производится на контактной сети переменного тока непосредственным измерением фактического напряжения на каждом из изоляторов гирлянды с изолирующей съемной вышки. Цель измерений - выявление отдельных <нулевых> изоляторов до пробоя всей гирлянды и потери ею механической прочности.

Появившиеся в 80-х годах 20-го века и рекомендуемые ПУТЭКС для применения, *электронно-оптические дефектоскопы* типа <Филин> при попытках их освоения на Восточно-Сибирской железной дороге проявили себя неудовлетворительно. Работа с ними возможна только в темное время суток, надежность выявления дефектной гирлянды <Филином> оказалась низкой.

Приборы контроля оборудования в инфракрасной области спектра (*тепловизоры*) нашли ограниченное практическое применение ввиду их громоздкости. Такой прибор установлен только в дорожном вагоне-лаборатории для испытаний контактной сети и используется при периодических объездах участков вагоном. Приборы тепловизионного контроля последних модификаций являются цифровыми и обычно работают в паре с компьютером.

Методы повышения надежности изоляции контактной сети :

- **усиление изоляции в местах, где наблюдались перекрытия изоляции, путем увеличения числа изоляторов и применением полимерных изоляторов;**
- **обмыв изоляторов струей воды передвижными установ-ками; при малой эффективности обмывки - чистка вручную или замена изоляторов;**
- **временное понижение напряжения в контактной сети в зоне повышенного загрязнения атмосферы с дистанционным контролем изоляции;**
- **покрытие изоляторов гидрофобными пастами и смазочными материалами, рекомендуется в зонах цементных и химических загрязнений**

Испытательные установки высокого переменного напряжения

- Испытательные установки высокого переменного напряжения *предназначены* для получения высокого регулируемого переменного напряжения, с помощью которого испытывают изоляцию повышенным напряжением.
- Основным узлом установки является *испытательный трансформатор*, отличающийся от силового трансформатора аналогичного класса напряжения малой мощностью, ограниченным временем включения, малым запасом электрической прочности изоляции. Испытательные трансформаторы имеют большой коэффициент трансформации и значительную индуктивность рассеяния. Испытательные трансформаторы большей частью являются однофазными и выполняются в трех модификациях: в изолирующем корпусе, в металлическом корпусе с одним вводом и в металлическом корпусе с двумя вводами.

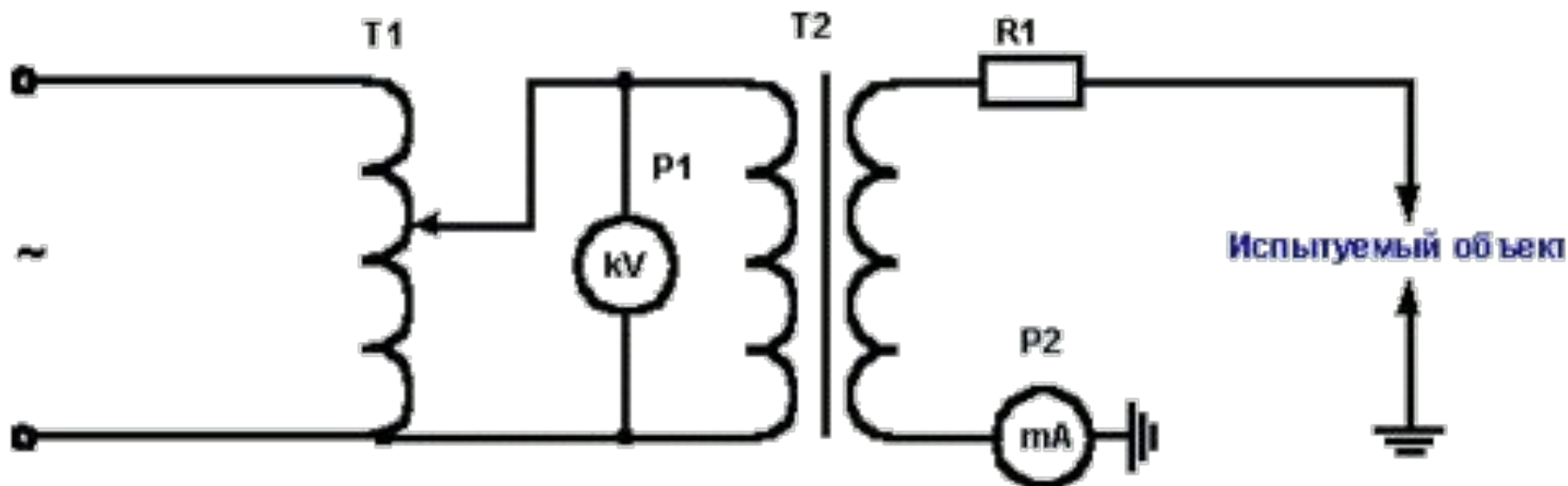
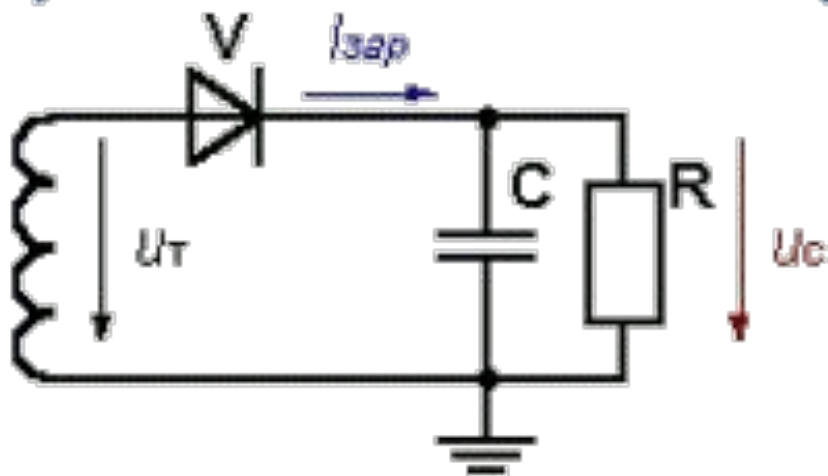


Схема испытательной установки переменного напряжения
Упрощенная схема испытательной установки переменного
напряжения содержит испытательный трансформатор T2 (или
каскад трансформаторов), регулировочный трансформатор T1,
защитный резистор R1, предназначенный для демпфирования
колебаний при пробое изоляции и снижения возникающих в обмотке
трансформатора перенапряжений, и измерительные приборы.
Измерение напряжения на выходе установки может производиться
по первичному напряжению испытательного трансформатора, как
показано на рис. 4.3, а также вольтметр может присоединяться на
отвод высоковольтной обмотки.

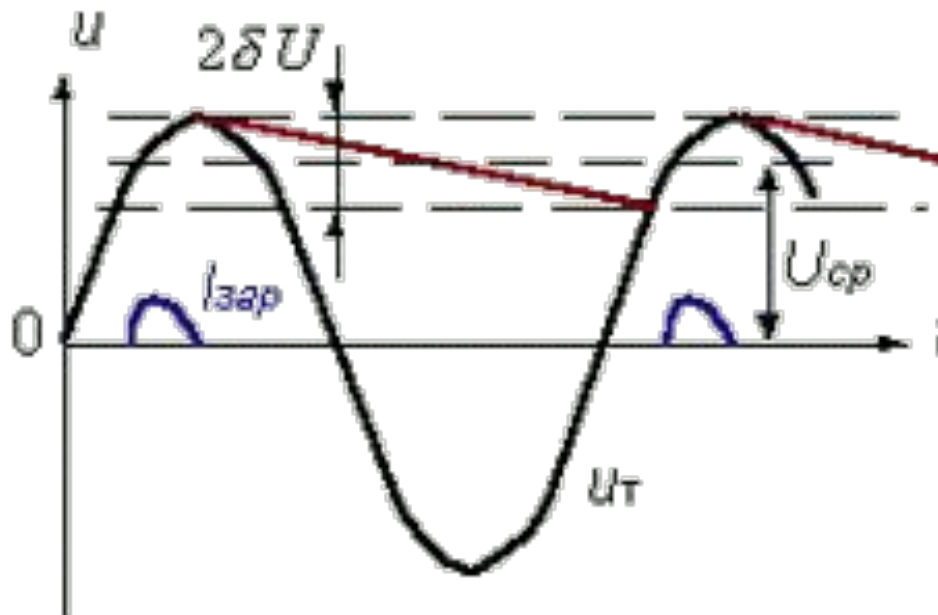
Испытательные установки высокого постоянного напряжения

- Для получения высокого постоянного напряжения используют выпрямительные установки и электростатические генераторы. Последние позволяют получать наиболее высокие напряжения - вплоть до 30 МВ - но при малых токах, не более 1 мА. Поэтому при испытаниях изоляции применяют в основном выпрямительные установки.
- **Выпрямительные установки в принципе могут быть поделены на две группы: установки однополупериодного выпрямления и установки, построенные по схемам умножения напряжения.**
- **В однополупериодных выпрямителях** высокое переменное напряжение преобразуется в высокое постоянное напряжение с помощью выпрямителя и сглаживающего устройства.
- **Схемы умножения напряжения:** удвоением напряжения, мостовая схема, позволяют получить высокое постоянное напряжение от источника с гораздо меньшим напряжением, но сравнительно небольшой мощности в сопоставлении с однополупериодным выпрямителем.

а)



б)



Однополупериодный выпрямитель

Высокое переменное напряжение преобразуется в высокое постоянное напряжение с помощью выпрямителя и сглаживающего устройства

В качестве выпрямительных элементов применяют последовательно включенные полупроводниковые диоды. Основную трудность составляет высокое обратное напряжение ($2U_m$ в однополупериодных схемах), которое должно быть равномерно распределено по отдельным диодам. Равномерности распределения достигают либо шунтированием диодов резисторами или конденсаторами, либо использованием диодов с лавинной обратной характеристикой (аналоги стабилитронов).

Напряжение на испытуемой изоляции при данной схеме пульсирует вблизи среднего значения. По нормам МЭК пульсация напряжения не должна превышать 5% от среднего значения напряжения.

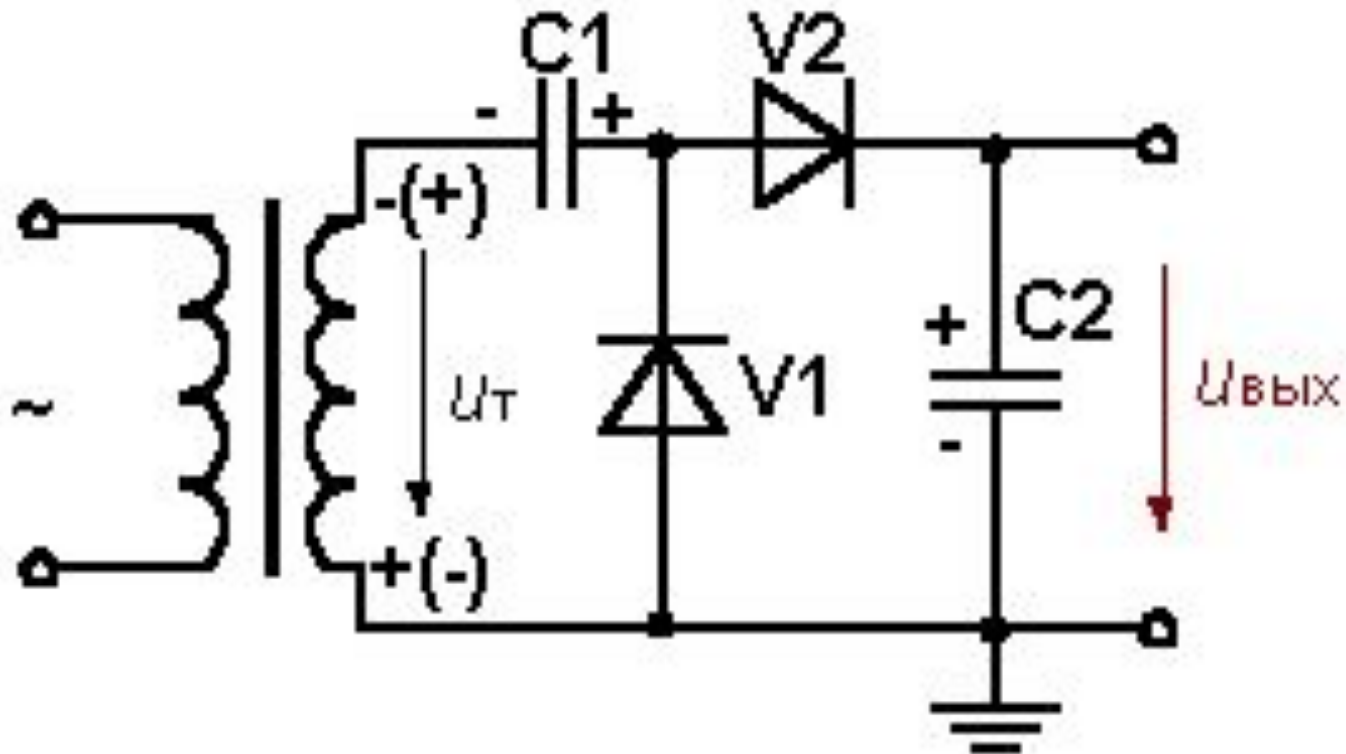
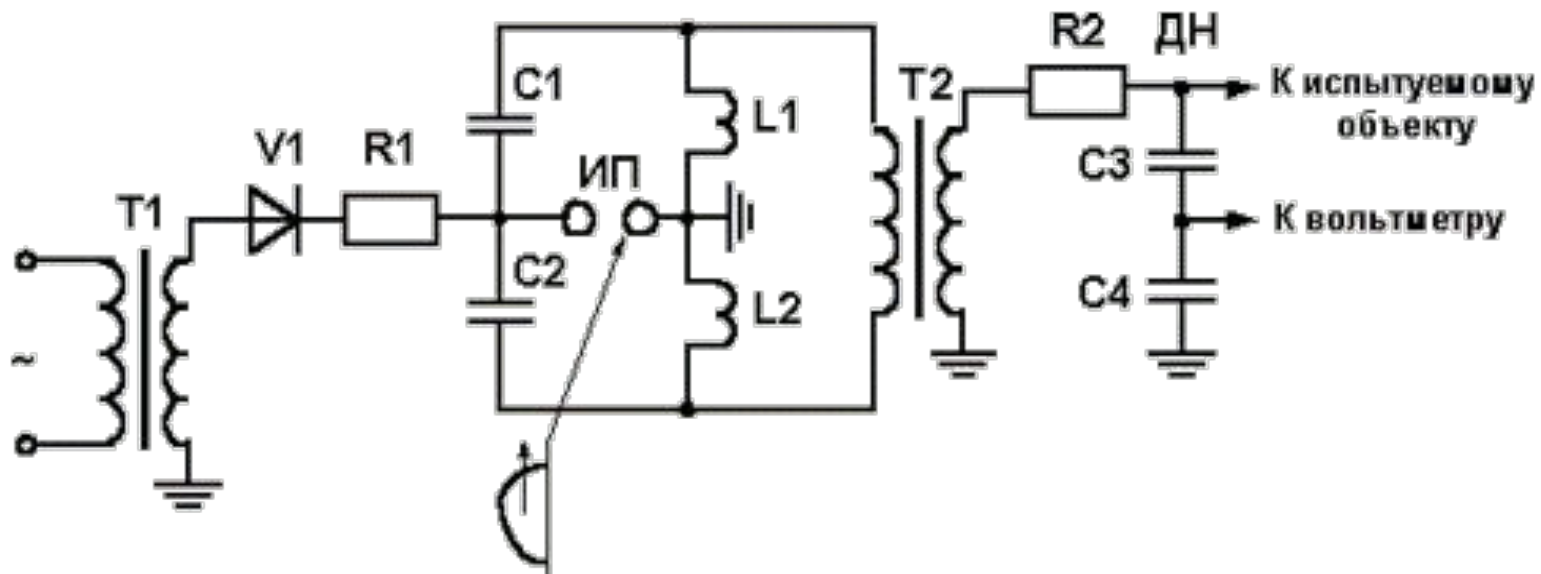


СХЕМА выпрямителя с удвоением напряжения

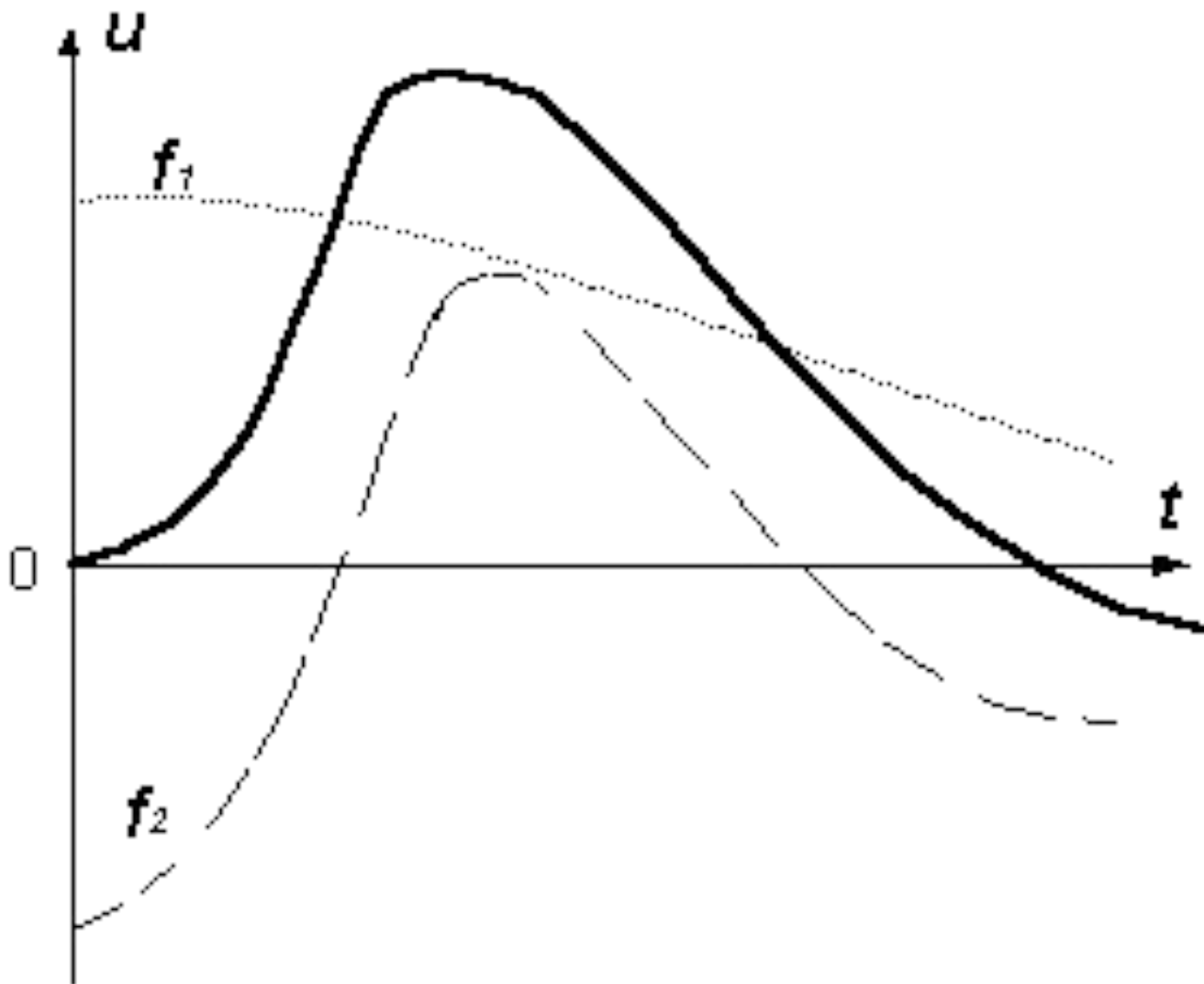
В схеме с удвоением напряжения C_1 заряжается примерно до амплитудного значения в те полупериоды, в которые вентиль V_1 открыт. В полупериоды противоположной полярности открывается вентиль V_2 и конденсатор C_2 оказывается включенным на суммарное напряжение обмотки трансформатора и заряженного конденсатора C_1 . При отсутствии нагрузки конденсатор C_2 заряжается до двойной амплитуды напряжения трансформатора. В этой схеме обратное напряжение на каждом из диодов равно удвоенной амплитуде напряжения трансформатора.

Генераторы коммутационных импульсов

При коммутациях высоковольтных цепей возникают импульсы перенапряжений, имеющие время нарастания до 1000 микросекунд и длительность до полуспада порядка нескольких миллисекунд. Для испытаний устойчивости изоляции к таким перенапряжениям используются генераторы коммутационных импульсов, построенные по разнообразным схемам. Одна из простейших схем генератора коммутационных импульсов показана на рисунке. Конденсаторы С1 и С2 этой схемы заряжаются от высоковольтного выпрямителя V1. Запуск производится путем подачи поджигающего импульса напряжения на искровой промежуток ИП. После пробоя этого промежутка в двух отдельных контурах L1 С1 и L2 С2 начинаются затухающие колебания. Частоты контуров выбраны таким образом, чтобы $f_2 = (3-5)f_1$. Импульсный трансформатор Т2 дополнительно увеличивает напряжение, причем на его вторичной обмотке создается разность



**Схема генератора
коммутационных импульсов**



**Форма выходного импульса
генератора**

. Генераторы импульсных напряжений

- Испытания изоляции оборудования стандартными грозowymi импульсами, имеющими длительность фронта 1.2 мкс и длительность до полуспада 50 мкс проводят с помощью генераторов импульсных напряжений (ГИН). Схемы ГИН достаточно разнообразны, однако испытания изоляции обыкновенно проводят генераторами с емкостными накопителями, обладающими весьма небольшими паразитными индуктивностями элементов.
- Стандартный грозовой импульс в емкостном ГИН **получают** путем разряда высоковольтного конденсатора на резистор, а сравнительно пологий фронт в 1.2 мкс формируют за счет заряжения вспомогательного конденсатора через дополнительный резистор. Таким образом, минимальное количество элементов ГИН без учета зарядного устройства и коммутатора составляет четыре. Одноступенчатый ГИН применяют при напряжениях менее 100 кВ.

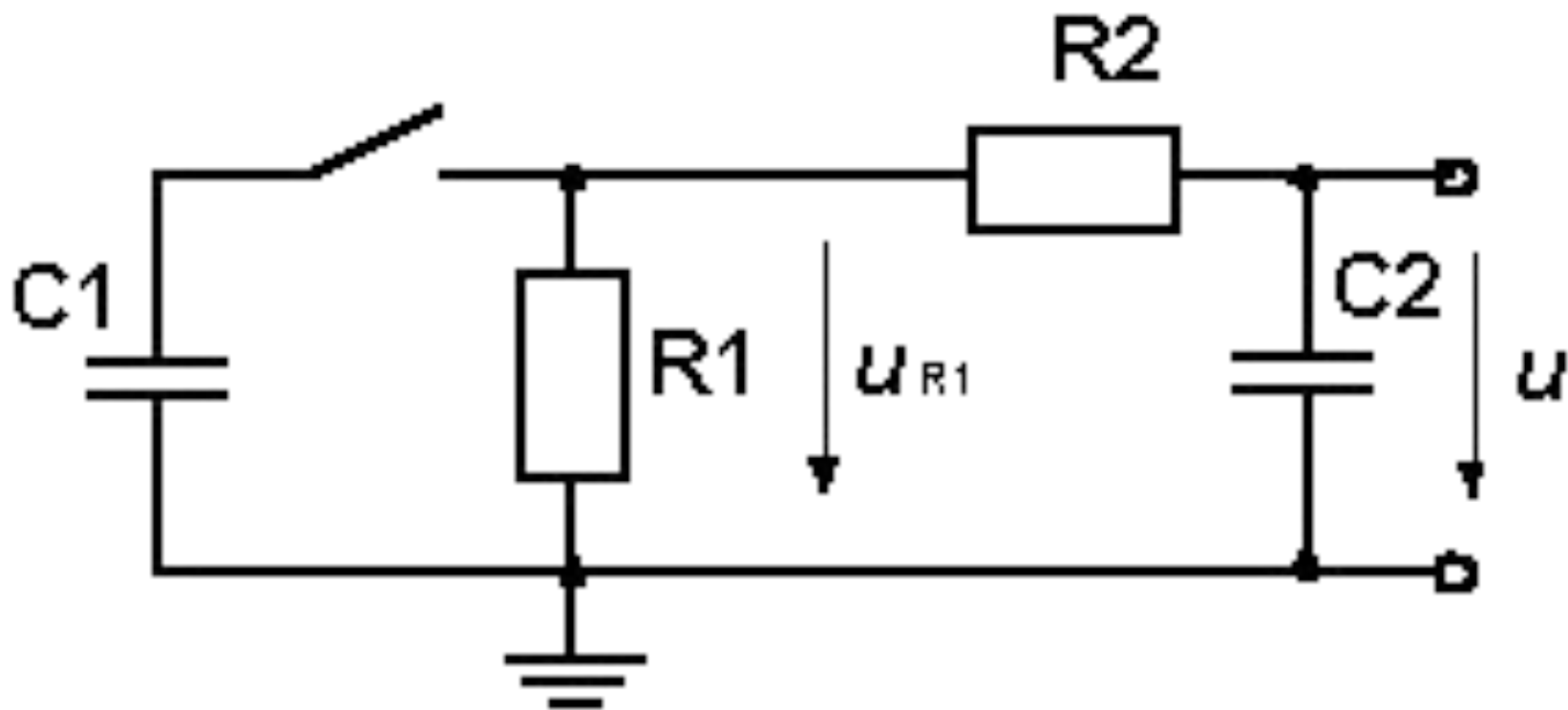
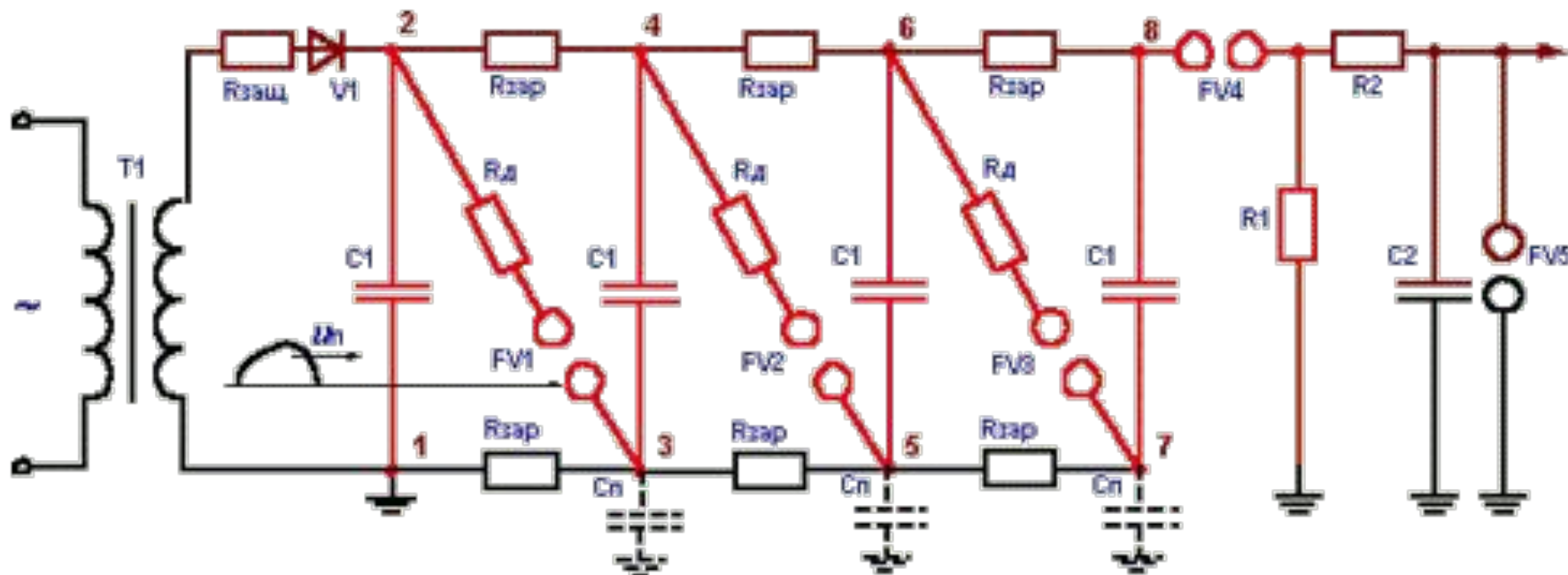


Схема одноступенчатого ГИНа



**Схема четырехступенчатого
ГИНа**

Работа схемы ГИНа:

Конденсаторы ГИН заряжаются от высоковольтного выпрямителя через зарядные резисторы $R_{зар}$ параллельно до одинакового напряжения U_0 . На промежуток FV1 подается дополнительный поджигающий импульс напряжения, так что FV1 пробивается. Потенциал точки 3 практически мгновенно становится равным U_0 , поскольку величина сопротивления резистора R_d мала и мала постоянная времени цепочки $R_d C_{п}$. Потенциал точки 4 по отношению к земле при этом равен сумме потенциала точки 3 и напряжения U_0 , а потенциал точки 5 остается нулевым, поскольку паразитная емкость $C_{п}$ не успевает зарядиться через сравнительно высокоомный резистор $R_{зар}$. Напряжение на промежутке FV2 оказывается равным $2U_0$ и промежуток FV2 пробивается, что приводит в первый момент времени к появлению напряжения $3U_0$ на промежутке FV3. Аналогично пробивается и промежуток FV4, так что все четыре конденсатора оказываются соединенными последовательно через искровые промежутки и резисторы R_d . Резистор R_d используется для демпфирования колебаний в контуре C1-FV1-СП, в котором из-за наличия индуктивностей проводов могут возникнуть затухающие колебания с большой амплитудой.

Измерение высоких постоянных напряжений

Для измерения высоких постоянных напряжений используется три основных метода:

- измерение с помощью измерительного шарового разрядника,
- измерение электростатическим вольтметром,
- измерение с помощью добавочных резисторов.

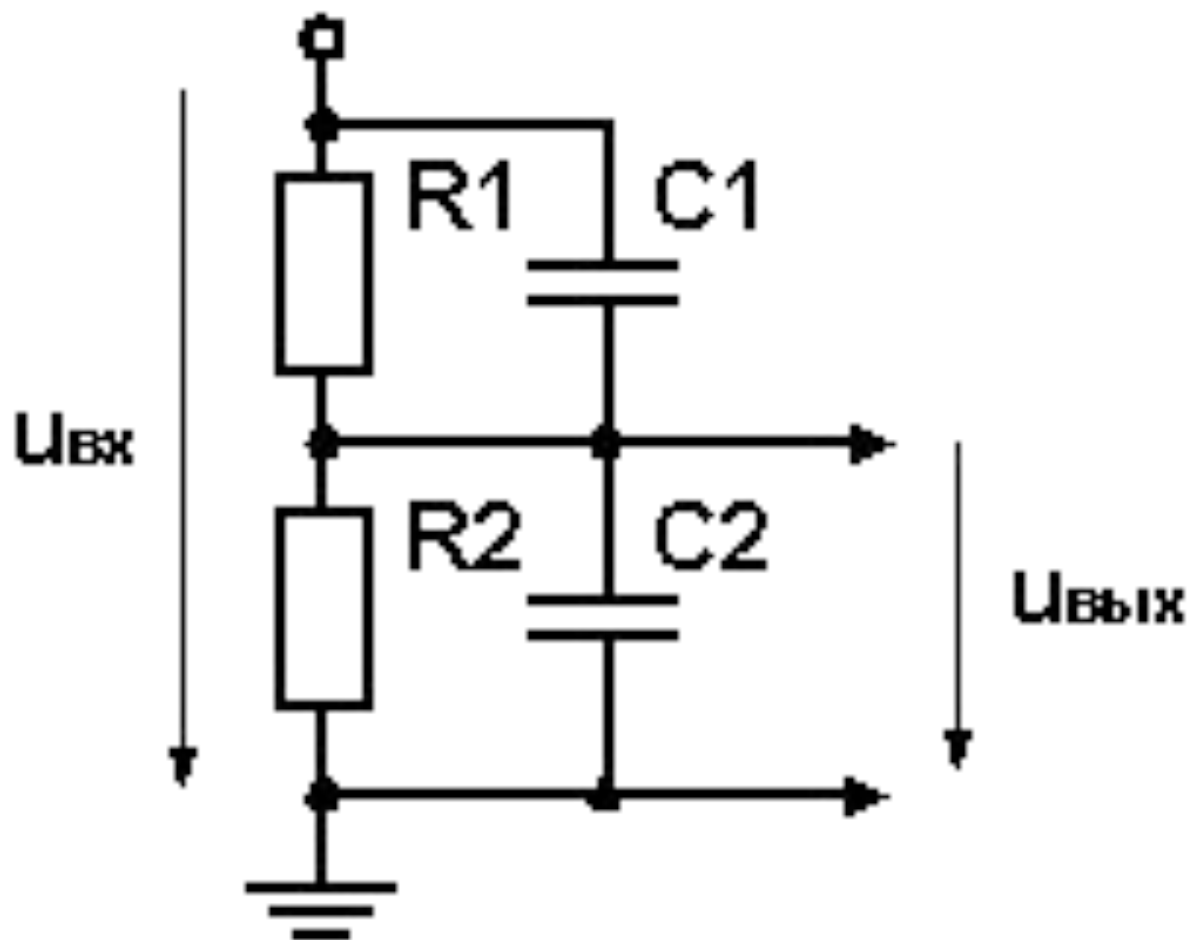
Измерение высоких переменных напряжений

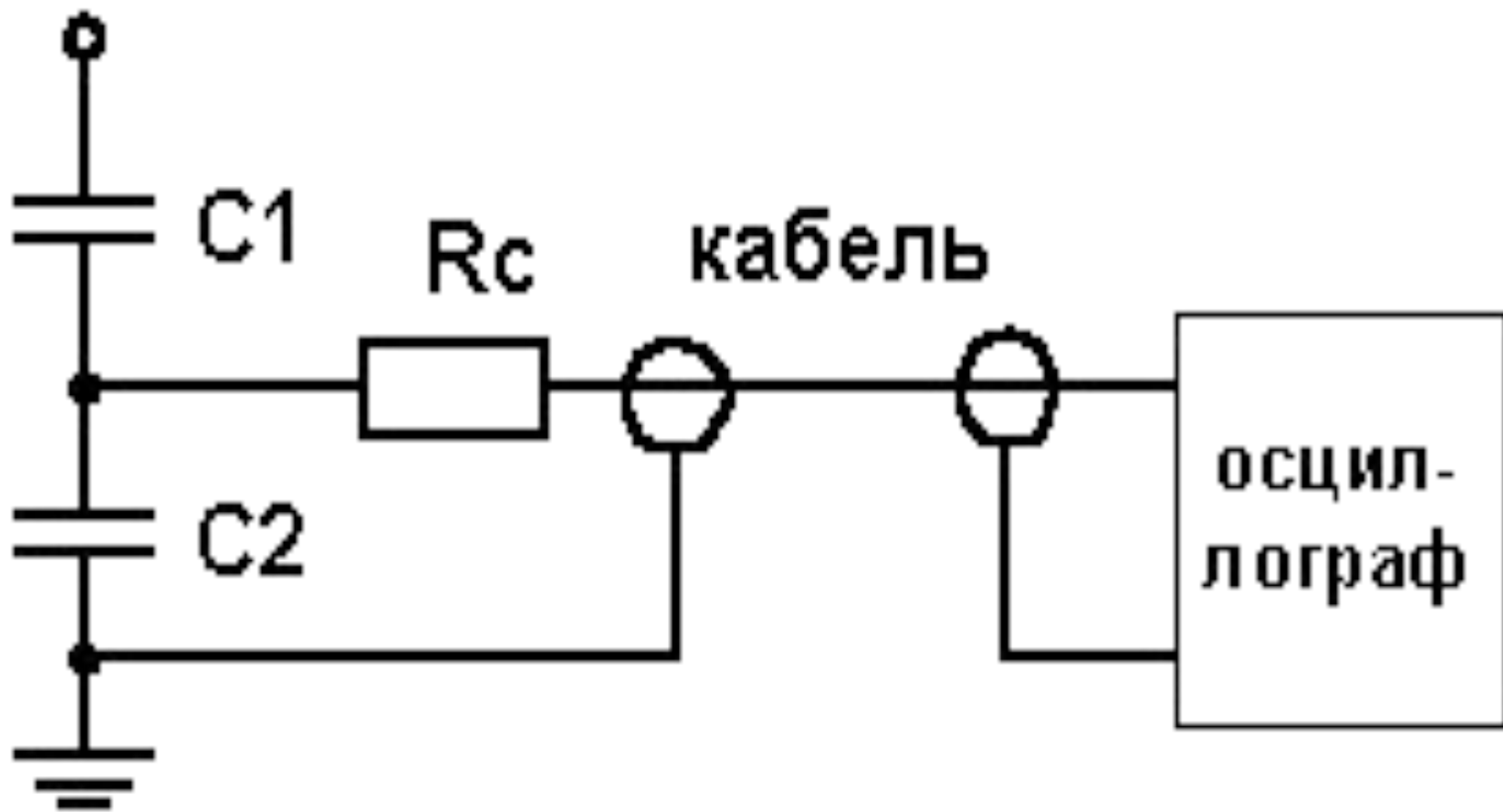
- **Измерительный шаровой разрядник** является универсальным измерительным прибором, пригодным и для измерения **амплитуды** переменного напряжения. (Методика измерений остается такой же, как и для случая измерения высокого постоянного напряжения).
- **Электростатический вольтметр** принципиально пригоден для измерения эффективного значения переменного напряжения.
- **Емкостные делители напряжения** позволяют измерять высокие переменные напряжения с помощью низковольтных вольтметров, обеспечивая точное повторение формы высокого напряжения на низковольтном выходе. Последнее требование важно в случае контроля гармонического состава переменного напряжения.
- **Омические делители** на основе резисторов на переменном напряжении **не пригодны** ввиду наличия паразитных емкостей, что требует применения резисторов со сравнительно небольшим сопротивлением и большой рассеиваемой мощностью; индуктивные делители обладают нелинейностью параметров и паразитными емкостными и омическими свойствами
- В испытательных установках переменного напряжения измерения высокого напряжения производятся путем **измерения напряжения первичной обмотки испытательного трансформатора** с пересчетом по коэффициенту трансформации

Измерение высоких импульсных напряжений

- **Измерительный шаровой разрядник** пригоден и для измерения максимального значения напряжения стандартного грозового импульса. При измерении амплитуды импульса подбирают такое расстояние между шарами разрядника, при котором из десяти поданных импульсов пять закончатся пробоем, а оставшиеся пять - нет.
- Другим способом измерения импульсных напряжений является применение **делителей напряжения с низковольтным импульсным вольтметром или осциллографом**. Делитель напряжения может быть омическим, емкостным или емкостно-омическим. Основной характеристикой делителя является коэффициент деления. Другой важной характеристикой делителя является частотная характеристика, представляющая собой зависимость коэффициента деления от частоты.

Емкостно-омический делитель напряжения





**Емкостный
делитель
напряжения**

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Перенапряжением называют всякое превышение напряжением амплитуды наибольшего рабочего напряжения. Длительность перенапряжения может составлять от единиц микросекунд до нескольких часов. Воздействие перенапряжения на изоляцию может привести к ее пробое.

Основные характеристики перенапряжения:

- **максимальное значение;**
- **кратность перенапряжения, равная отношению максимального значения перенапряжения к амплитуде наибольшего допустимого рабочего напряжения;**
- **время нарастания перенапряжения;**
- **длительность перенапряжения;**
- **число импульсов в перенапряжении;**
- **широта охвата сети;**
- **повторяемость перенапряжения.**

Классификация перенапряжений:

По месту приложения напряжения различают:

- - фазные перенапряжения;
- - междофазные перенапряжения;
- - внутрифазные перенапряжения например, между витками катушки трансформатора, между нейтралью и землей);
- - между контактами коммутационных аппаратов.

По причинам возникновения перенапряжения подразделяются на:

- **внешние** - от разрядов молнии (атмосферные перенапряжения) и от воздействия внешних источников;
- **внутренние** - возникающие при резонансных явлениях, при авариях и при коммутациях элементов электрической цепи.

Атмосферные перенапряжения

- Наиболее опасны:
- **прямые удары молнии** в оборудование (ПУМ), при которых даже на заземленных сооружениях возникают большие потенциалы.
- **Индуктированные перенапряжения** возникают вследствие индуктивной и емкостной связи канала молнии с токоведущими и заземленными частями электрической сети. Величина индуктированных перенапряжений меньше, чем при прямых ударах молнии, и они опасны только для сетей до 35 кВ при ударе молнии вблизи линии.

Внутренние перенапряжения:

- ***Квазистационарные перенапряжения***
(продолжаются от единиц секунд до десятков минут):
 - режимные,
 - резонансные,
 - феррорезонансные,
 - параметрические.
- ***Коммутационные перенапряжения***
(возникают при переходных процессах и быстрых изменениях режима работы сети: при работе коммутационных аппаратов, при коротких замыканиях и при прочих резких изменениях режима, за счет энергии, запасенной в емкостных и индуктивных элементах. Наиболее часто такие перенапряжения имеют место при коммутациях линий, индуктивных элементов, конденсаторных батарей.

-

Квазистационарные

перенапряжения:

- **Режимные перенапряжения** возникают при несимметричных коротких замыканиях на землю, а также при разгоне генератора в случае резкого сброса нагрузки.
- **Резонансные перенапряжения** имеют место при возникновении резонансных эффектов в линиях (при одностороннем питании линии), в электрических цепях при наличии реакторов.
- **Феррорезонансные перенапряжения** возникают в цепях с катушками с насыщенным магнитопроводом, что может быть как на частоте 50 Гц, так и на высших гармониках и на субгармониках. Особенностью феррорезонанса является скачкообразный вход в режим резонанса (триггерный эффект)

Защитные мероприятия

- Все мероприятия по защите от перенапряжений делятся на **две группы:**
- - **превентивные меры снижения перенапряжений;**
- - **защита оборудования с помощью защитных средств.**

Превентивные меры

Превентивные меры - это предотвращение возникновения перенапряжений или ограничение их величины в месте их возникновения.

К таким мерам относятся :

- - применение выключателей с шунтирующими резисторами;
- - применение выключателей без повторных зажигания дуги между контактами при их разведении;
- - применение грозозащитных тросов и молниеотводов;
- - заземление опор линий электропередачи;
- - емкостная защита изоляции обмоток трансформаторов и реакторов;
- - применение емкостных элементов для снижения перенапряжений.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений

Коммутационные (звщитные) средства защиты от перенапряжений срабатывают и соединяют защищаемую цепь с заземлением в случае, когда перенапряжение в точке их установки превышает некоторую критическую величину.

К этим средствам относят:

- разрядники,
- шунтирующие реакторы с искровым соединением,
- нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

Заземления

- Различают три основных типа заземлений:
- **рабочее заземление**, используемое для создания необходимого распределения напряжений и токов в нормальных и аварийных режимах работы сети;
- **защитное заземление**, служащее для защиты персонала от напряжения, возникающего на корпусах оборудования при повреждении изоляции или вследствие влияний;
- **грозозащитное заземление**, предназначенное для защиты от внешних перенапряжений.

Заземляющее устройство

состоит из заземляющих электродов (заземлителя) и соединительных проводов

Основной характеристикой заземляющего устройства является его *сопротивление*, определяемое как отношение потенциала на зажиме заземлителя к току, стекающему через заземлитель. Потенциал определяется по отношению к удаленной точке земли. Сопротивление заземлителя зависит от конструкции и размеров, удельного сопротивления земли, а также от величины и формы стекающего с него тока.

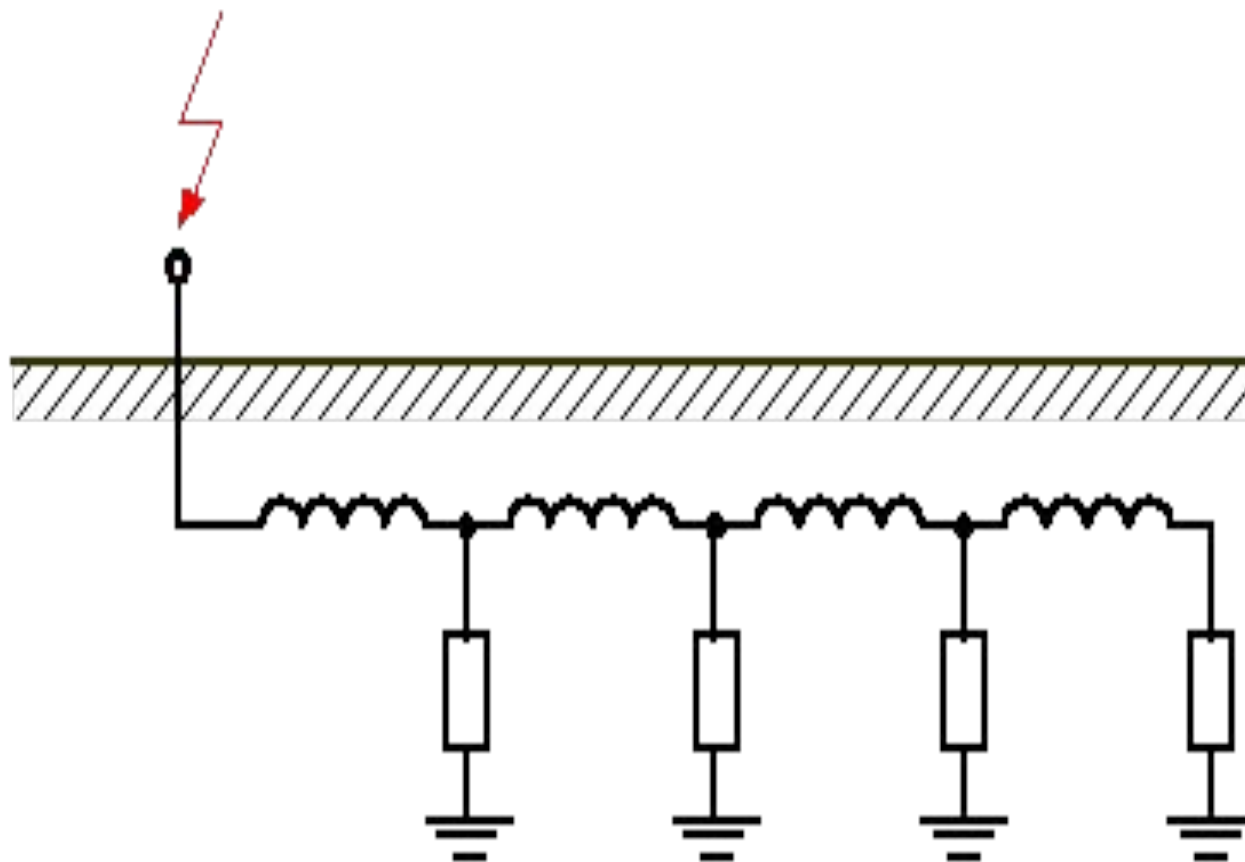


Схема замещения протяженного
заземлителя

Для прогноза атмосферных перенапряжений и обоснованного выбора средств защиты необходимо иметь информацию по двум направлениям:

- о возможном количестве разрядов молнии в защищаемое оборудование или вблизи него;
- о токах в разряде молнии.

Молния представляет собой электрический разряд между объемным зарядом в облаке и землей (**наземные разряды**) или между двумя заряженными областями (**межоблачные и внутриоблачные разряды**).

Молнии предшествует ***процесс разделения и накопления*** электрических зарядов в облаках, происходящий из-за мощных восходящих воздушных потоков и интенсивной конденсации в них водяных паров.

Разряд молнии в возвышенный объект сопровождается образованием встречных лидеров, развивающихся с возвышенных мест объекта - в случае линии с опоры, с грозозащитного троса и с фазных проводов. Место удара молнии определяется наиболее развившимся встречным лидером.

Для линии электропередачи различают следующие случаи поражения:

- удар молнии в провод с последующим перекрытием с провода на опору или между проводами;
- удар молнии в вершину опоры с последующим перекрытием с опоры на провод;
- удар молнии в пролет троса с последующим перекрытием с троса на провод или на землю.

Главную опасность для линии представляет прямой удар молнии в фазные провода с последующим перекрытием изоляции от возникающих при этом перенапряжений. По месту перекрытия возникает дуга за счет рабочего напряжения линии с необходимостью отключения короткого замыкания

Молниеотводы

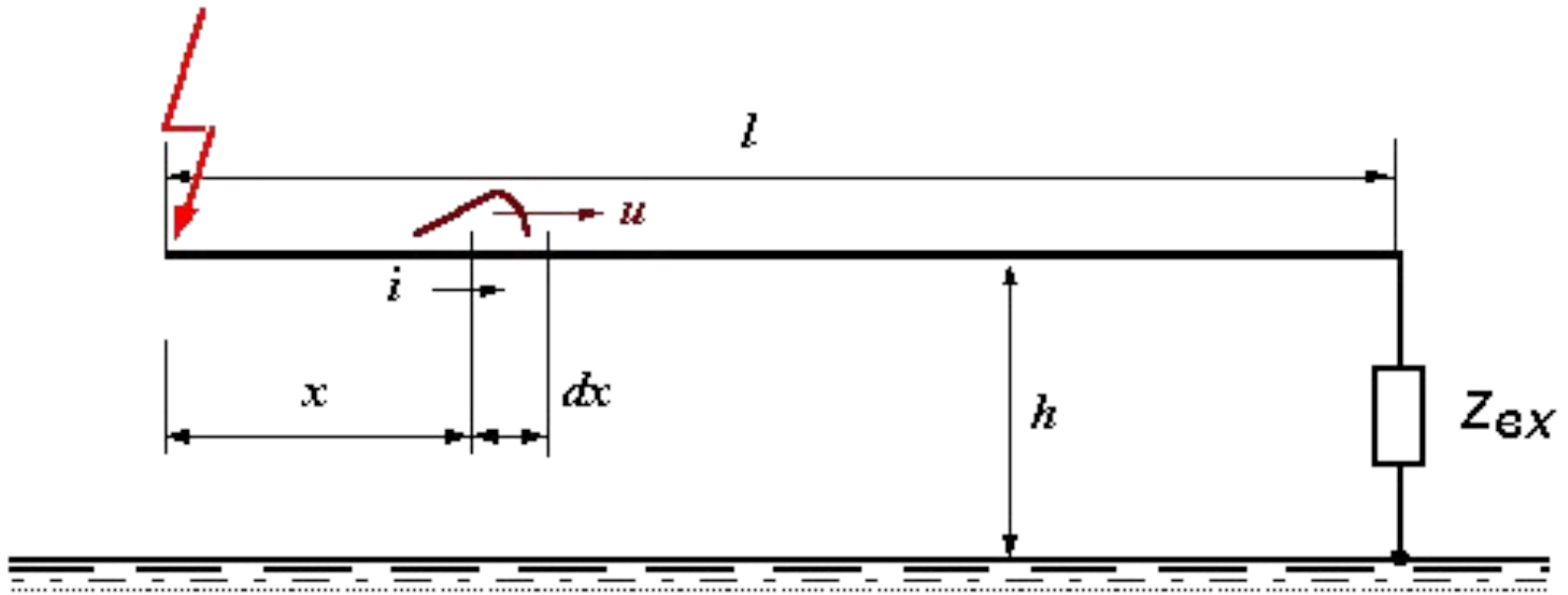
Стержневые

- Трубчатые (высота до 10 метров); устанавливаются на зданиях, на различных конструкциях подстанций и т.п.;
- Составные (высота около 40 метров); располагаются отдельно и обычно имеют составную ферму.

Тросовые

В виде двух стальных проводов, протянутых над рабочими проводами.

(Защитная зона между двумя тросами возрастает в следствие их взаимного влияния).



Распространение волны перенапряжения по проводу линии

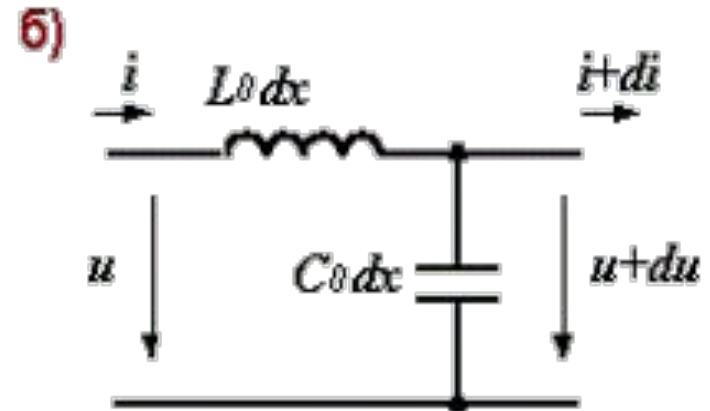
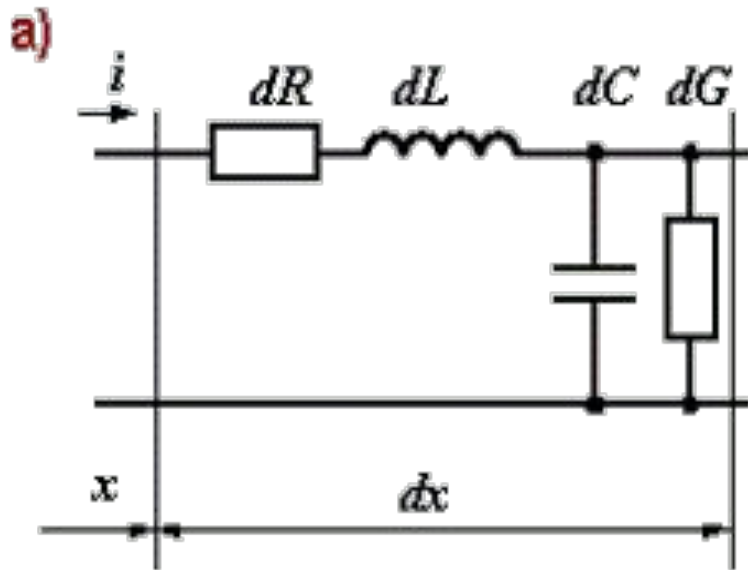


Схема замещения участка
линии длиной dx

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

$$Z_B = \frac{1}{C_0 v} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

Волновое сопротивление линии

Двухпроводная контактная подвеска с гирляндами тарельчатых изоляторов имеет значения параметров:

$$L_0 < = 1,2 \text{ мГн/км},$$

$$C_0 < = 0,014 \text{ мкФ/км},$$

и волновое сопротивление $Z_B = 300 \text{ Ом}$,

скорость распространения волны $v = 240\text{-}270 \text{ м/мкс}$, т.е. несколько меньше скорости света из-за конечной проводимости земли.

При подключении усиливающего провода $L_0 = 0,8 \text{ мГн/км}$,
 $Z_B = 225 \text{ Ом}$.

Силовые кабели имеют значительную емкость и малую индуктивность линии, и для них

$$Z_B = 5\text{-}30 \text{ Ом},$$

$$v = 150\text{-}200 \text{ м/мкс}.$$

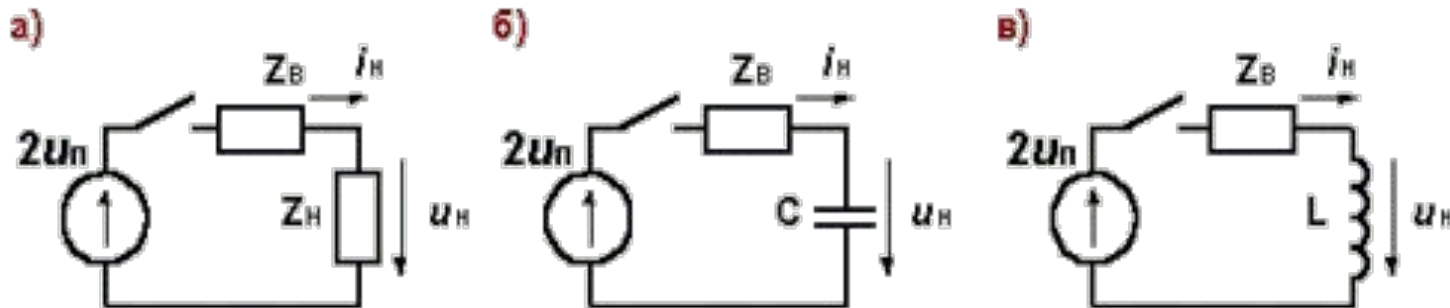


Схема замещения линии при падении волны напряжения на нагрузку

$$2u_n = u_n + u_n \frac{Z_B}{R_N}$$

Напряжение на нагрузке может быть в пределах от $2u_n$ до нуля. Форма напряжения на нагрузке повторяет форму падающей волны, а наибольшее напряжение получается при отсутствии нагрузки в конце линии или при большом входном сопротивлении нагрузки.

Отсутствие нагрузки линии, небольшая емкостная нагрузка линии или большая индуктивная нагрузка приводят к удвоению падающей волны грозового перенапряжения на конце линии.

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Коэффициент преломления
волны перенапряжения

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Коэффициент отражения
волны перенапряжения

Импульсные процессы в обмотках трансформаторов

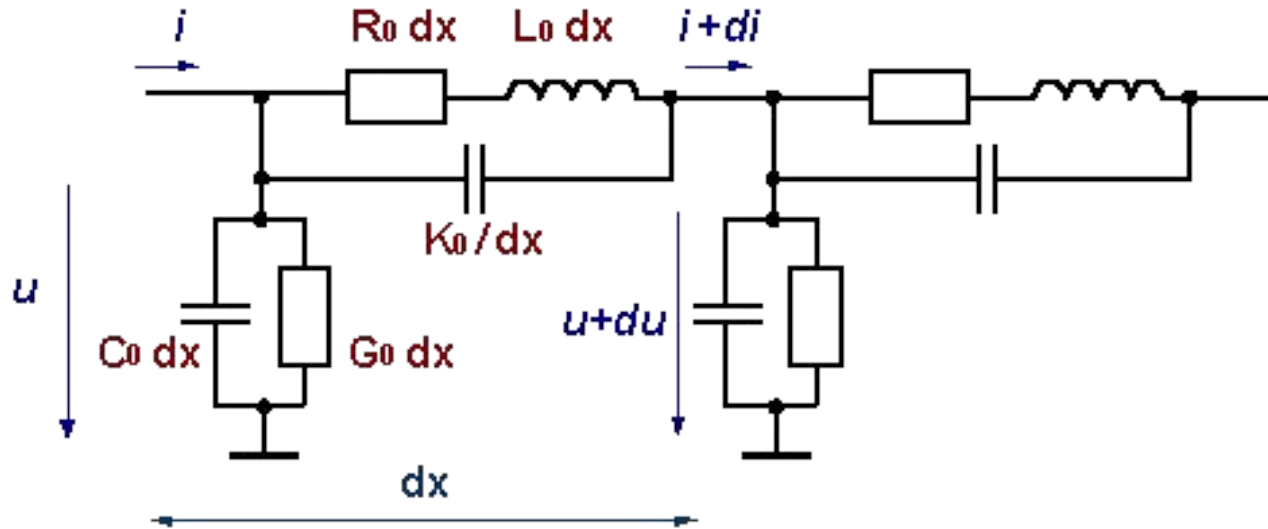
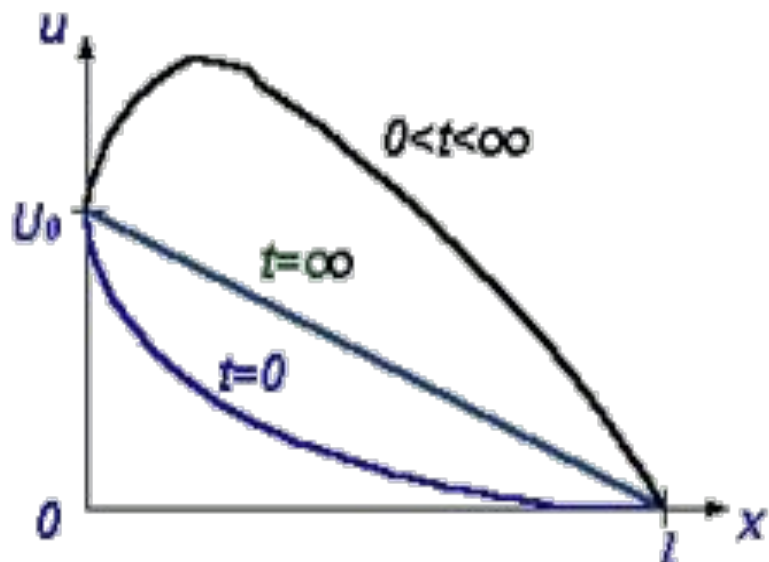


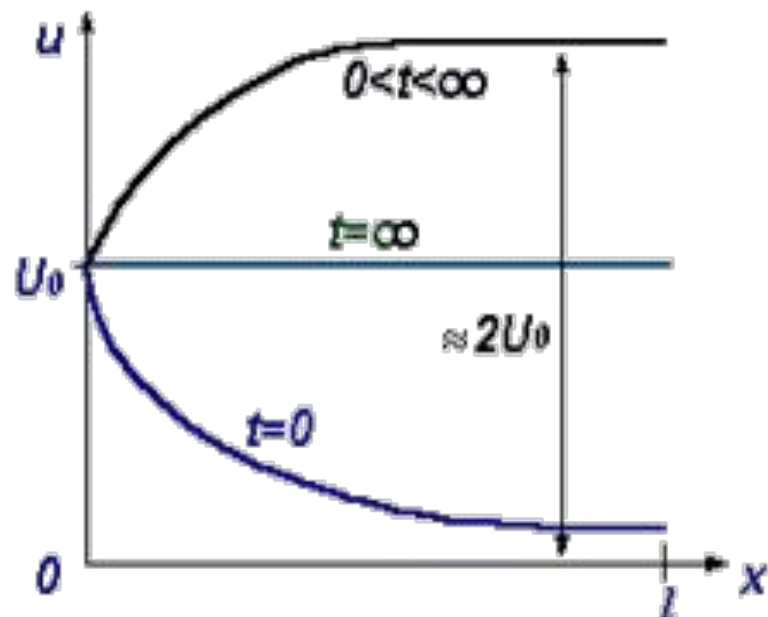
Схема замещения обмотки трансформатора

В этой схеме K_0 - емкость между соседними витками на единицу длины, $\Phi \cdot \text{м}$, C_0 - емкость между витками и сердечником на единицу длины, $\Phi/\text{м}$.

а)



б)



Распределение напряжения на главной изоляции трансформатора:

- а) при заземленной нейтрали;
- б) при изолированной нейтрали.

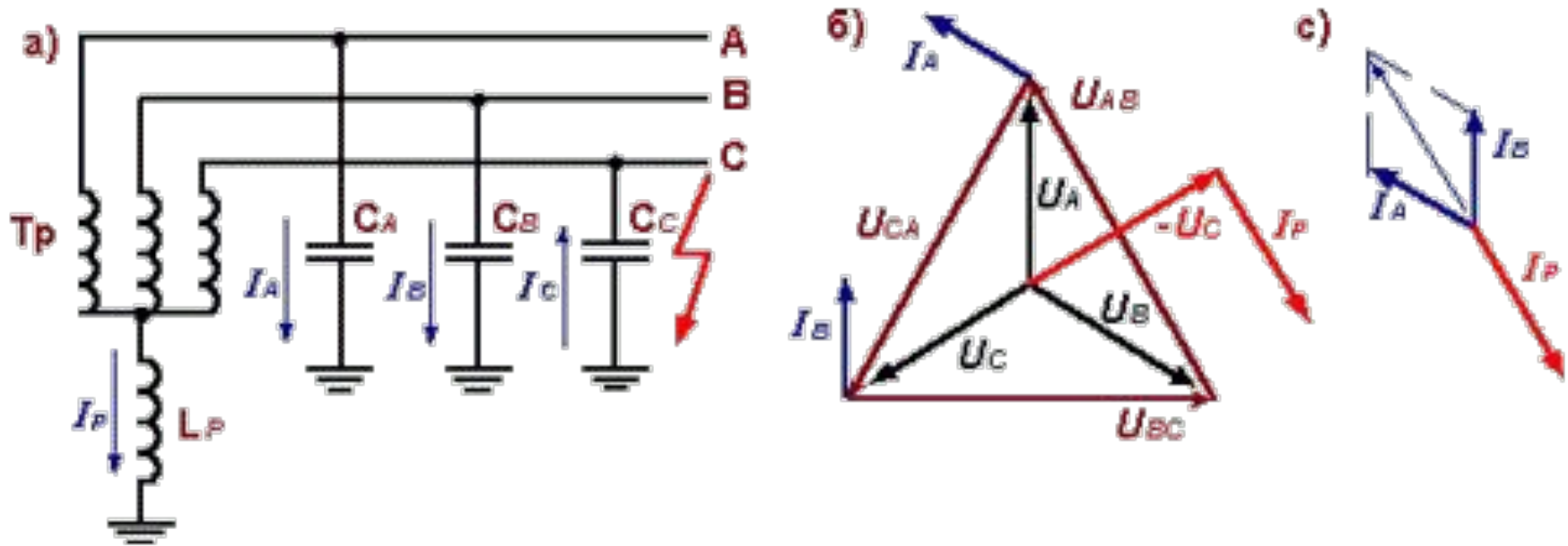
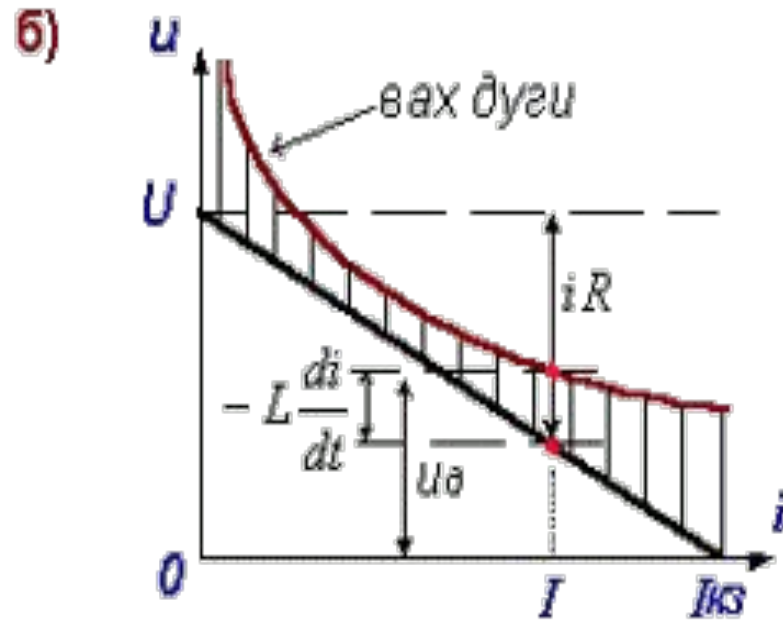
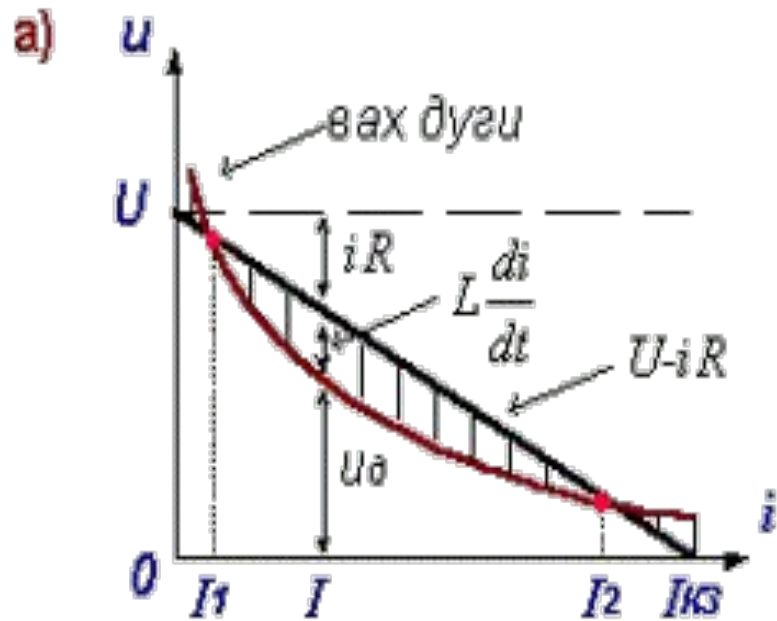


Схема включения дугогасящего реактора (а),
 векторная диаграмма напряжений (б) и сумма токов (в)

Перенапряжения при гашении дуги

Большинство коммутаций в цепях высокого напряжения сопровождаются возникновением **электрической дуги**. **Электрическая дуга** представляет собой вид электрического разряда, характеризующийся большой плотностью тока и термической ионизацией молекул газа. Скорость снижения тока при гашении дуги определяет возникающие перенапряжения в сети.



Вольтамперная характеристика устойчивой (а) и неустойчивой (б) электрической дуги

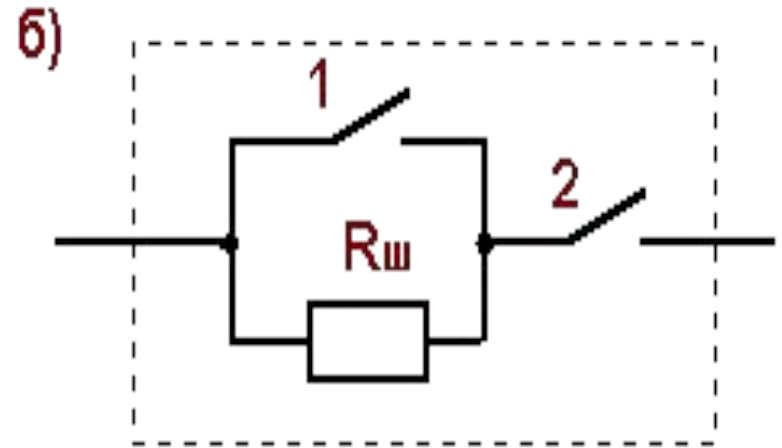
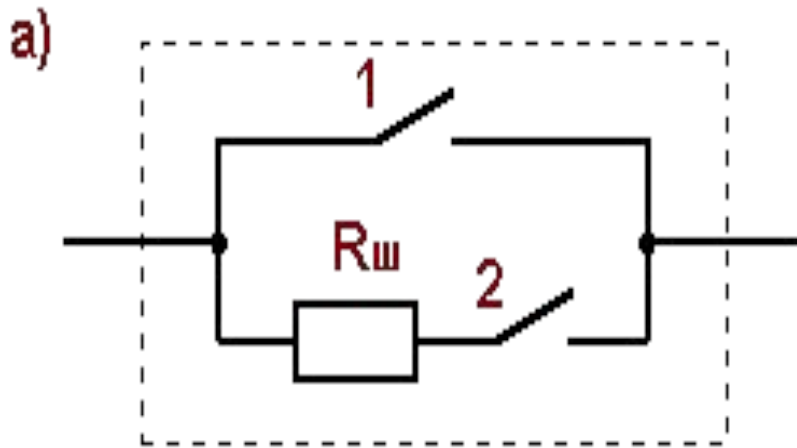
Коммутационные перенапряжения

Коммутационные перенапряжения возникают при *включении или отключении ненагруженной линии*, при этом на квазистационарное перенапряжение за счет емкостного эффекта накладываются затухающие колебания на емкости и индуктивности линии, частота которых зависит от длины линии.

Для снижения этого типа перенапряжений используют следующие меры:

- шунтирующие резисторы с двухступенчатым включением, сначала с резистором сопротивлением 600-1200 Ом, а затем через 10-20 мс шунтирование этого резистора;
- применение выключателей, позволяющие выбирать наиболее благоприятный момент включения;
- использование вентильных разрядников и ОПН для ограничения перенапряжений;
- секционирование линий на участки длиной не более 250-300 км

Схемы выключателя с шунтирующим резистором



Отключение ненагруженного трансформатора (и любого другого индуктивного элемента)

Отключение сопровождается возникновением при срезе тока выключателем затухающих колебаний большой амплитуды в контуре «индуктивность трансформатора – емкость цепи».

Возникающие при этом повторные зажигания дуги в выключателе ограничивают возникающие перенапряжения, однако при большом количестве повторных зажиганий больше и перенапряжения (могут достигнуть четырех амплитуд рабочего напряжения и более).

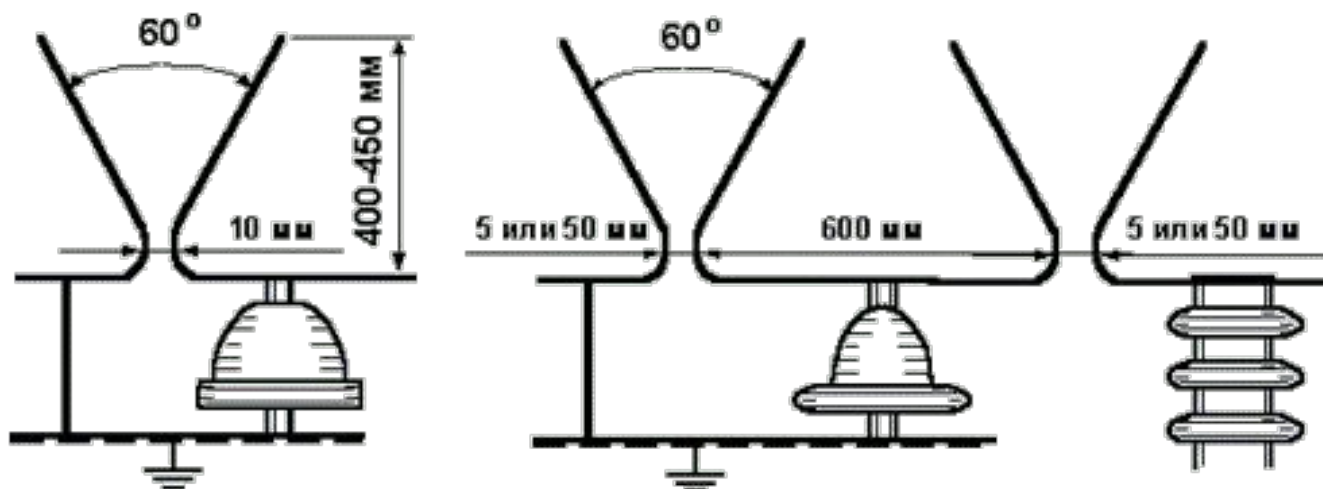
Разрядники или ОПН, устанавливаемые на трансформаторном присоединении, ограничивают эти перенапряжения.

Высоковольтные разрядники и ограничители перенапряжений (ОПН)

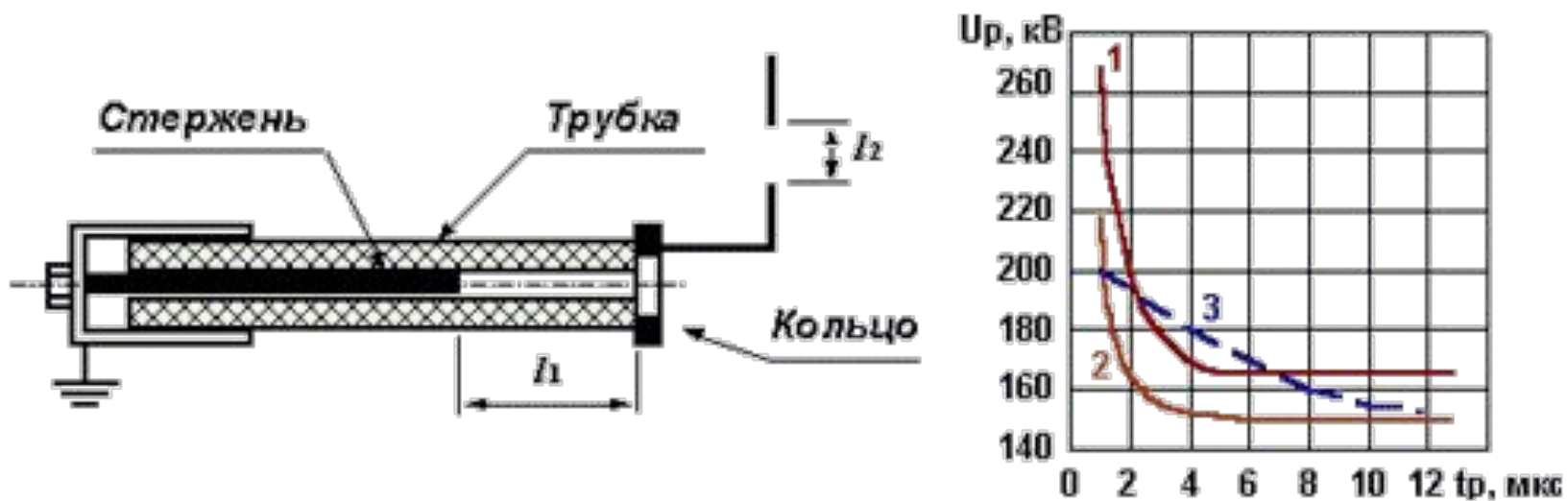
Высоковольтные разрядники

подразделяются на три группы:

- искровые разрядники;
- трубчатые разрядники ;
- вентильные разрядники.

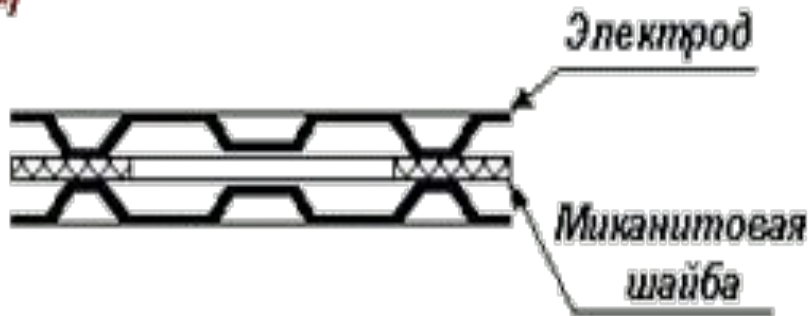


**Роговые разрядники,
применяемые на контактной сети**

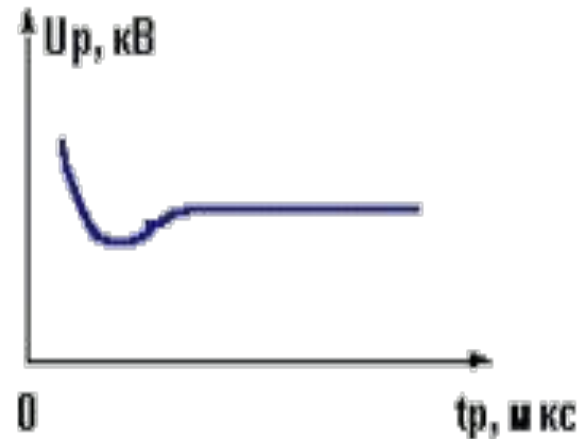


**Устройство трубчатого разрядника и
вольт-секундные характеристики
разрядника РТФ-35/0.8-5 при $l_2=60$ мм (1),
 $l_2=40$ мм (2), рогового разрядника 2x50 мм (3)**

а)



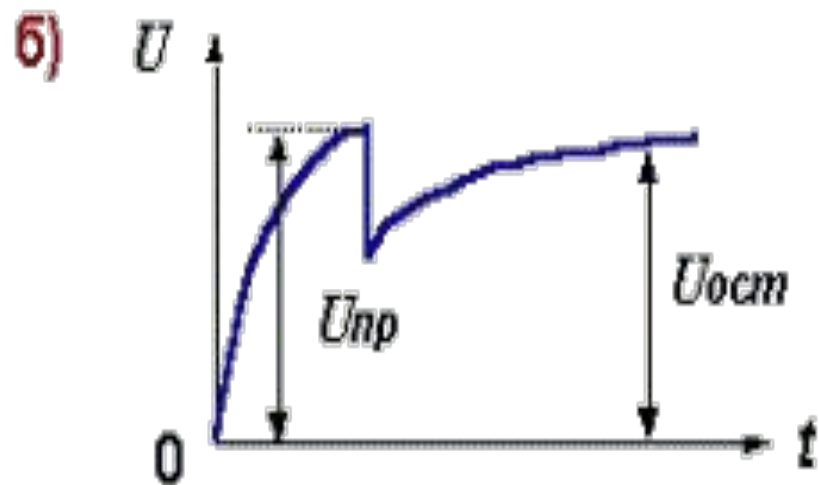
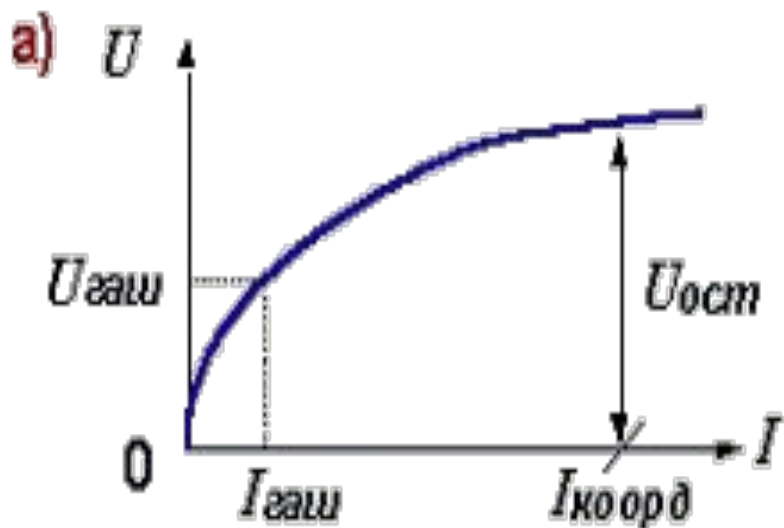
б)



Единичный искровой промежуток с неподвижной дугой (а) и вид вольт-секундной характеристики разрядника с многократным искровым промежутком (б)

***Группа характеристик* вентильного разрядника, определяющая его защитную функцию, составлена следующими характеристиками:**

- номинальное напряжение;**
- наибольшее допустимое длительное напряжение на разряднике;**
- пробивное напряжение на частоте 50 Гц (обычно действующее значение);**
- остающееся напряжение на сопротивлении резистора при определенном импульсном токе (от 5 до 14 кА, в зависимости от типа разрядника), называемом током).**



**Вольтамперная характеристика резистора
вентильного разрядника (а) и напряжение на
вентильном разряднике при его срабатывании (б)**

Функция отключения характеризуется напряжением гашения - это наибольшее напряжение промышленной частоты на разряднике, при котором надежно обрывается сопровождающий ток (ток гашения).

Еще одной характеристикой разрядника является его **пропускная способность**, то есть минимальное количество нормированных импульсов тока, который разрядник должен выдержать без существенного изменения его свойств. Это количество обычно равно 20.

Таким образом, и защитная функция, и отключение короткого замыкания

определяется как иккервм промежутокм

Ограничители перенапряжений (ОПН)

- Основным недостатком вентильного разрядника является сравнительно **невысокая нелинейность** резисторов на основе карбида кремния. Значительно большей нелинейностью обладают резисторы на основе окиси цинка.
- Выполненные на их базе ОПН позволяют ограничивать коммутационные перенапряжения на уровне $(1,65-1,8) U_{\phi}$ а грозových - на уровне $(2,2-2,4)U_{\phi}$.
- **Высоконелинейные оксидно-цинковые резисторы** выпускаются в виде дисков диаметром от 28 до 85 мм. ОПН выполняется путем последовательного и параллельного включения таких резисторов. При рабочем напряжении через одну параллельную колонку резисторов протекает ток в доли миллиампера, и необходимость в искровом промежутке отпадает.

Защитная функция ОПН

Защитная функция ОПН характеризуется величиной остающегося напряжения при определенной величине протекающего тока коммутационного или грозового перенапряжения.

Понятия напряжения гашения у ОПН нет, однако есть наибольшее рабочее напряжение ОПН, выше которого может произойти разогрев и разрушение ОПН. Кроме того, ОПН характеризуют величиной номинального напряжения, которая указывается в маркировке ОПН.

Основные принципы грозозащиты линий и контактной сети

- Высокую надежность грозозащиты воздушных линий электропередачи обеспечивают следующие мероприятия:
 - - подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты;
 - - снижение импульсного сопротивления опор;
 - - повышение импульсной прочности изоляции линий и снижение вероятности установление дуги (в частности, этому способствует использование деревянных траверс и опор);
 - - применение изолированной нейтрали или дугогасящего реактора;
 - - использование автоматического повторного включения линий.

Грозозащита контактной сети

- Грозозащита ~~контактной сети~~ электрифицированной железной дороги имеет ряд особенностей по сравнению с линиями электропередачи.
- Прямые удары молнии в контактную сеть всегда приводят к **перекрытию изоляции**, и защита от таких перекрытий экономически нецелесообразна, поэтому принимают меры к предотвращению длительного протекания через место перекрытия сопровождающего тока короткого замыкания путем отключения фидера и АПВ.
- Для защиты изоляции контактной сети от атмосферных и коммутационных перенапряжений применяются **разрядники** (роговые, трубчатые, вентильные) и **ОПН**.

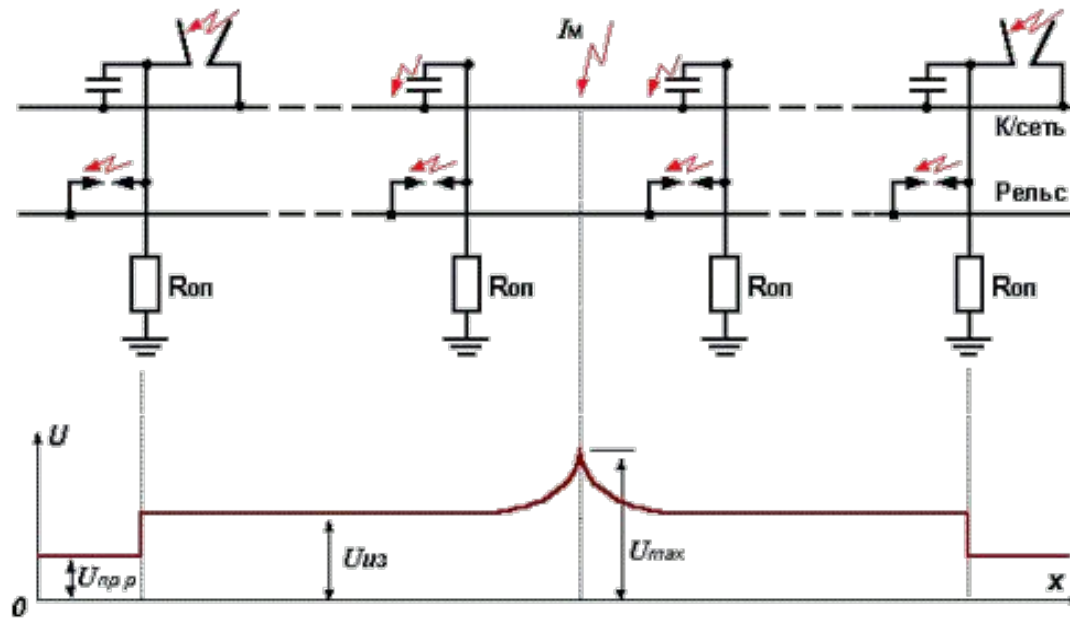
Контактные сети постоянного тока

- ***На контактной сети постоянного тока*** роговые разрядники или ОПН устанавливаются:
 - - у анкеровок проводов контактной сети;
 - - на неизолирующих и изолирующих сопряжениях контактной сети;
 - - у искусственных сооружений при анкеровках контактной сети;
 - - на питающих линиях у мест присоединения к контактной сети.

Контактные сети переменного тока

- ***На контактной сети переменного тока*** роговые разрядники или ОПН устанавливают:
 - - с обеих сторон у изолирующих сопряжений и нейтральных вставок;
 - - у мест присоединения по каждому пути автотрансформаторных пунктов 2х25 кВ;
 - - у отсасывающих трансформаторов;
 - - на конце консольных участков контактной сети, состоящих из двух или более анкерных участков;
 - - у мест присоединения питающих линий к контактной сети (при наличии на фидерах тяговой подстанции ОПН-25 разрядники не устанавливают);
 - - в местах, подверженных частым грозовым разрядам, у анкерных проводов контактной сети по решению службы электроснабжения железной дороги.

Ограничение распространения перенапряжения вдоль контактной сети



ОПН к контактной сети подключают через роговой разрядник с одинарным воздушным промежутком 10мм - для постоянного тока и 80мм -- для переменного тока, зашунтированным плавкой вставкой.

Разрядники позволяют ограничить распространение максимальных напряжений вдоль контактной сети и предотвращают появление электрической дуги на изоляторах в месте удара молнии, поскольку после пробоя разрядников источники рабочего напряжения оказываются замкнутыми через разрядники на землю. Максимальные перенапряжения возникают внутри участка между перекрытыми опорами, а вне зоны, ограниченной разрядниками, уровень перенапряжения ограничен уровнем напряжения срабатывания разрядников.