

# 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

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление;

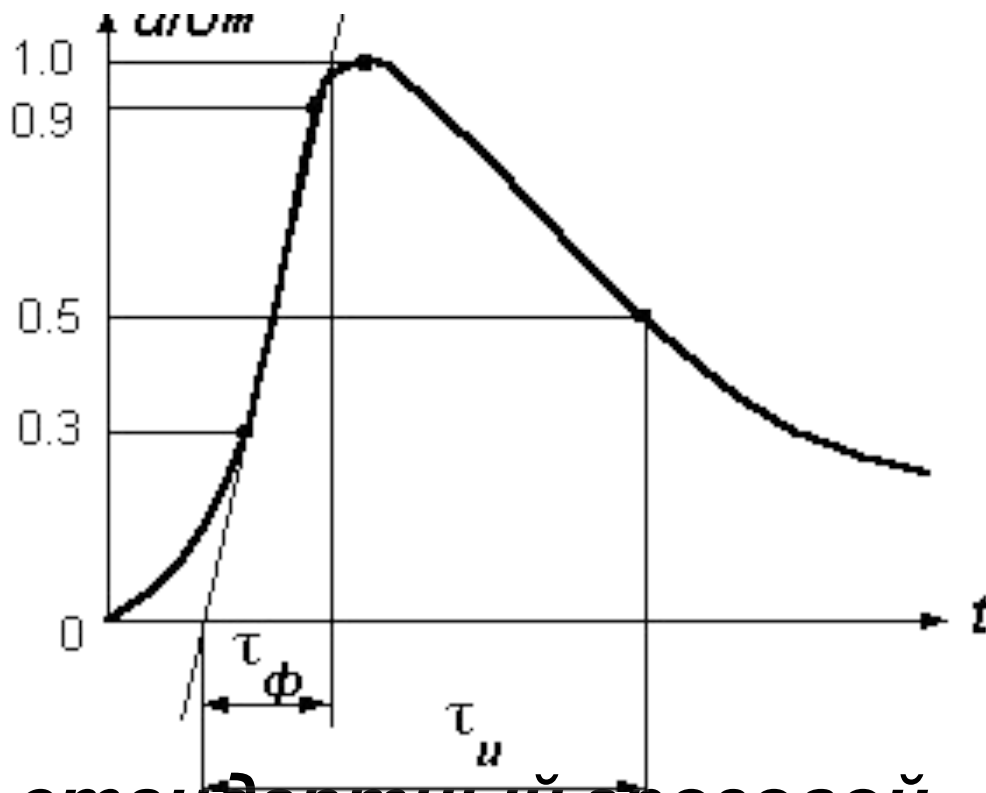
$\mu$  – относительная магнитная проницаемость;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

$\delta$  - угол потерь (магнитных или диэлектрических).

$\lambda$  - длина волны;

- $\tau$  – постоянная времени.



## **стандартный грозовой импульс**

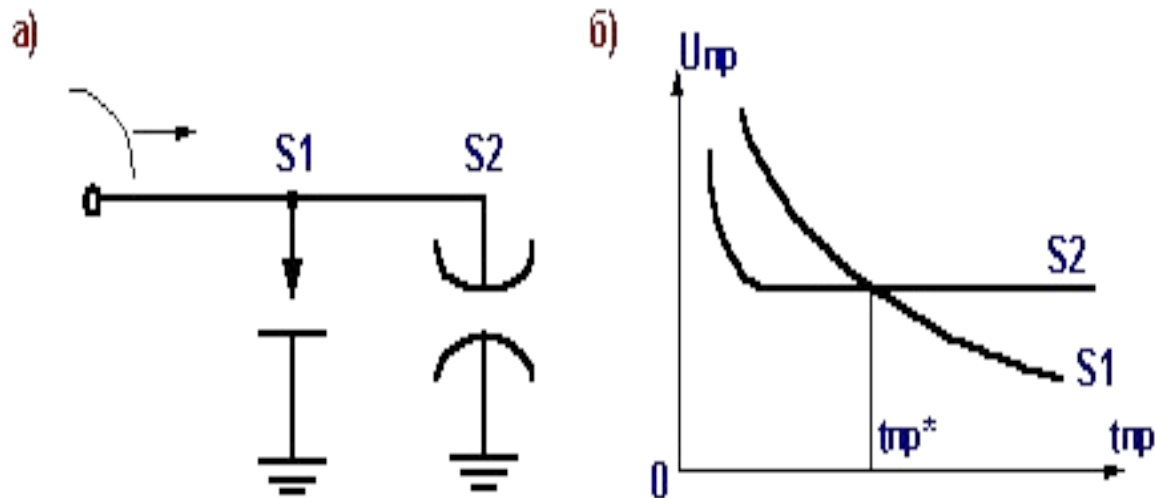
ГОСТ 1516.2-97 определяет время нарастания импульса напряжения и длительность импульса. Для выделения наиболее значимой части импульса на его фронте проводят прямую линию через точки, соответствующие 0,3 и 0,9 амплитуды импульса и по пересечению этой линией оси абсцисс и линии максимального значения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

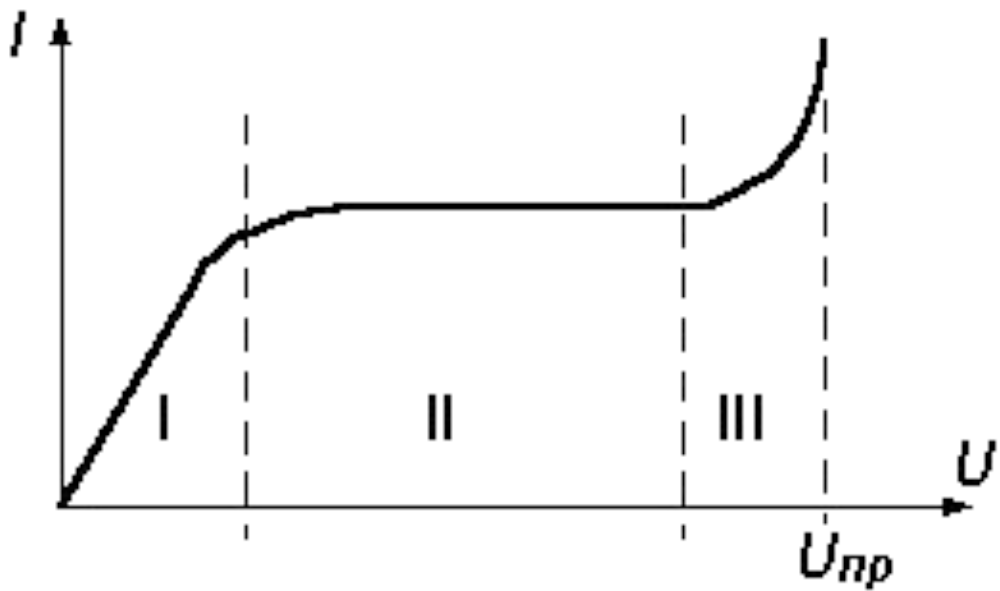
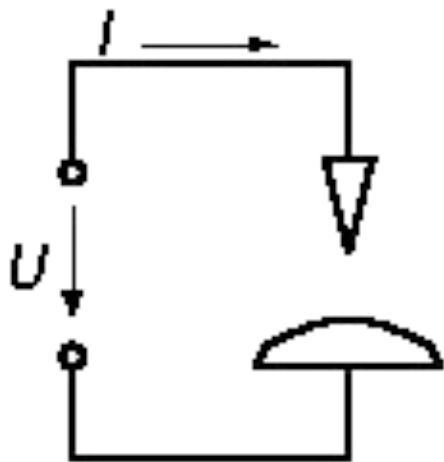
# Виды токов в изоляции

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

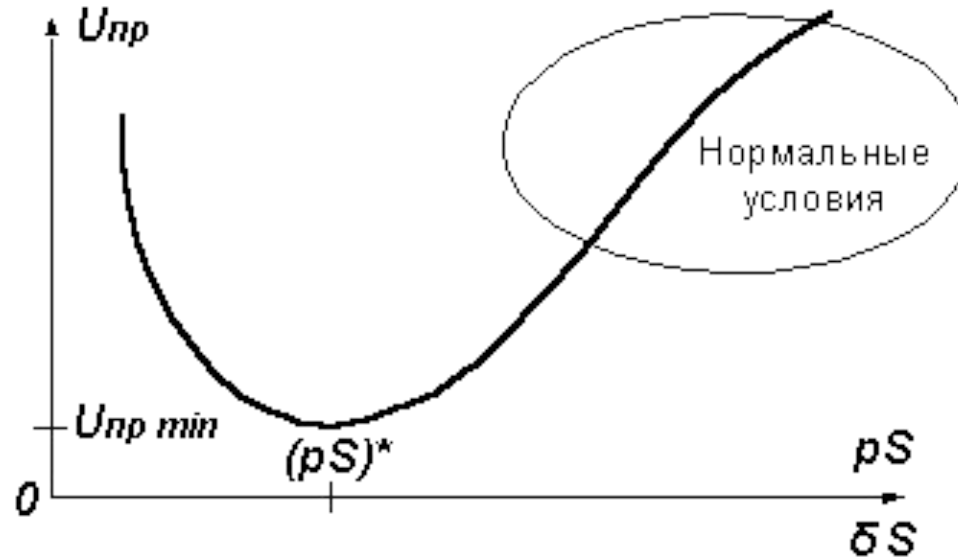
В газовых изоляционных промежутках при небольших напряжениях выполняется закон Ома, область при повышении напряжения наступает насыщение, при котором все генерируемые внешними ионизаторами заряженные частицы достигают электродов и роста тока при росте напряжения не происходит (область, плотность тока при этом составляет примерно  $10^{-15}$  А/м<sup>2</sup> 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

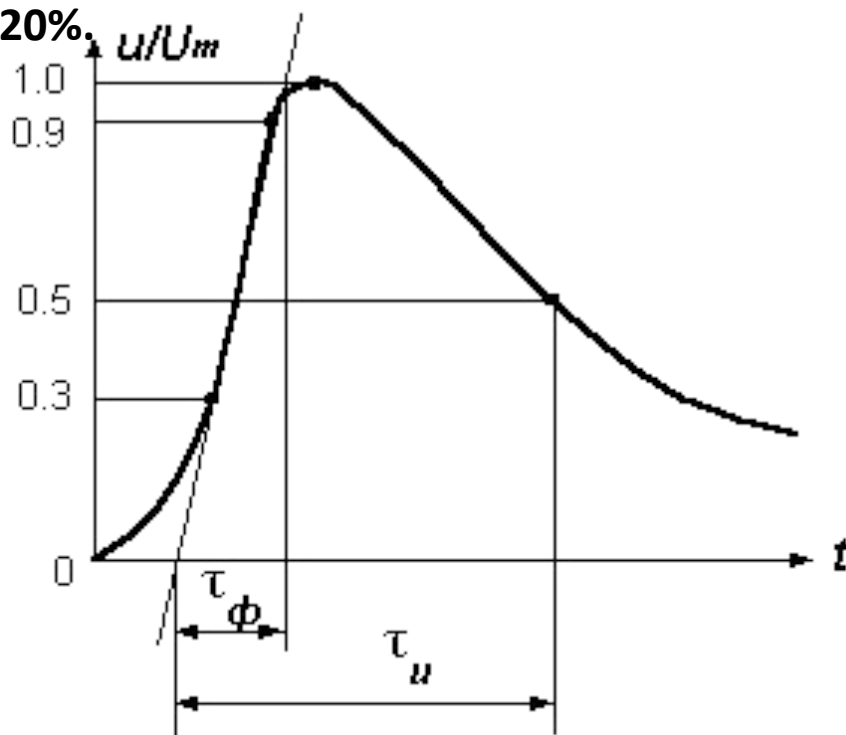
- **Любая изоляция нагревается** при приложении к ней напряжения. Причиной нагрева являются сквозные токи через изоляцию, нагрев за счет замедленных видов поляризации, ионизация газовых включений в твердой изоляции и неоднородность структуры изоляции.
- **Диэлектрическими потерями** называют мощность 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  $90^\circ$  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  $\delta$  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  $\tau_{\phi}$ , 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 разнопотенциальных 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  $45^\circ$  к вертикали, при напряжении частотой 50 Гц (эффективное значение напряжения);

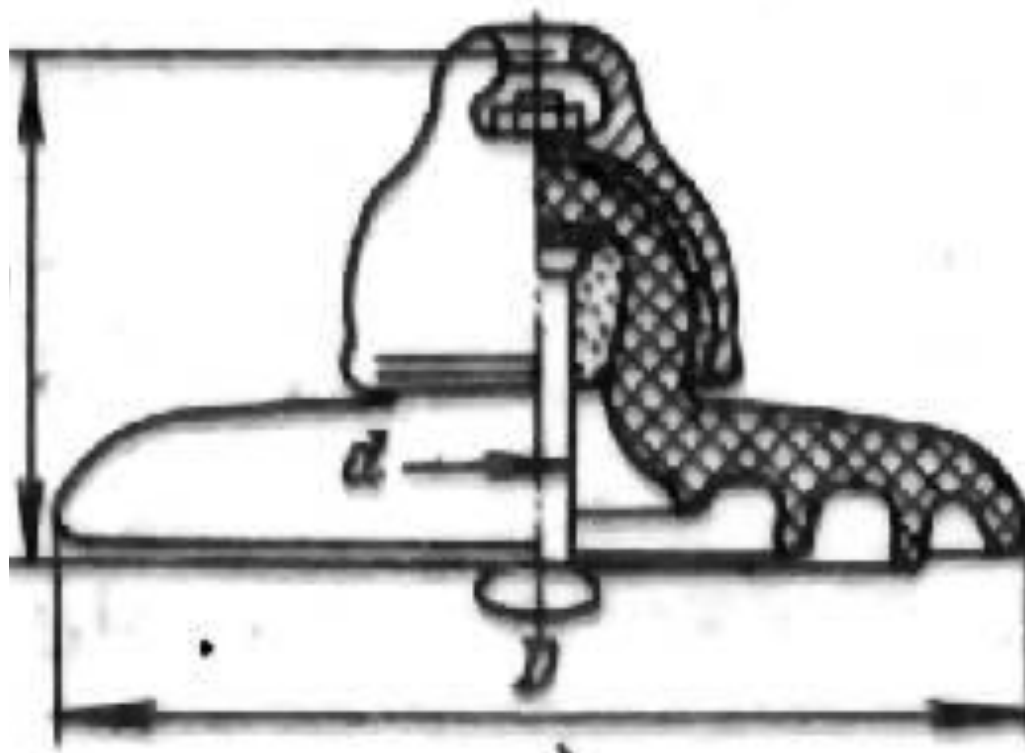
**импульсное разрядное напряжение  $U_{имп}$**  - пятидесятипроцентное напряжение перекрытия стандартными грозowymi импульсами (амплитуда импульса, при которой из десяти поданных на изолятор импульсов пять завершаются перекрытием, а оставшиеся пять не приводят к перекрытию);

**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:

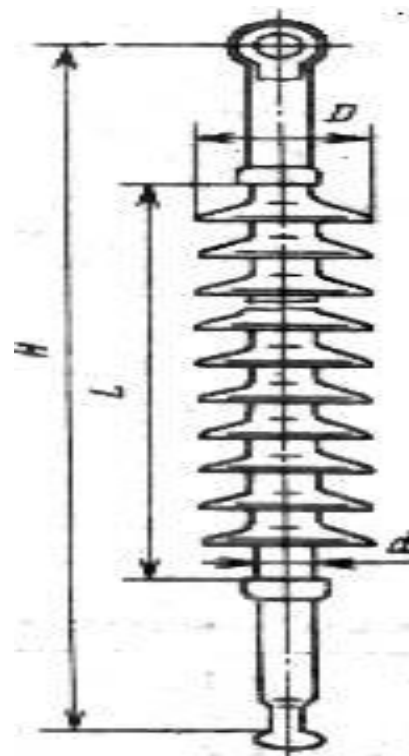
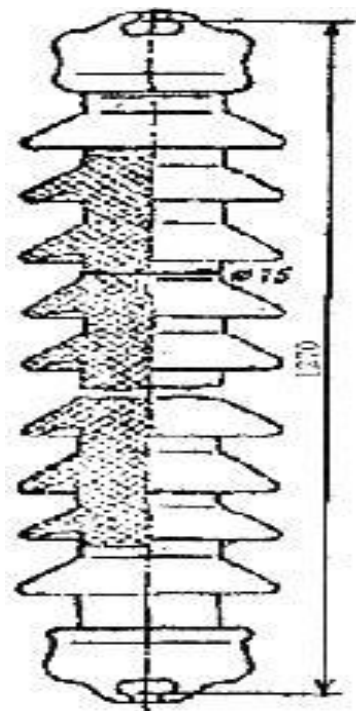
- **строительная высота  $H_c$** , то есть габарит, который изолятор занимает в конструкции после его установки; у некоторых изоляторов, например, у тарельчатых подвесных, строительная высота меньше реальной высоты изолятора;
- **наибольший диаметр  $D$**  изолятора;
- **длина пути утечки** по поверхности 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  $45^\circ$  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

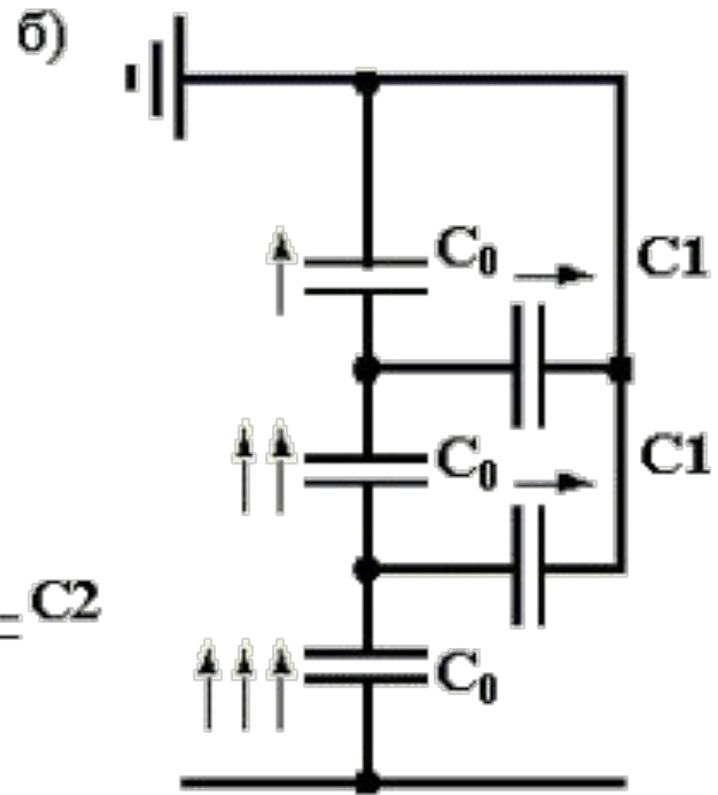
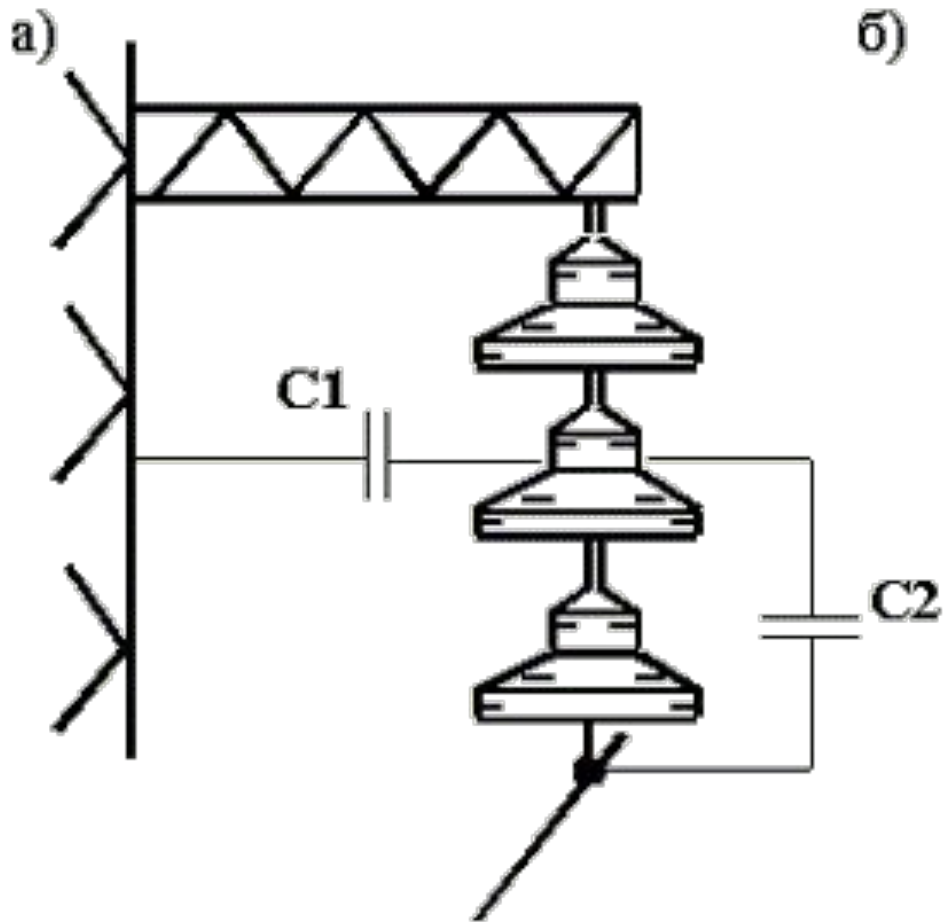


## Изолятор ШФ-10В

- **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 см<sup>2</sup> 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.

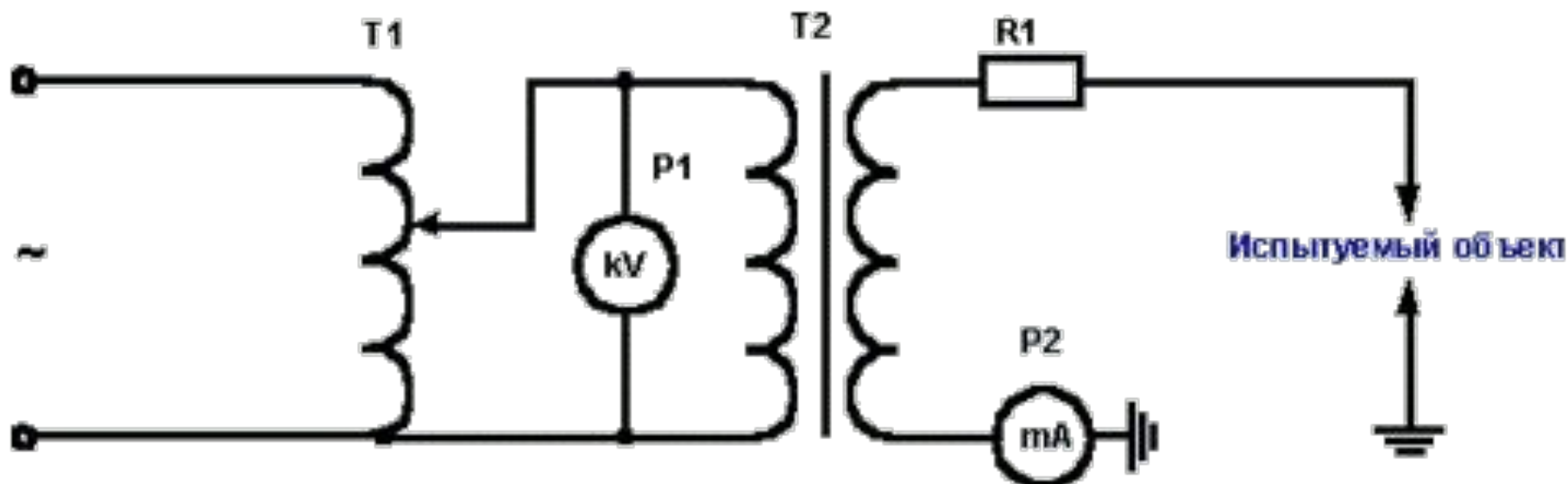
## ***Методы повышения надежности изоляции контактной сети :***

- **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.

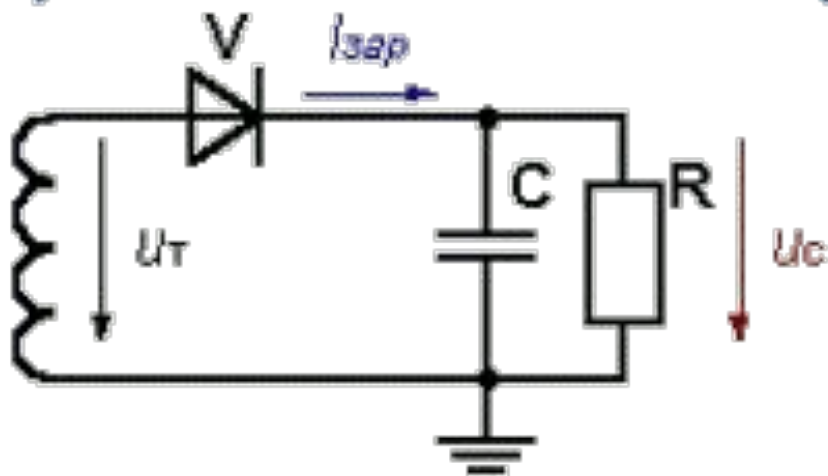


**Схема испытательной установки переменного напряжения**  
**Упрощенная схема испытательной установки переменного**  
**напряжения содержит испытательный трансформатор T2 (или**  
**каскад трансформаторов), регулировочный трансформатор T1,**  
**защитный резистор R1, предназначенный для демпфирования**  
**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.**

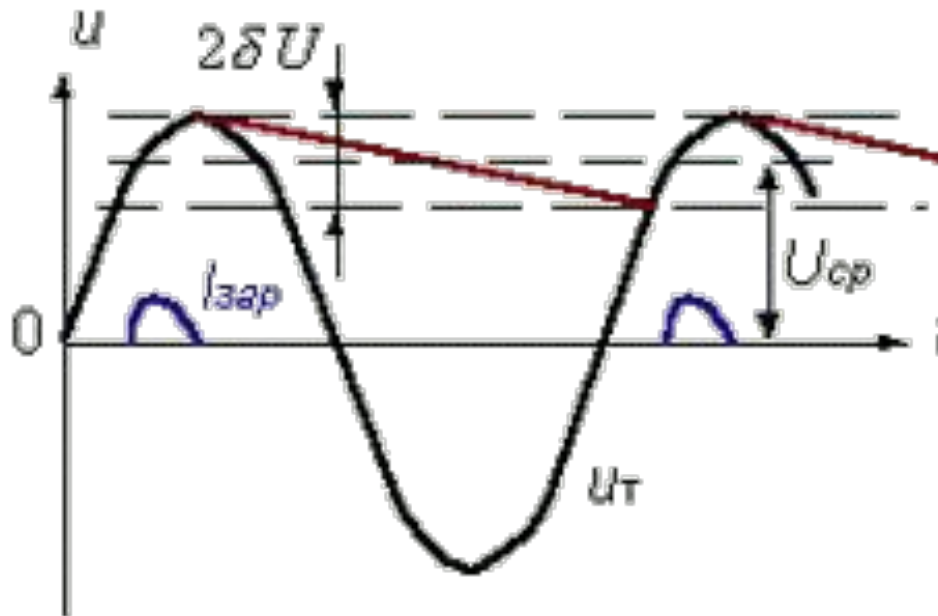
# **Испытательные установки высокого постоянного напряжения**

- 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)

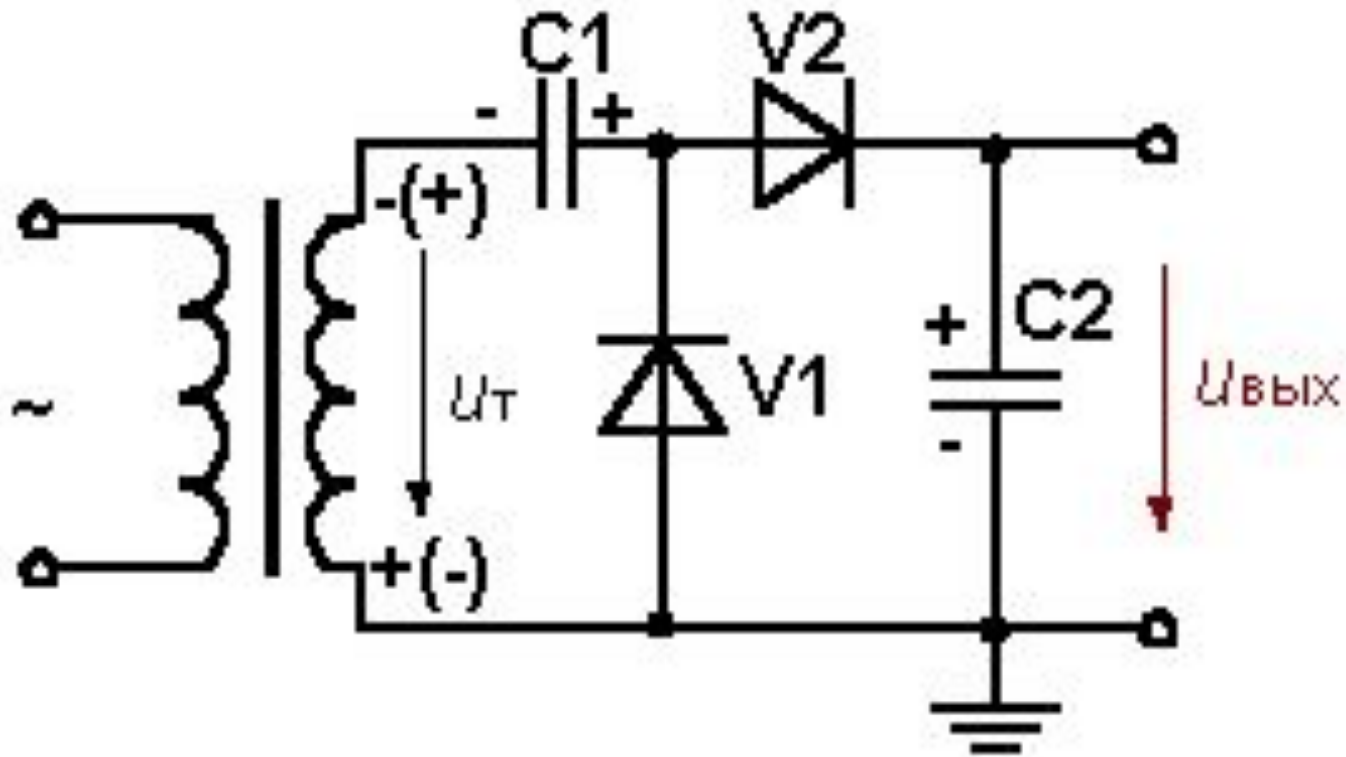


## Однополупериодный выпрямитель

**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.**

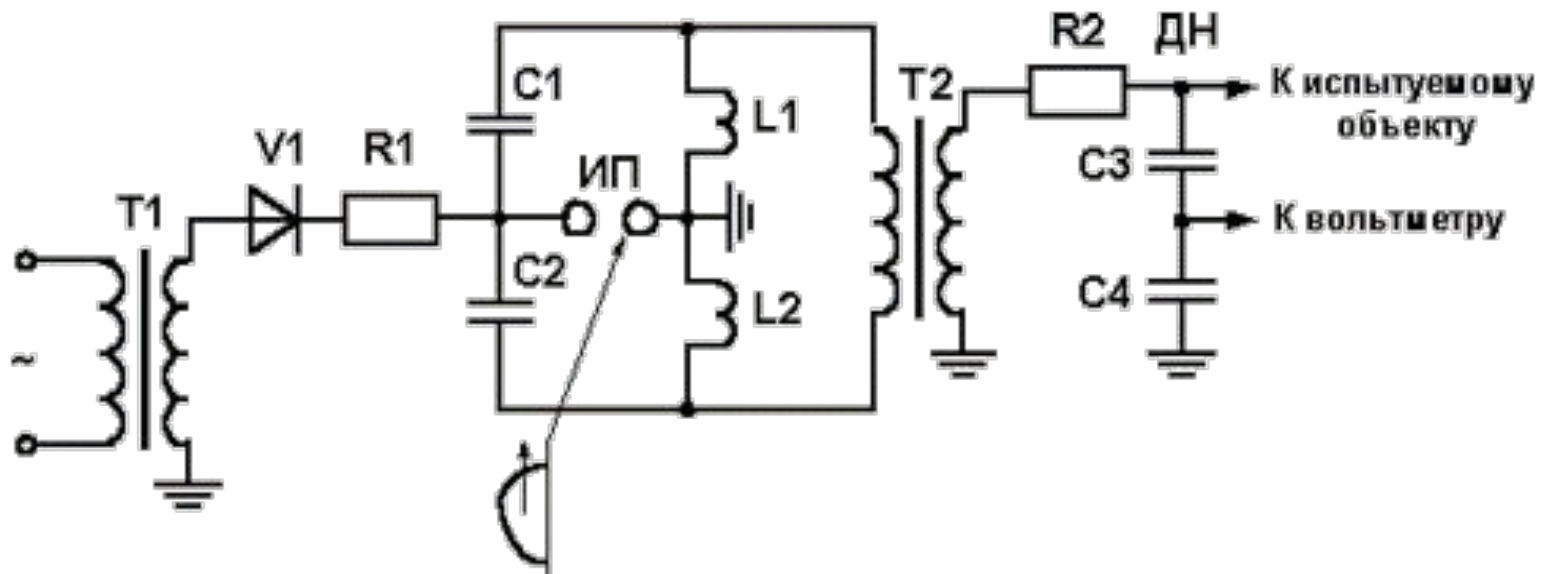


## СХЕМА выпрямителя с удвоением напряжения

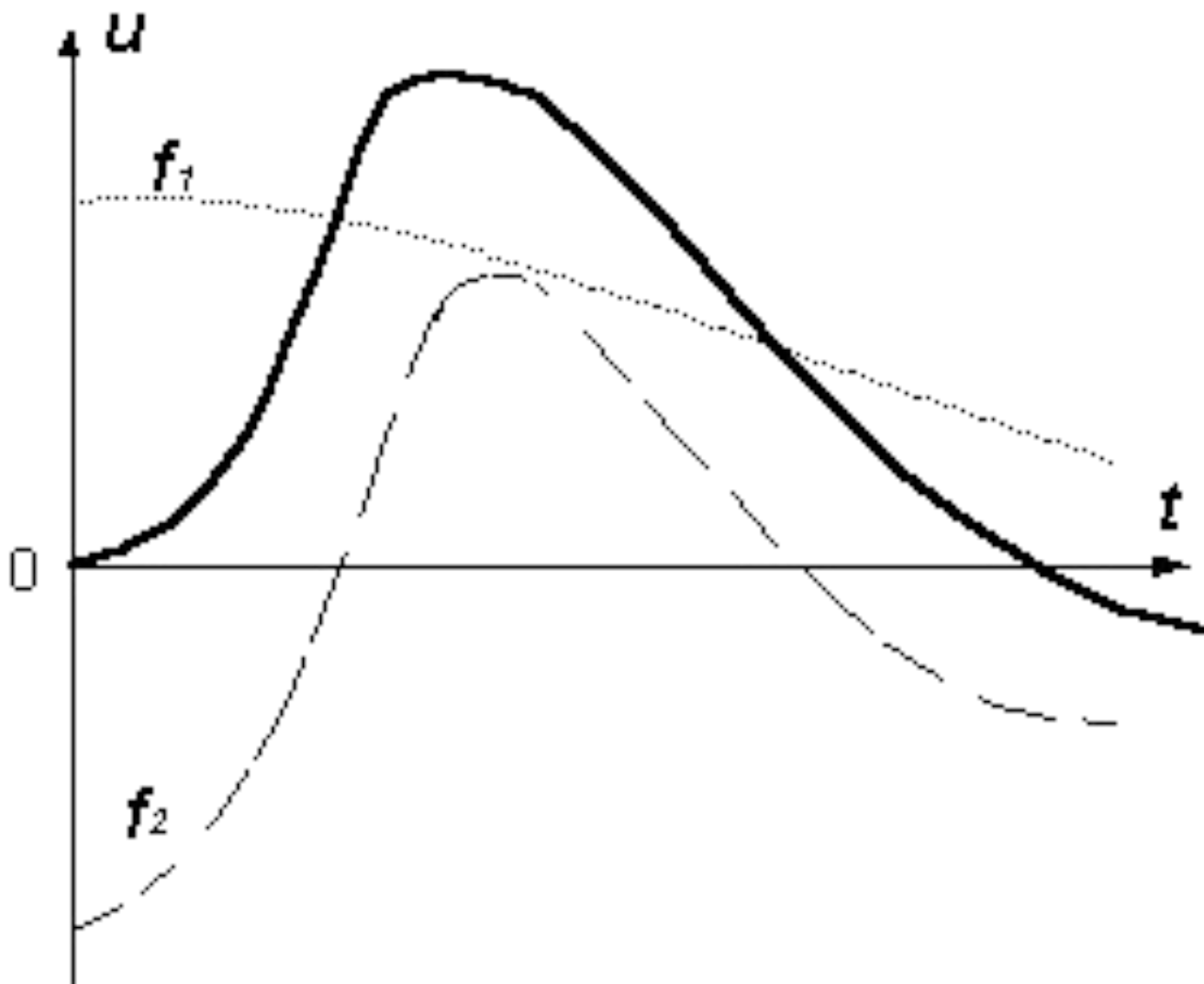
В схеме с удвоением напряжения  $C1$  заряжается примерно до амплитудного значения в те полупериоды, в которые вентиль  $V1$  открыт. В полупериоды противоположной полярности открывается вентиль  $V2$  и конденсатор  $C2$  оказывается включенным на суммарное напряжение обмотки трансформатора и заряженного конденсатора  $C1$ . При отсутствии нагрузки конденсатор  $C2$  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**

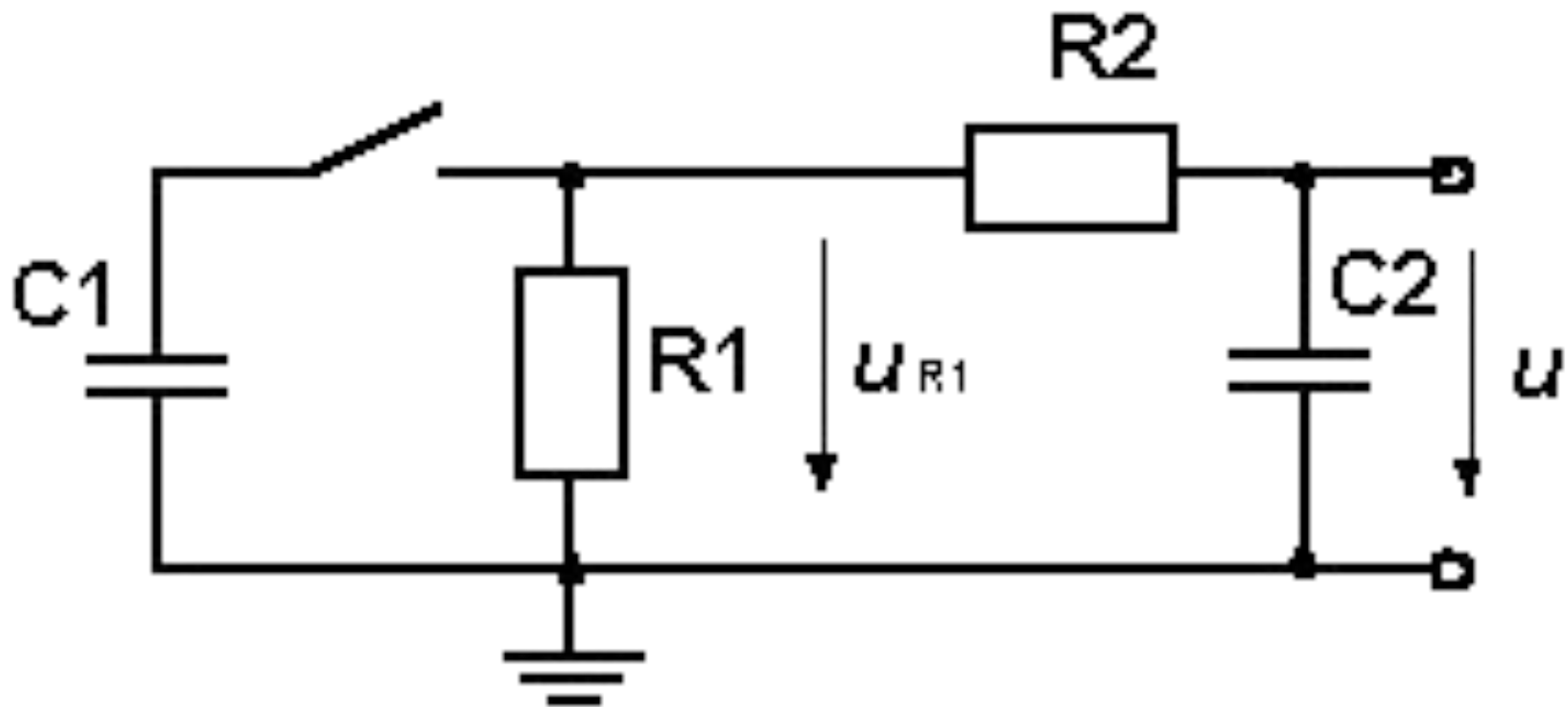


**Форма выходного импульса  
генератора**

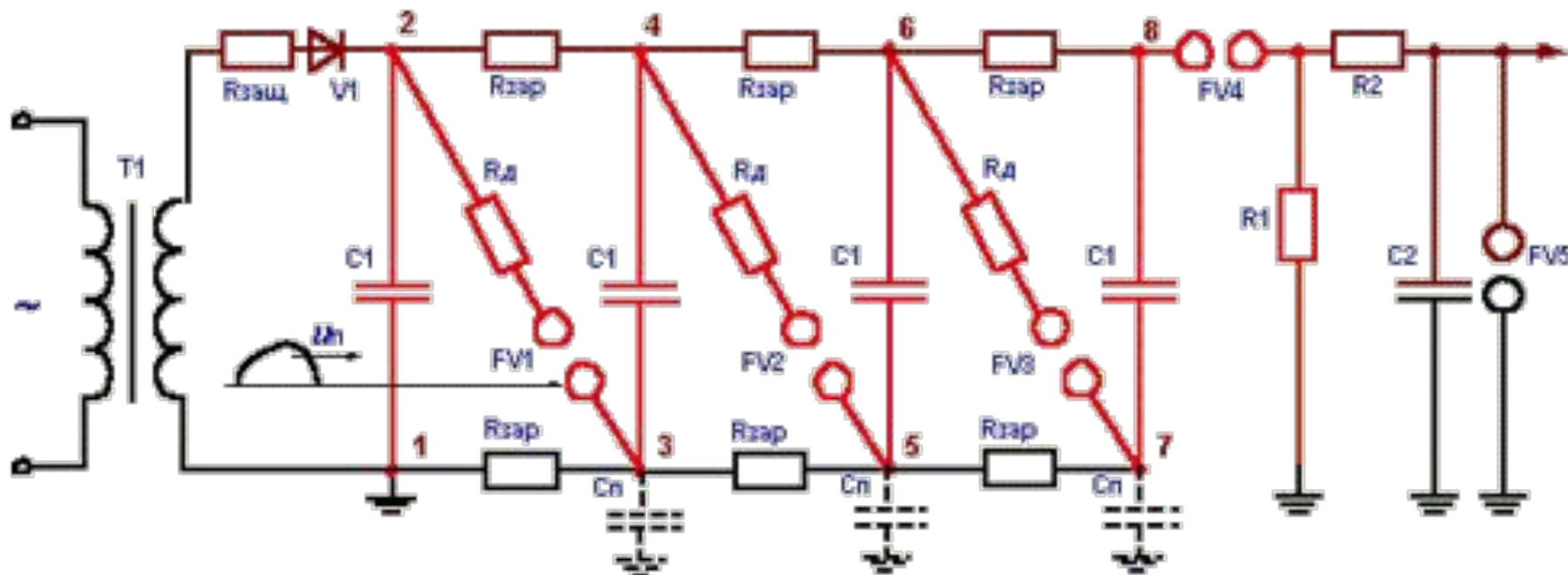


# . **Генераторы импульсных напряжений**

- 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.

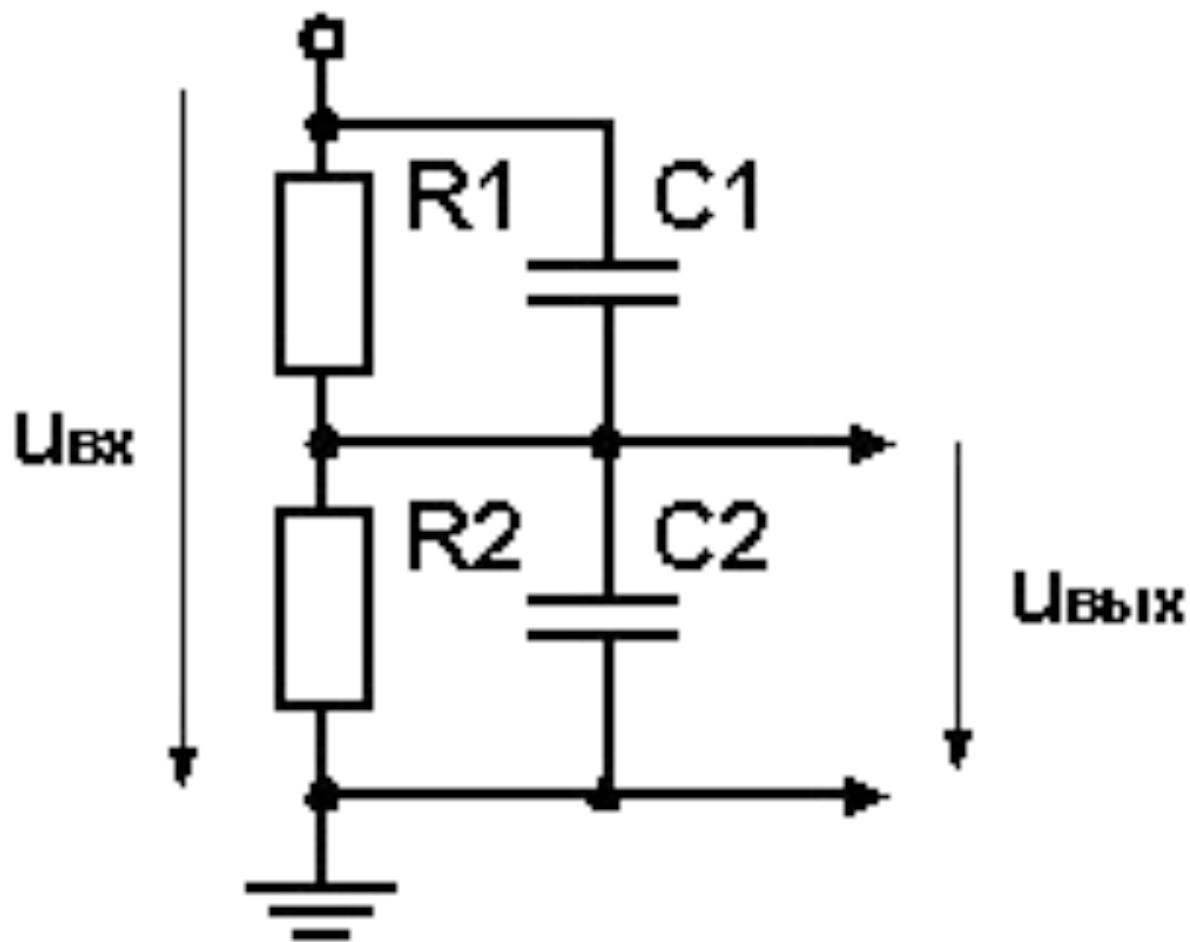
# Измерение высоких переменных напряжений

- **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

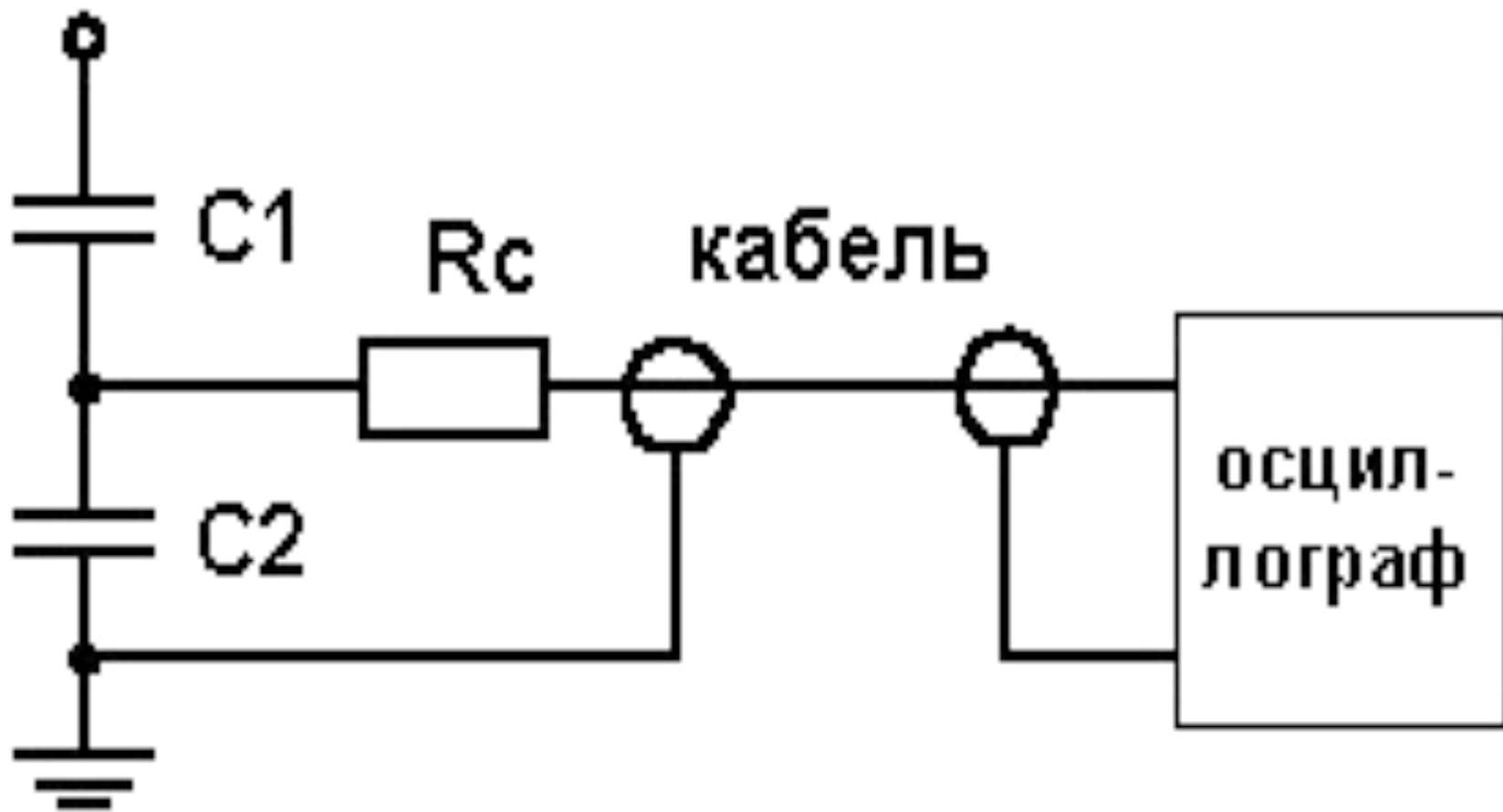
# Измерение высоких импульсных напряжений

- **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.

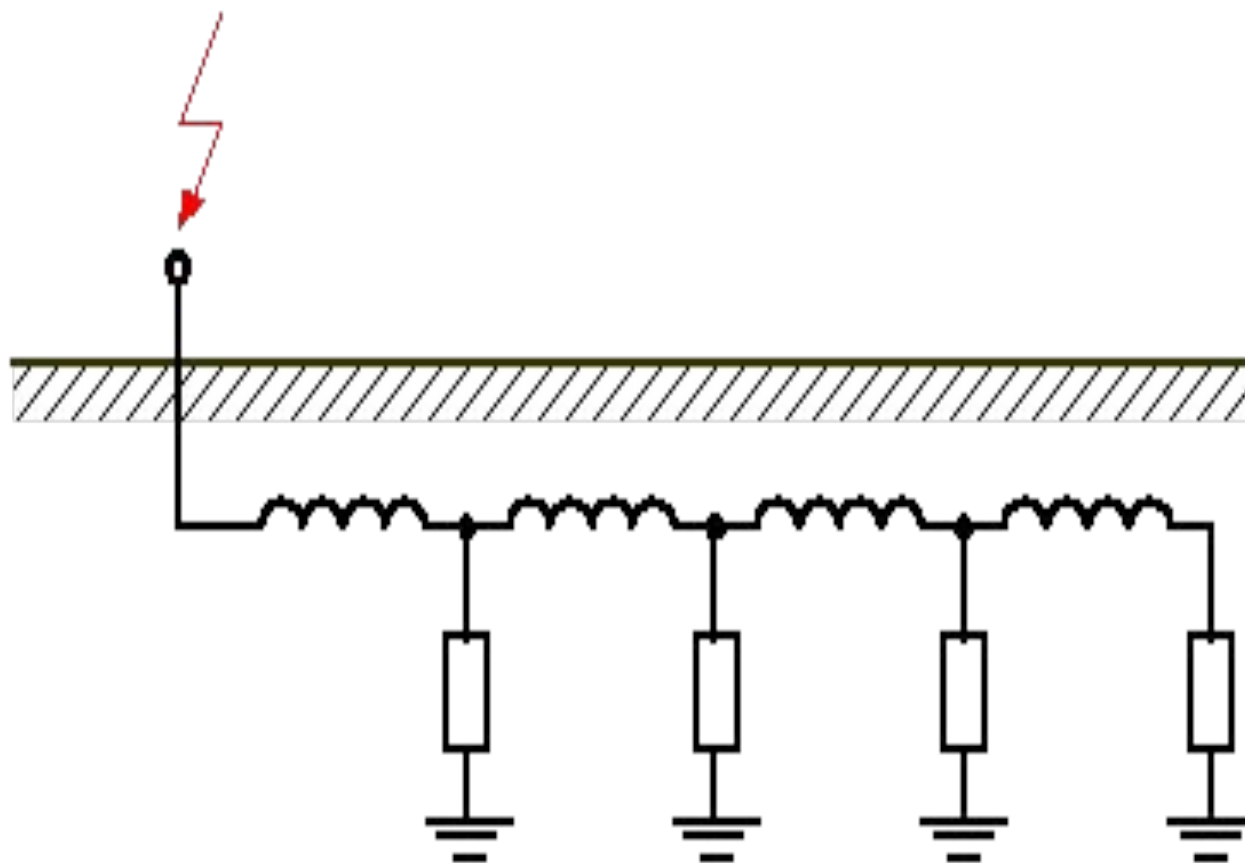


Схема замещения протяженного  
заземлителя

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

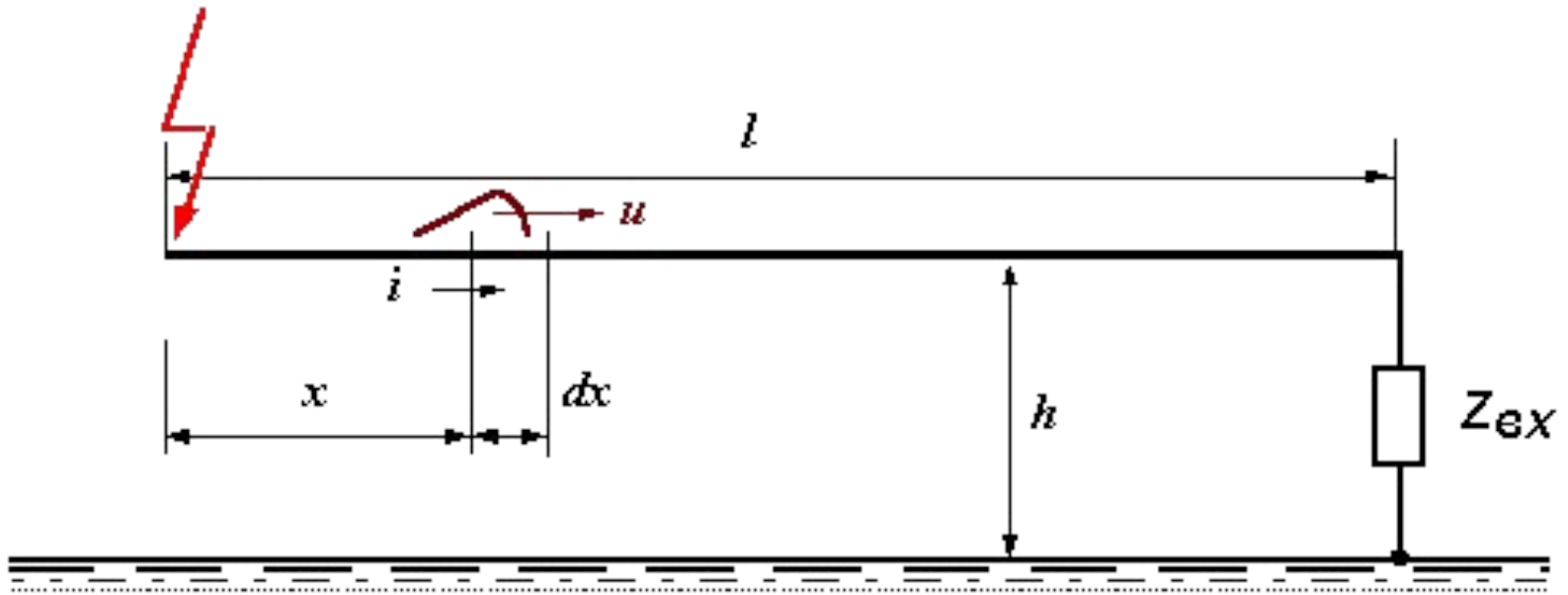
## Стержневые

- 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



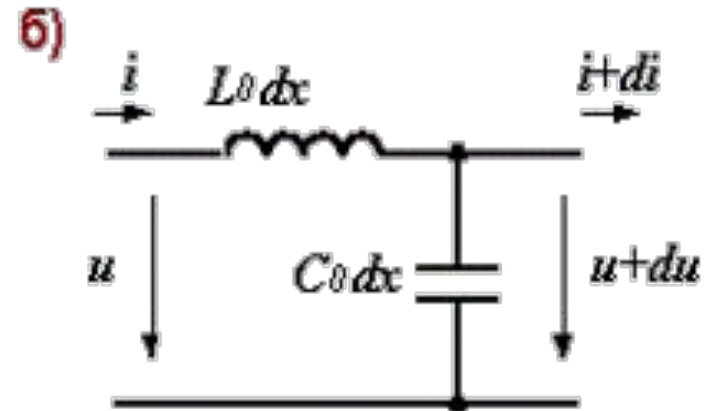
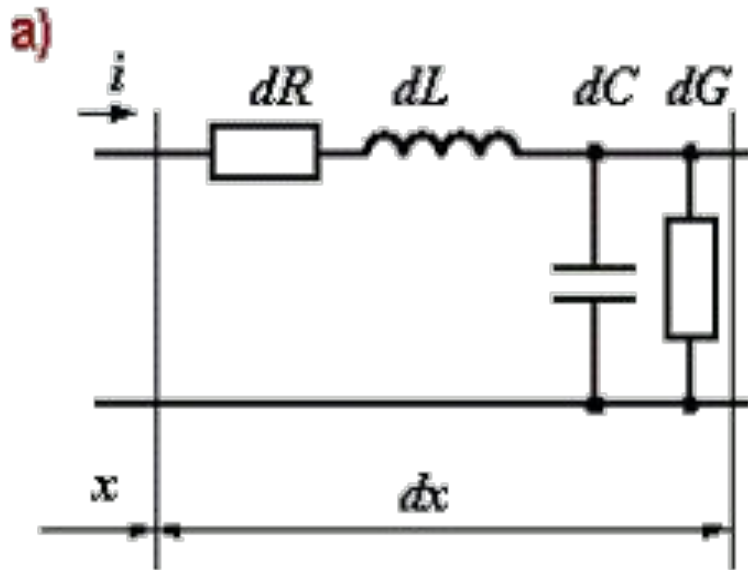


Схема замещения участка  
линии длиной  $dx$

# 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

$$Z_B = 5\text{-}30 \text{ Ом},$$

$$v = 150\text{-}200 \text{ м/мкс}.$$

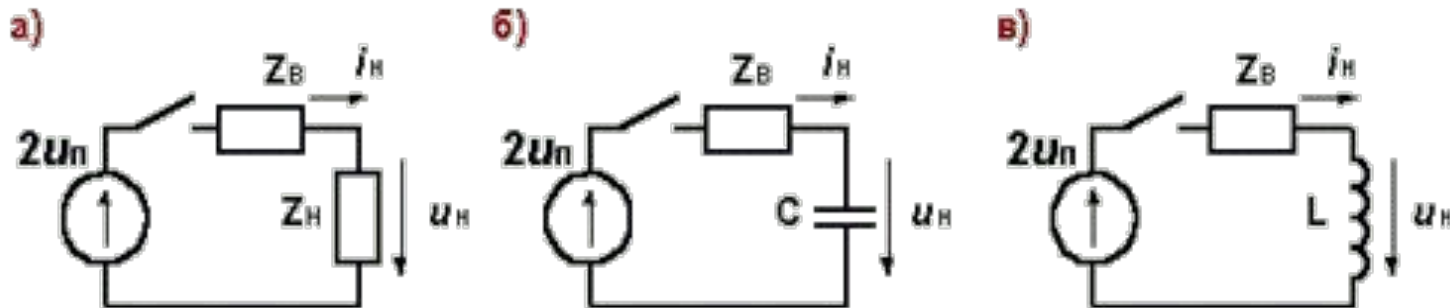


Схема замещения линии при падении волны напряжения на нагрузку

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

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

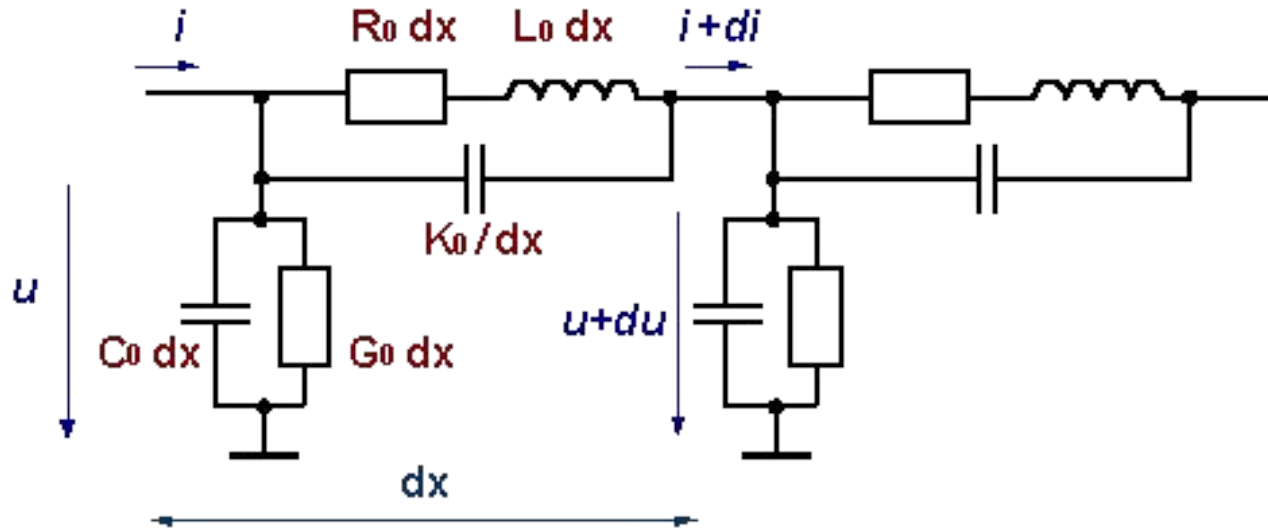
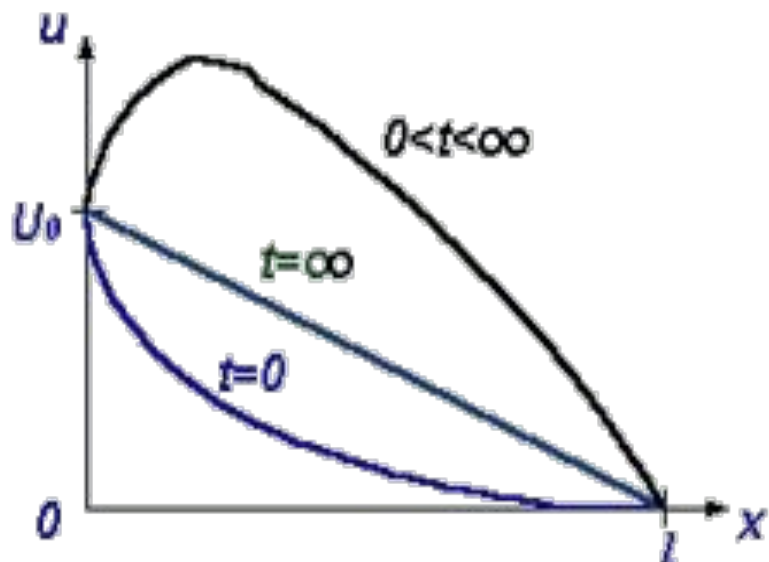


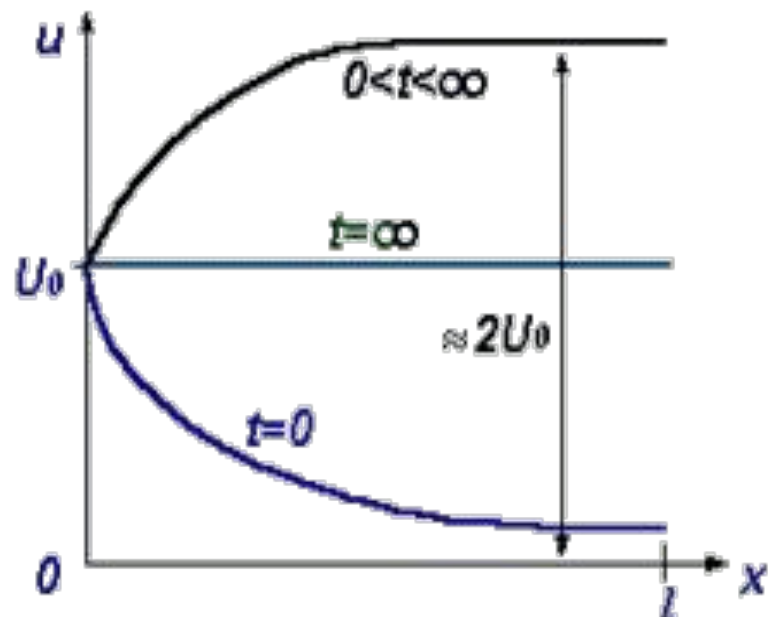
Схема замещения обмотки трансформатора

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.

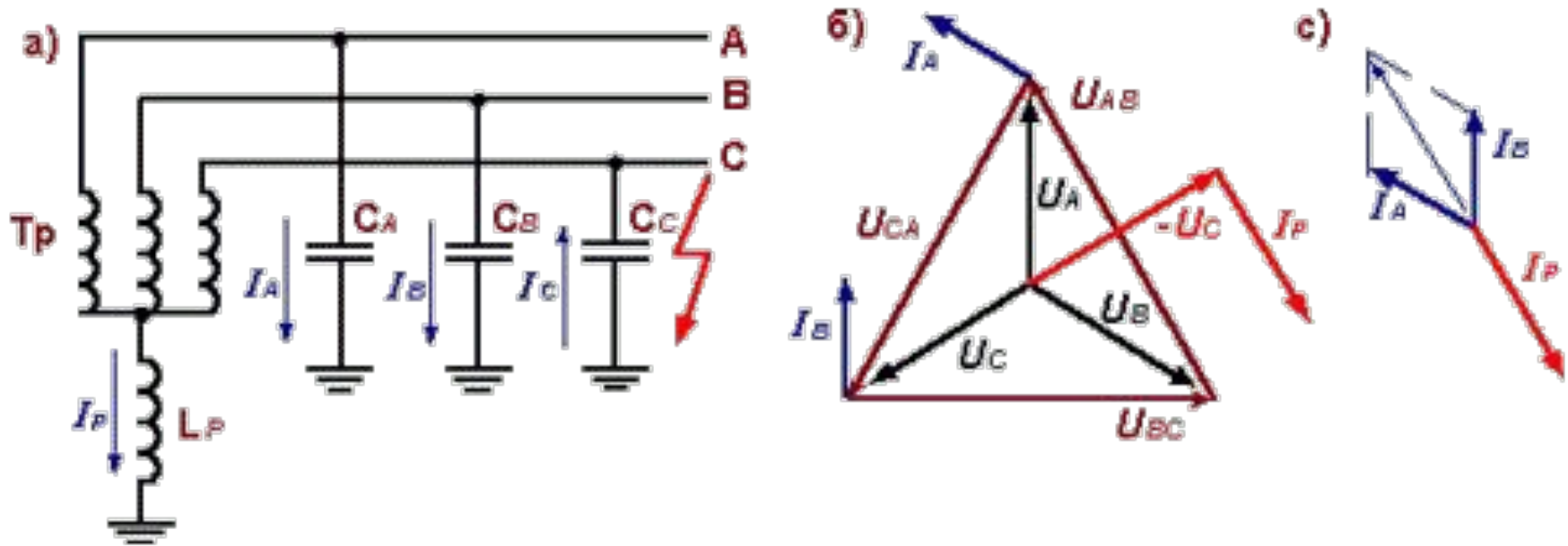
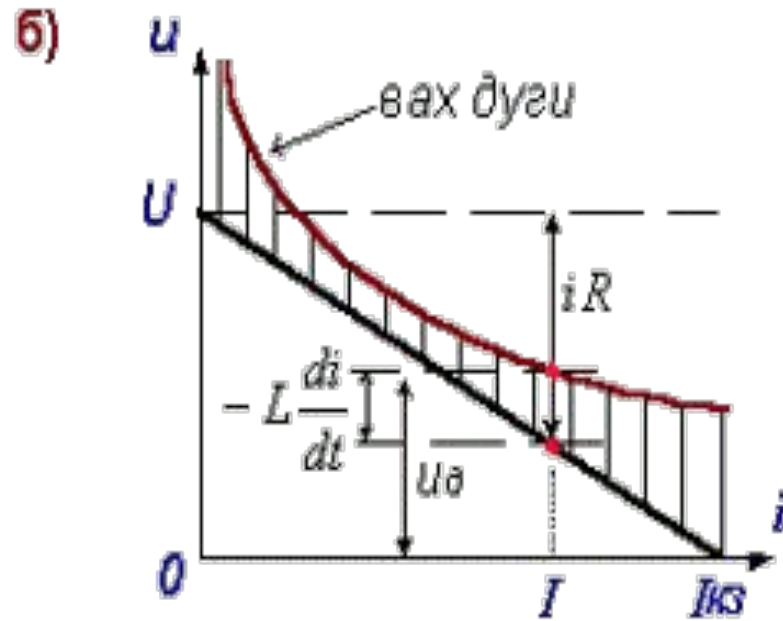
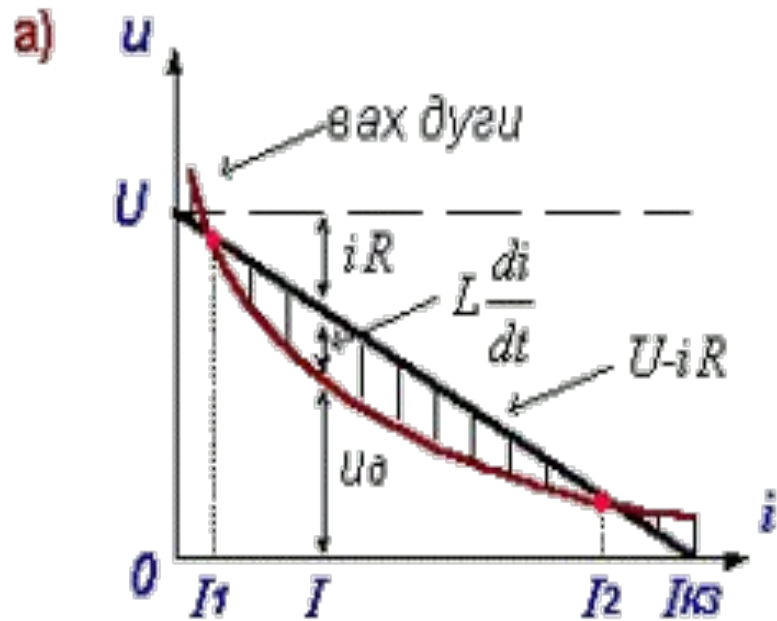


Схема включения дугогасящего реактора (а), векторная диаграмма напряжений (б) и сумма токов (в)



# Перенапряжения при гашении дуги

Большинство коммутаций в цепях высокого напряжения сопровождаются возникновением **электрической дуги**. **Электрическая дуга** представляет собой вид электрического разряда, характеризуемый 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

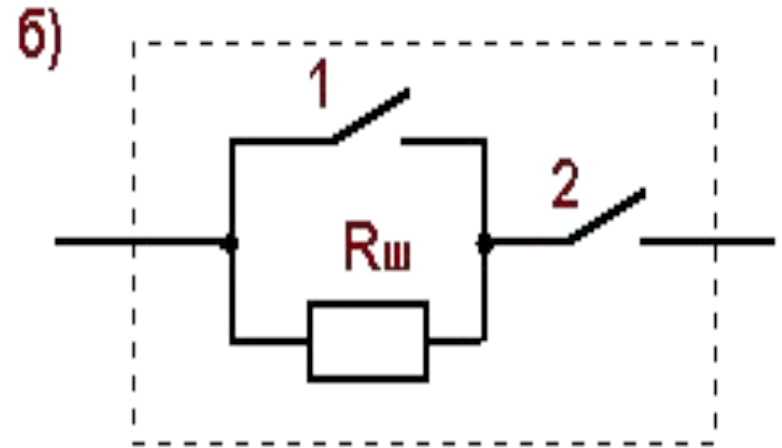
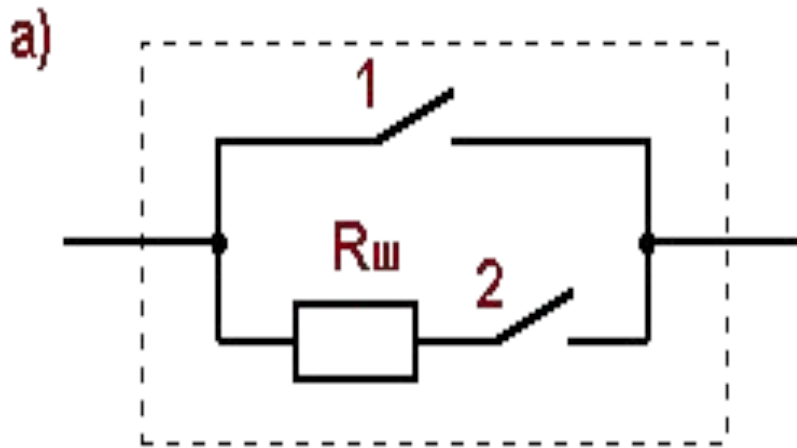
# Коммутационные перенапряжения

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).

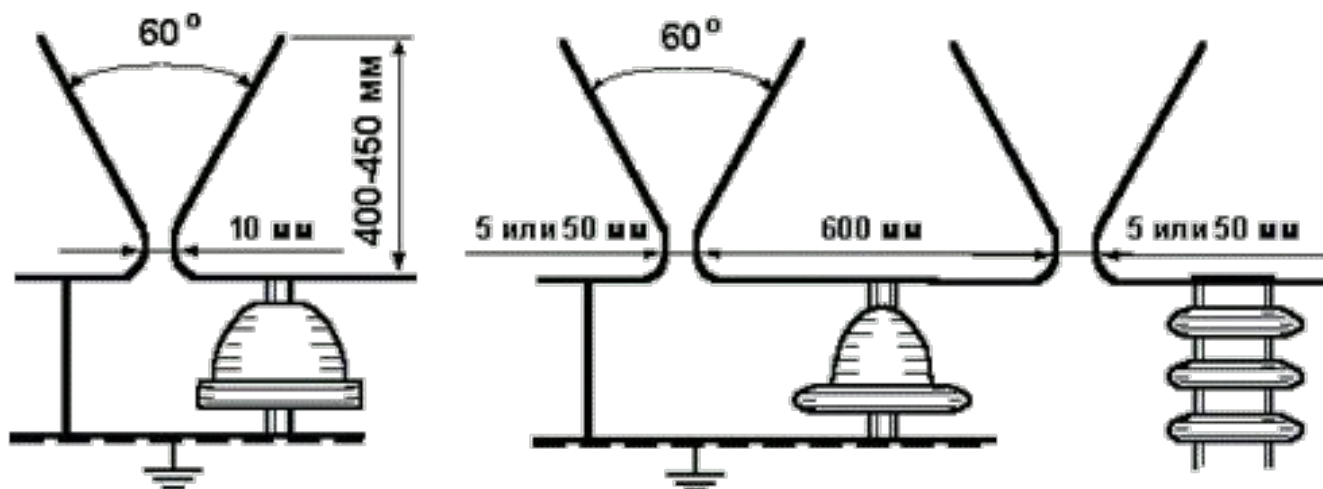
Разрядники или ОПН, устанавливаемые на трансформаторном присоединении, ограничивают эти перенапряжения.

# Высоковольтные разрядники и ограничители перенапряжений (ОПН)

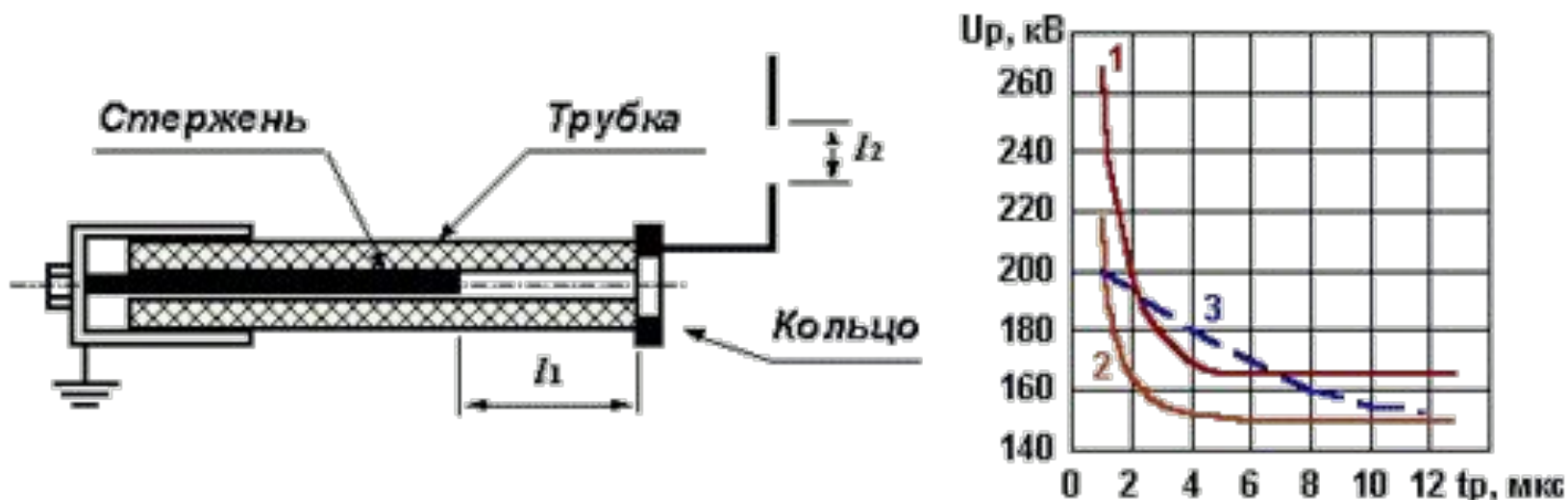
## Высоковольтные разрядники

подразделяются на три группы:

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



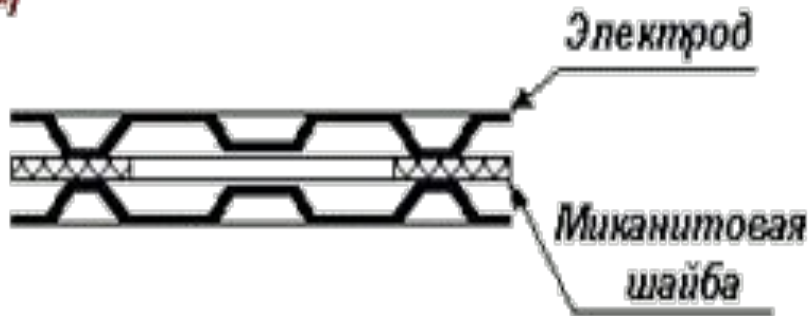
**Роговые разрядники,  
применяемые на контактной сети**



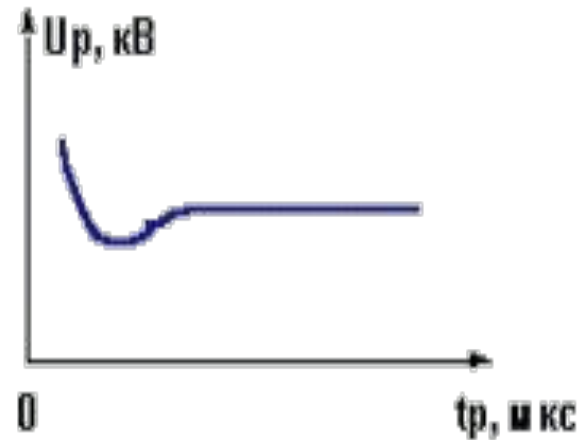
**Устройство трубчатого разрядника и  
вольт-секундные характеристики  
разрядника РТФ-35/0.8-5 при  $l_2=60$  мм (1),  
 $l_2=40$  мм (2), рогового разрядника 2x50 мм (3)**



а)



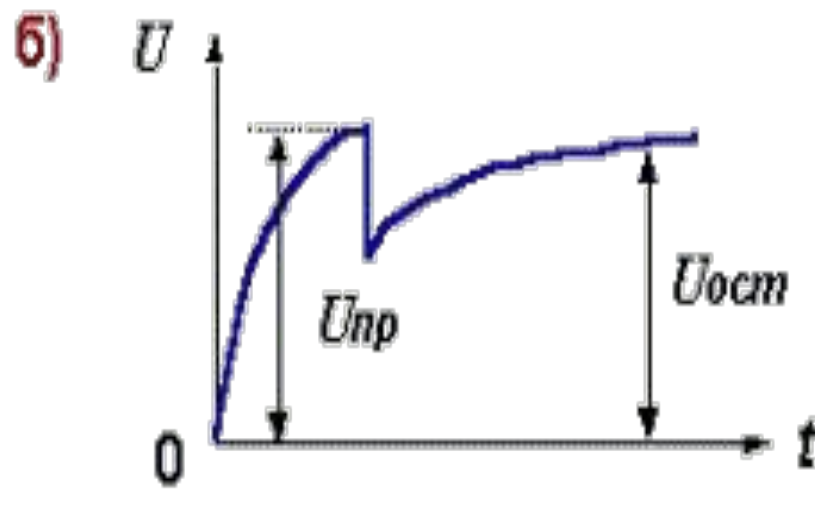
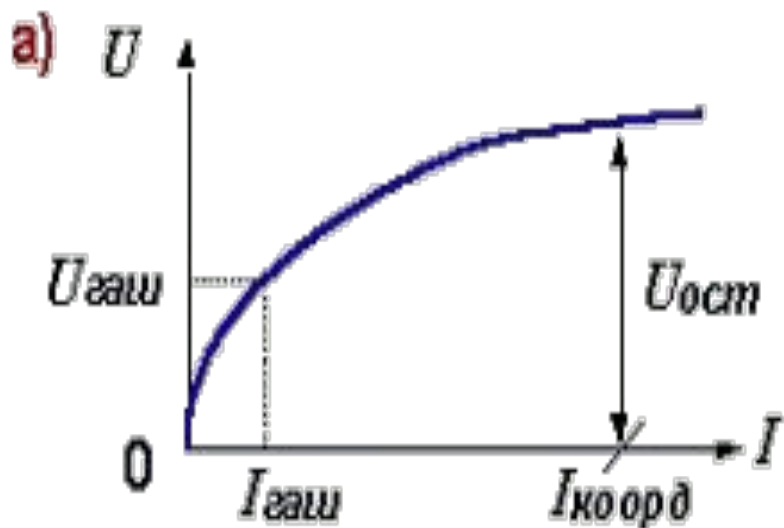
б)



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

**Группа характеристик** вентиляного 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 иккервум 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 грозовых - 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**.



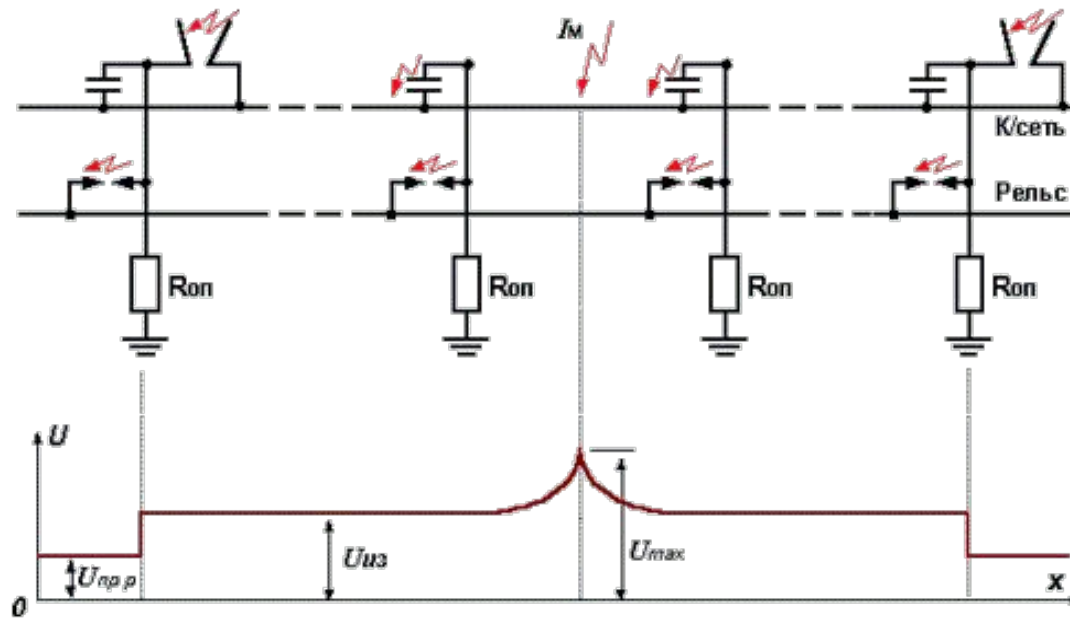
# ***Контактные сети постоянного тока***

- ***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.