

*Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого*

*Высшая школа высоковольтной энергетики*



## **Техника высоких напряжений**

**Испытательные и электрофизические установки  
высокого напряжения, высоковольтные  
измерения и испытания**

*Иванов Иван Олегович*



# Литература

- Бочаров Ю.Н., Дудкин С.М., Колычев А.В., Кривошеев С.И., Титков В.В., Шнеерсон Г.А. Техника высоких напряжений: Учеб. пособие, 2021 г.
- Адамьян Ю.Э., Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Янчус Э.И. Электроэнергетика. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения: Учеб. пособие, 2012 г.
- Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Гуменова Н.И., и др. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов, 2003 г.

Виды испытаний:

- **типовые** – проводятся на головных образцах или на образцах из первой производственной партии с целью оценки соответствия характеристик нового типа изделия требованиям стандарта или ТУ;
- **приемо-сдаточные** – испытывается каждый образец при выпуске с предприятия-изготовителя;
- **периодические** – проводятся по истечении определенного промежутка времени для проверки качества и стабильности характеристик изоляции изделия и соответствия их требованиям стандартов или ТУ;
- **профилактические** – проводятся в процессе эксплуатации электрооборудования с целью выявления развивающихся дефектов, которые могут привести к возникновению аварии.

## **Виды типовых испытаний:**

- напряжением грозового импульса;
- напряжением коммутационных импульсов;
- выдерживаемое напряжение при плавном подъеме в сухом состоянии;
- выдерживаемое напряжение при плавном подъеме под дождем;
- испытание внешней загрязненной и увлажненной изоляции;
- испытание изоляции на стойкость к тепловому пробую;
- испытание электрооборудования переменным напряжением с измерением радиопомех;
- испытание внешней изоляции переменным напряжением на отсутствие видимой короны;
- метод «вверх-вниз» для определений 50 % -го разрядного напряжения;
- метод разрядного напряжения (применяется для определения выдерживаемого напряжения для отдельного испытания самовосстанавливающейся внешней изоляции и испытания между контактами газонаполненных выключателей).

# Испытания напряжением промышленной частоты

## Испытания одномоментным напряжением

- Нормированное напряжение прикладывается однократно;
- Длительность испытаний может быть увеличена до 5 мин. для электрооборудования класса напряжения 220 кВ и ниже с основной органической твердой изоляцией (кроме бумажно-масляной);
- Испытания трансформаторов и реакторов осуществляется с использованием напряжения повышенной частоты (из-за насыщения магнитопроводов). При испытании трансформаторов класса 110 кВ и выше напряжение повышенной частоты подается на обмотку НН. Часто используется  $f = 225$  Гц (но не более 400 Гц).

## Особенности проведения испытаний:

- Испытательное напряжение должно быть синусоидальным;
- Подъем напряжения должен осуществляться плавно. Допускается быстрый подъем напряжения («рывком») на величину  $1/3$  от  $U_{исп}$ .

Если в ходе испытаний не произошел полный пробой и не появились недопустимые повреждения, которые могут быть определены по результатам последующих измерений  $\text{tg } \delta$  и характеристик частичных разрядов, то изоляция считается выдержавшей испытания.

## Испытания длительным переменным напряжением

- Допускается использование напряжения повышенной частоты при испытании трансформаторов и реакторов;
- Длительность типовых испытаний – 1 ч., приемо-сдаточных испытаний – 0.5 ч. для электрооборудования класса 220 – 500 кВ и не менее 1 ч. для электрооборудования класса 750 кВ.
- В процессе испытаний осуществляется измерение характеристик частичных разрядов.

Если в ходе испытаний уровень частичных разрядов не превысил значения  $3 \cdot 10^{-10}$  Кл при напряжении  $1.4 \frac{U_{н.р.}}{\sqrt{3}}$  или  $5 \cdot 10^{-10}$  Кл при напряжении  $1.5 \frac{U_{н.р.}}{\sqrt{3}}$ , то изоляция трансформаторов и реакторов считается выдержавшей испытания.

Изолятор считается выдержавшим испытание, если интенсивность частичных разрядов во время испытаний не превысила значения  $10^{-10}$  Кл.

$U_{н.р.}$  – наибольшее рабочее (линейное) напряжение электрооборудования.

*Нормированные испытательные длительные переменные напряжения внутренней изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов*

Класс напряжения, кВ	Испытательное длительное напряжение относительно земли обмотки ВН, кВ	
	Трансформатор	Реактор
220	220	–
330	295	–
500	425	425/350*
750	635	635/500*

## **Определение выдерживаемого напряжения при плавном подъеме**

- Испытывается внешняя изоляция в сухом состоянии и внутренняя газовая изоляция с элементами несамовосстанавливающейся изоляции;
- Проводится методом трехкратного приложения нормированного напряжения при плавном подъеме без последующей выдержки.

Объект считается выдержавшим испытания, если не произошло ни одного полного разряда. Если произошел один полный разряд, то испытание должно быть повторено при шестикратном приложении напряжения. Если при повторном испытании не произошло ни одного разряда, то изоляция считается выдержавшей испытания.

## **Определение выдерживаемого напряжения внешней изоляции при плавном подъеме под дождем**

- Проводится методом трехкратного приложения нормированного напряжения при плавном подъеме;
- Объект устанавливается в рабочее положение и создается дождь с равномерной капельной структурой под углом  $45^\circ$  к горизонтали с силой  $3 \pm 0.3$  мм/мин и удельным сопротивлением воды  $100 \pm 10$  Ом·м (при  $20^\circ\text{C}$ );
- Напряжение прикладывается к объекту испытания после его пребывания под дождем не менее 1 мин.

## **Испытание внешней загрязненной и увлажненной изоляции**

- На объект испытания наносится из пульверизатора солевой раствор ( $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$  или  $\text{CaCl}_2$ ) с поверхностной проводимостью 8 – 12 мкСм;
- Напряжение подается толчком (без плавного подъема), а для оценки испытаний используется 50% влагоразрядное напряжение.

Изоляторы считаются выдержавшими испытания, если 50% влагоразрядное напряжение при заданной удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения превышает нормированное.

## Испытание изоляции на стойкость к тепловому пробую

- К изоляции прикладывается нормированное напряжение и выдерживается до достижения установившегося значения  $\operatorname{tg} \delta$ ;
- Тепловой режим должен быть эквивалентным режиму при номинальном токе электрооборудования.
- Температура окружающей среды должна соответствовать предельно допустимой температуре по нормативным документам на испытываемое оборудование (для России обычно  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- Испытательное напряжение для электрооборудования классов 3 – 35 кВ составляет  $1.1 U_{н.р.}$ ,

для классов 110 кВ и выше  $1.1 \frac{U_{н.р.}}{\sqrt{3}}$ .

## Испытание электрооборудования переменным напряжением с измерением радиопомех

- Проводят с изоляцией в сухом состоянии при относительной влажности воздуха не более 80%;
- Объект испытания должен быть очищен от загрязнения и пыли;
- Уровень радиопомех (напряжение в мкВ) измеряют после 5 мин. Выдержки при напряжении  $1.1 \frac{U_{н.р.}}{\sqrt{3}}$ ;
- Измерения следует проводить на частоте  $500 \pm 50$  кГц
- Допускается измерение на других частотах в диапазоне 500 кГц – 2 МГц, если это нет особых требований.

Объект считается выдержавшим испытание, если уровень радиопомех при указанном напряжении не превосходит нормированное значение, указанное в стандартах на электрооборудование отдельных видов.



## Испытания внешней изоляции переменным напряжением на отсутствие видимой короны

- Проводятся для трансформаторов напряжения и тока, аппаратов, конденсаторов связи и изоляторов в сухом состоянии в затемненном помещении (на открытых площадках в ночное время);
- Отсутствие видимой короны определяют визуально или фотографированием;
- При визуальном наблюдении для выявления возможных мест коронирования значение напряжения на испытуемом объекте поднимают плавно до 110 – 120% нормированного напряжения относительно земли, затем снижают до нормированного значения, а при фотографировании поднимают до нормированного значения и выдерживают его 5 мин.
- Нормированное напряжение принимается равным  $1.1 \frac{U_{н.р.}}{\sqrt{3}}$ .

Объект считается выдержавшим испытание, если при нормированном значении напряжения отсутствовала видимая корона или наблюдалась визуально или на фотографии только слабая корона без значительных стримеров, возникающих в отдельных точках.

## Испытания с измерением характеристик частичных разрядов

- В начале на объект испытания подается переменное напряжение на 10 сек. величиной  $1.3 U_{н.р.}$  для электрооборудования классов 3 – 35 кВ и  $1.05 U_{н.р.}$  для классов 110 кВ и выше;
- Далее напряжение снижается без отключения до значения  $1.1 \frac{U_{н.р.}}{\sqrt{3}}$  и выдерживается не менее 1 мин.;
- После производится измерения интенсивности частичных разрядов.

Допустимые значения уровня частичных разрядов:

- $5 \cdot 10^{-11}$  Кл для трансформаторов тока и напряжения с твердой изоляцией;
- $10^{-11}$  Кл для трансформаторов тока и напряжения с масляной изоляцией и изоляции главных цепей КРУЭ.

# Испытания изоляции импульсными напряжениями

Виды импульсов напряжения:

- Грозовой (полный, срезанный);
- Коммутационный (апериодический, колебательный)
- Испытания **внутренней изоляции** производятся приложением трех полных и трех срезанных импульсов заданных значений напряжения положительной и отрицательной полярности.

Изоляция считается выдержавшей испытания, если не произошел полный пробой и не наблюдались недопустимые повреждения, которые могут быть определены по искажению прикладываемого импульса или по результатам последующих измерений  $\operatorname{tg} \delta$  или характеристик ч.р.

- Испытания **внешней и внутренней газовой изоляции** производятся 15-ударным приложением полных и срезанных гроздовых импульсов обеих полярностей.

Испытания считаются успешными, если произошло не более двух полных разрядов в каждой серии из 15 приложенных импульсов.

$$U_{\text{выд}} = U_{0.5} \left( 1 - 1.3 \frac{\sigma^*}{U_{0.5}} \right) - \text{выдерживаемое напряжение.}$$

$U_{0.5}$  – 50% разрядное напряжение;  
 $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

$$\sigma^* = 1.3 \frac{\sigma}{U_{0.5}} - \text{стандартное отклонение в относительных единицах (коэффициент вариации)}$$

$\sigma^* = 0.03 - 0.06$  в зависимости от системы изоляции.

Определение  $U_{0.5}$

- метод ступенчатого подъема;
- метод «вверх-вниз».

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) - \text{функция плотности вероятности нормального распределения.}$$

## Испытания методом разрядного напряжения

- Испытывается внешняя и внутренняя газовая изоляция.
- Испытания проводятся методом плавного подъема напряжения при промышленной частоте, а также при воздействии грозových и коммутационных импульсов.
- Проводится серия испытаний, интервалы между приложением напряжения должны быть не менее 1 мин.

Изоляция считается выдержавшей испытания, если фактически выдерживаемое напряжение или среднее разрядное ( $U_{0,5}$ )  $\geq$  нормированного испытательного значения.

## Испытания методом «вверх-вниз»

- Метод испытания предусматривает приложение к объекту одинаковых по форме и различных для каждого из последующих приложений по значению напряжений в зависимости от результата предшествующего приложения. Если при приложении данного напряжения на объекте испытания произошел полный разряд, то значение напряжения при последующем приложении уменьшается, если же полного разряда не было, то значение напряжения увеличивают.
- Данный метод испытания применяют преимущественно при испытаниях импульсным напряжением и при испытаниях внешней загрязненной и увлажненной изоляции.
- Применяется в случаях, когда значение стандартного отклонения нормировано и требуется определить только 50% разрядное напряжение.
- Разность между соседними уровнями напряжений  $\Delta U = (0.5 - 2) \sigma^* U_{0.5}$ .
- Результаты испытаний представляют в виде ряда возрастающих значений напряжения  $U_1, U_2, U_3 \dots U_n$  с интервалом  $\Delta U$ .
- Определяется число разрядов для каждого уровня напряжения  $n_1, n_2, n_3 \dots n_m$ , а также число опытов без разряда  $n'_1, n'_2, n'_3 \dots n'_m$ .
- Общее число разрядов  $N = \sum_{i=1}^m n_i$ , а число опытов без разряда  $N' = \sum_{i=1}^m n'_i$ .
- Если  $N > N'$ , то  $U_{0.5} = U_1 + \Delta U \left( \frac{\sum_{i=1}^m i n_i}{\sum_{i=1}^m n_i} - \frac{1}{2} \right)$ ; если  $N < N'$ , то  $U_{0.5} = U_1 + \Delta U \left( \frac{\sum_{i=1}^m i n_i}{\sum_{i=1}^m n_i} + \frac{1}{2} \right)$ .

# Испытательные установки переменного тока

## Требования к установкам и общая схема

Предназначены для воспроизведения в лабораторных условиях воздействия напряжения промышленной частоты на изоляцию линий электропередач и высоковольтного оборудования.

Проводятся:

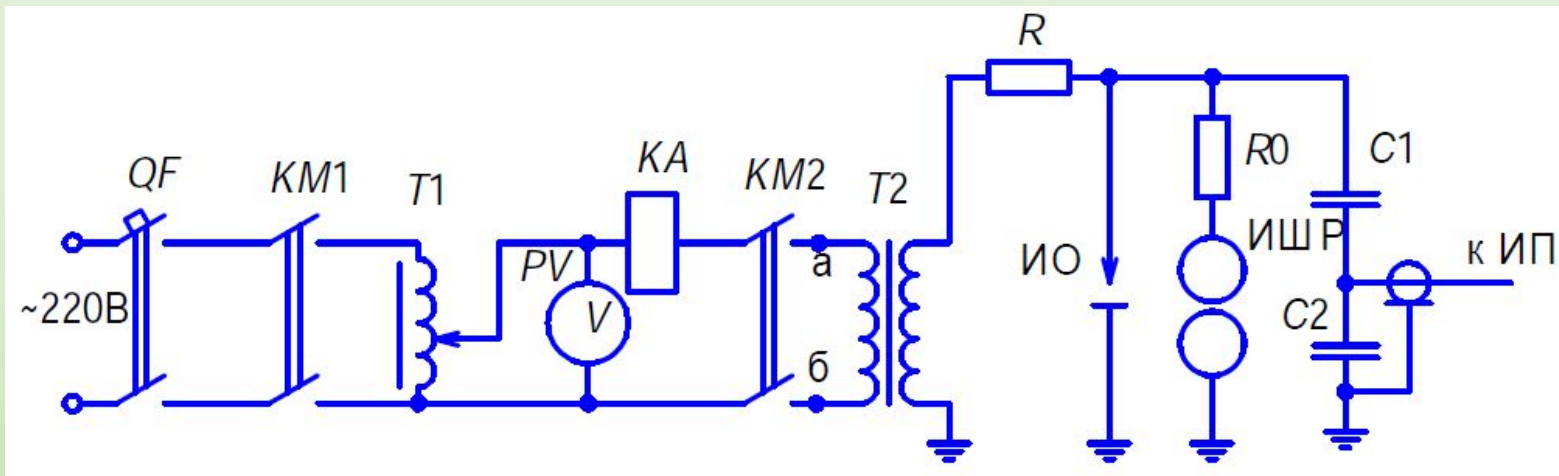
- исследования электрической прочности;
- исследования стойкости к тепловому пробоев внутренней изоляции;
- испытания внешней изоляции в сухом состоянии и в условиях загрязнения и увлажнения

Требования к форме напряжения:

- форма кривой напряжения практически синусоидальная;
- $\frac{U_m}{U} = \sqrt{2} \pm 0.07 (\pm 0.05)$  ГОСТ / МЭК;
- $f = 50 \pm 5$  Гц (допускается увеличение до 400 Гц).

При испытаниях при повышенной частоте:

$$T = \frac{T_{50} \cdot 100}{f} \text{ – эквивалентное 50 Гц время испытания.}$$



QF – автоматический выключатель;  
 KM – контакты магнитных пускателей;  
 KA – реле тока;  
 ИШР – искровой шаровой разрядник;  
 ИО – испытательный объект;  
 ИП – измерительный прибор.

Схема установки для испытания переменным  $U$

Требования к току КЗ на высокой стороне трансформатора:

- при испытаниях воздушных промежутков или сухой наружной изоляции не менее 0.3 А;
- при испытаниях жидкой и твердой изоляции не менее 0.1 А;
- при испытаниях загрязненной и увлажненной изоляции не менее 5 А (6 А – по стандарту МЭК).

Требования к нагрузочной емкости:

- величина нагрузочной емкости не менее 500 пФ / 1000 пФ (ГОСТ/МЭК),
- нагрузочная емкость – емкость испытательного объекта, емкость делителя напряжения, емкость шарового разрядника, дополнительная емкость.

# Регуляторы напряжения

Требования к регулятору напряжения:

- необходимая мощность для проведения испытаний;
- низкое реактивное сопротивление;
- не должен искажать форму  $U$ ;
- включение «рывком» при  $30 - 50 \% U_{исп}$ ;
- плавная регулировка  $U$  ( $2 - 3 \% U_{исп}$ ).

Виды регуляторов напряжения:

- автотрансформаторы;
- трансформаторы с подвижной вторичной обмоткой;
- индукционные регуляторы;
- управляемые синхронные генераторы.

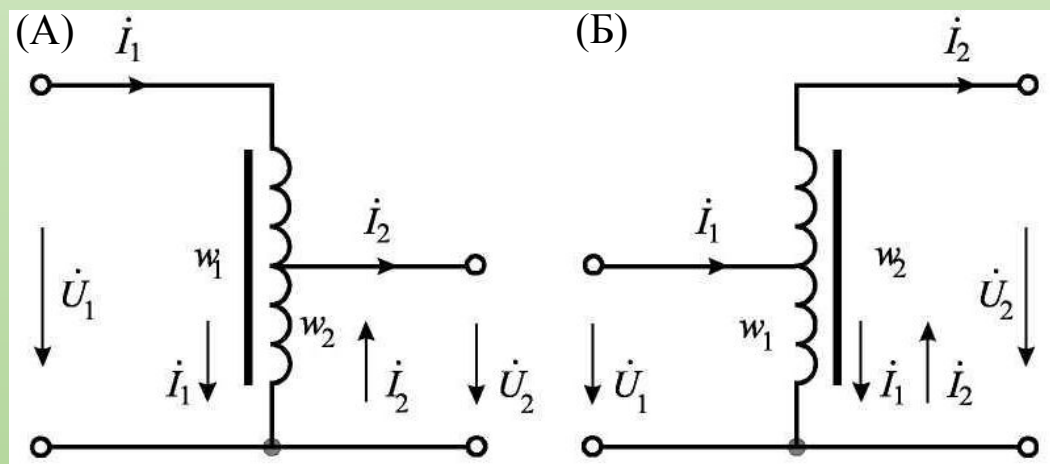
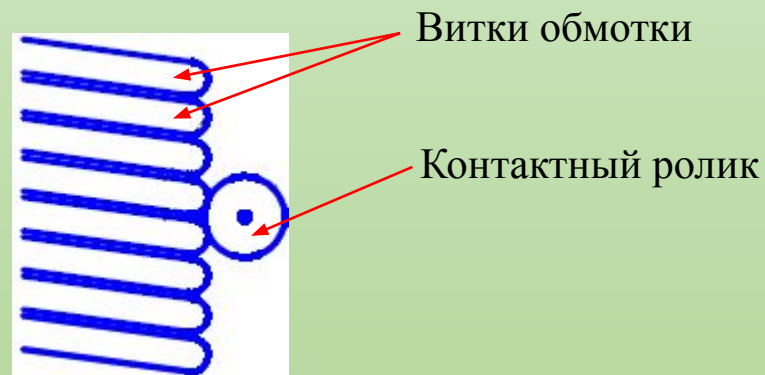


Схема понижающего (А) и повышающего (Б) автотрансформатора



Образование короткозамкнутого витка

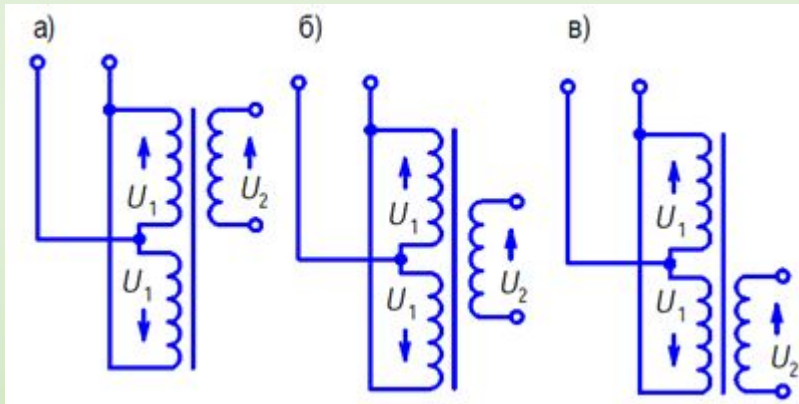


Схема трансформатора с подвижной вторичной обмоткой  
 а)  $+U_2$ , б)  $U_2 = 0$ , в)  $-U_2$ ,

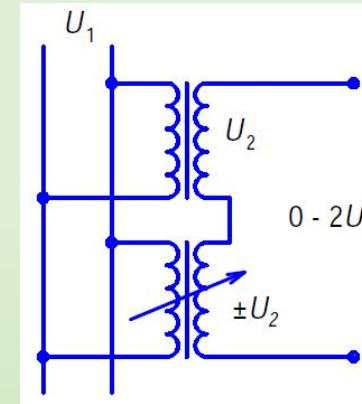


Схема регулировки напряжения с двумя трансформаторами

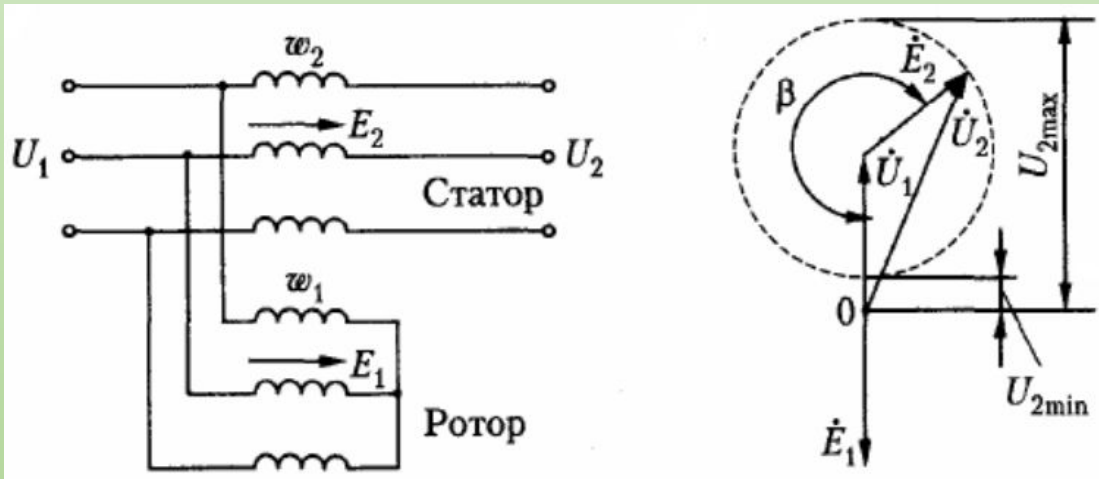


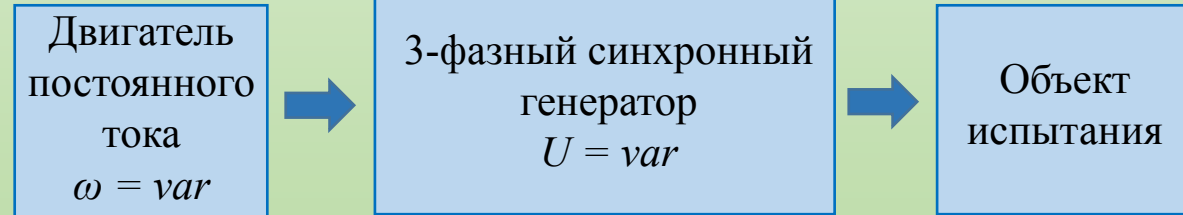
Схема индукционного регулятора напряжения

Если  $w_1 \neq w_2$

- $\beta = 180^\circ \rightarrow U_2 = U_1 + E_2$
- $\beta = 0^\circ \rightarrow U_2 = U_1 - E_2$

Если  $w_1 = w_2$

- $\beta = 180^\circ \rightarrow U_2 = 2U_1$
- $\beta = 0^\circ \rightarrow U_2 = 0$



Блок-схема регулятора напряжения на основе синхронного генератора

$$\omega = \frac{U - IR}{C\Phi} \quad \text{— частота вращения ДПТ.}$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad \text{— частота вращения магнитного поля статора АД.}$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad 0 \leq n_2 < n_1$$



# Испытательные трансформаторы

Особенности испытательных трансформаторов:

- высокий коэффициент трансформации (100 – 500);
- высокая индуктивность рассеяния;
- малая мощность.

Требования:

- отсутствие ЧР во всем диапазоне  $U_{исп}$ ;
- отсутствие резонанса на промышленной частоте.

- 1 – обмотка низкого напряжения;
- 2 – обмотка высокого напряжения;
- 3 – бак трансформатора;
- 4 – магнитопровод;
- 5 – обмотки связи;
- 6 – дополнительная обмотка низкого напряжения;
- 7 – проходные изоляторы.

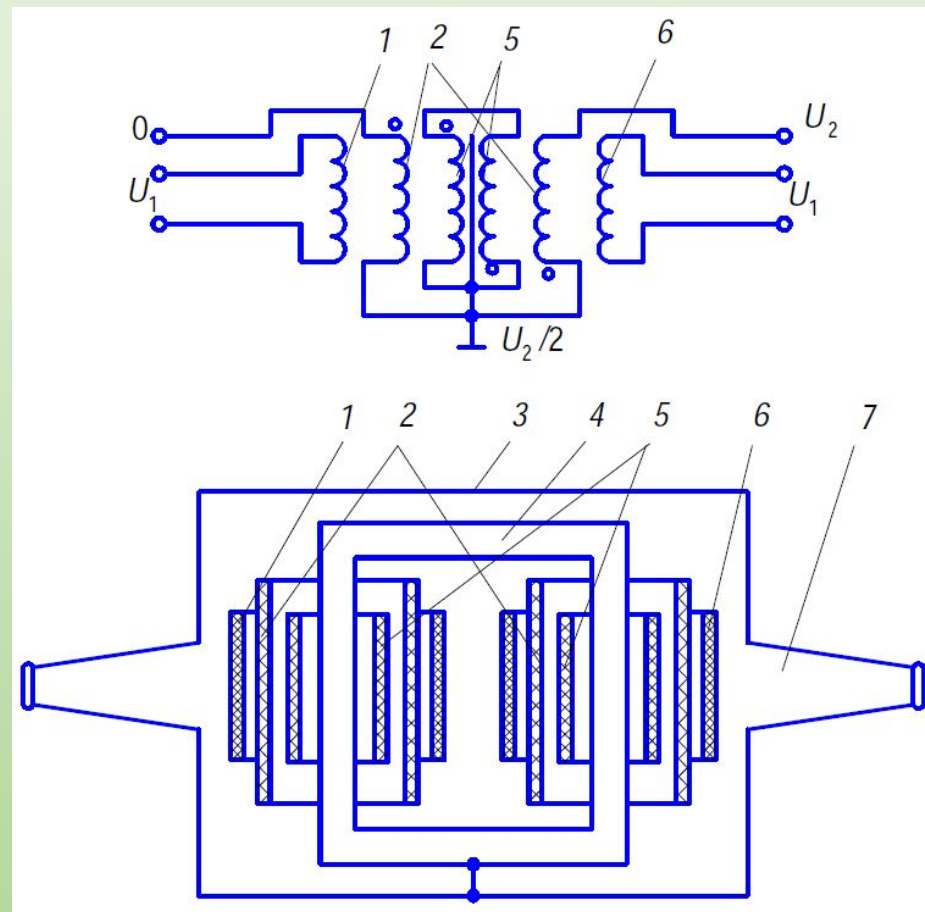


Схема соединения обмоток и их расположение на магнитопроводе

## Каскадное включение трансформаторов

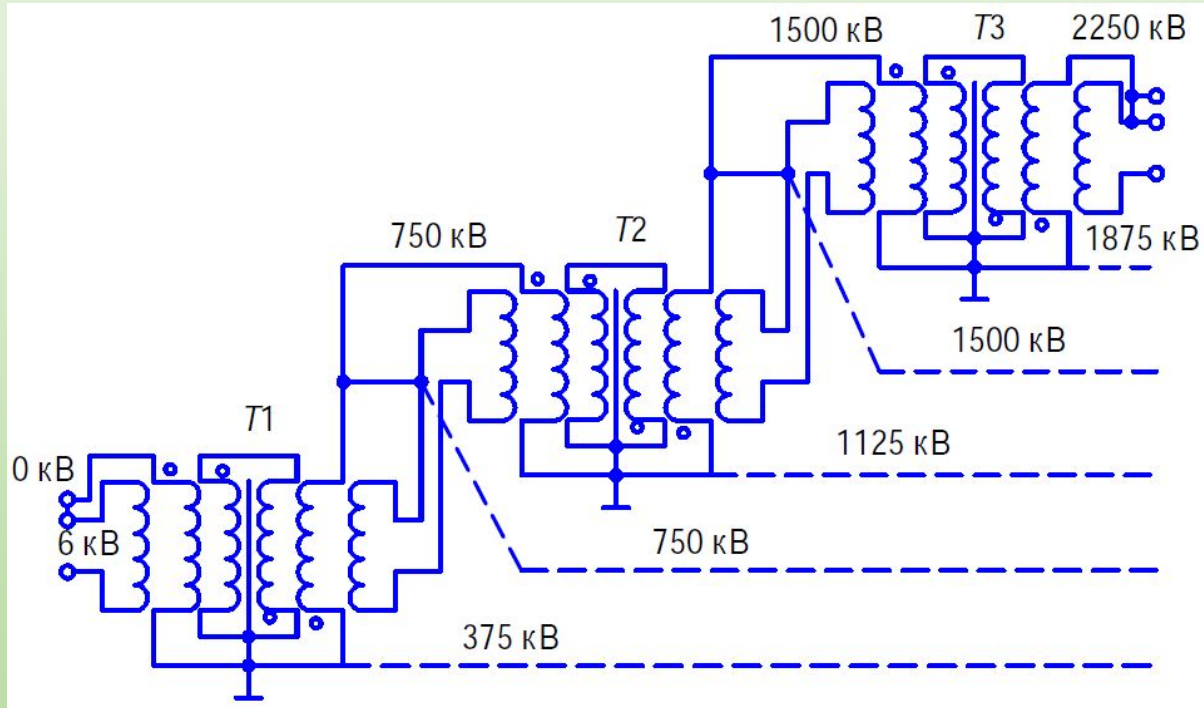
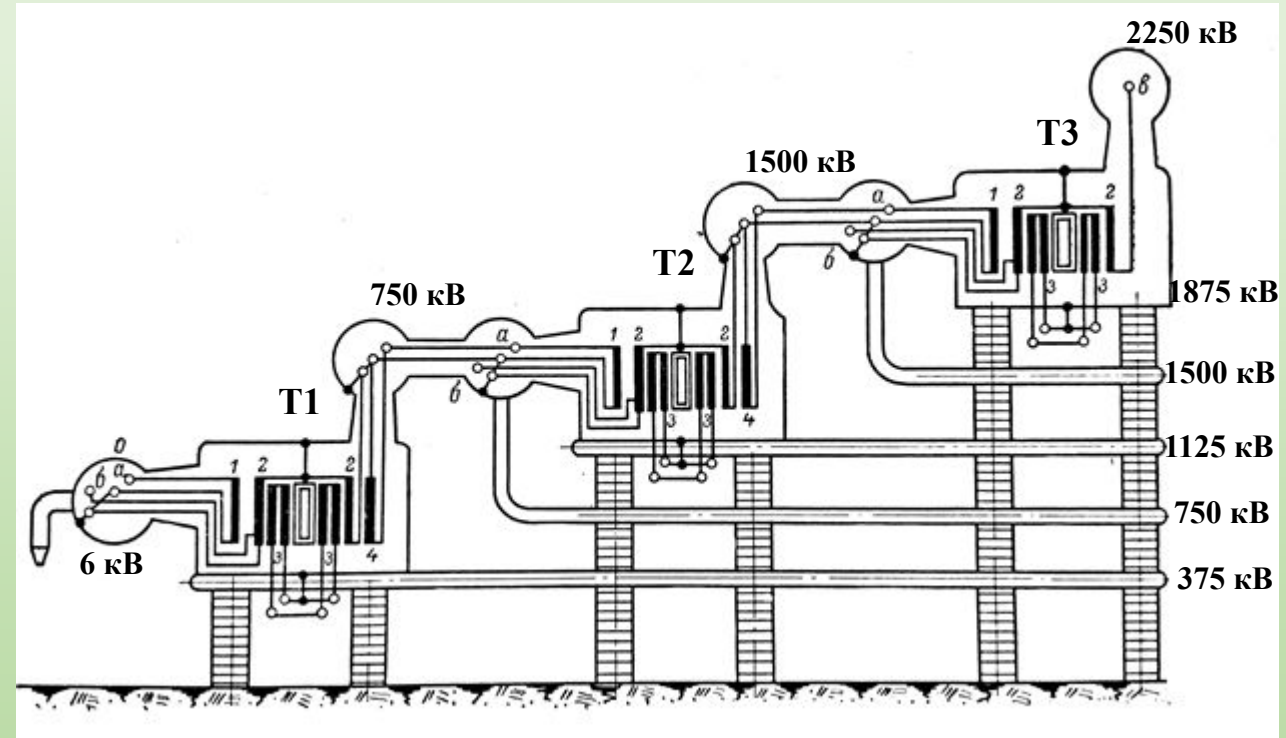
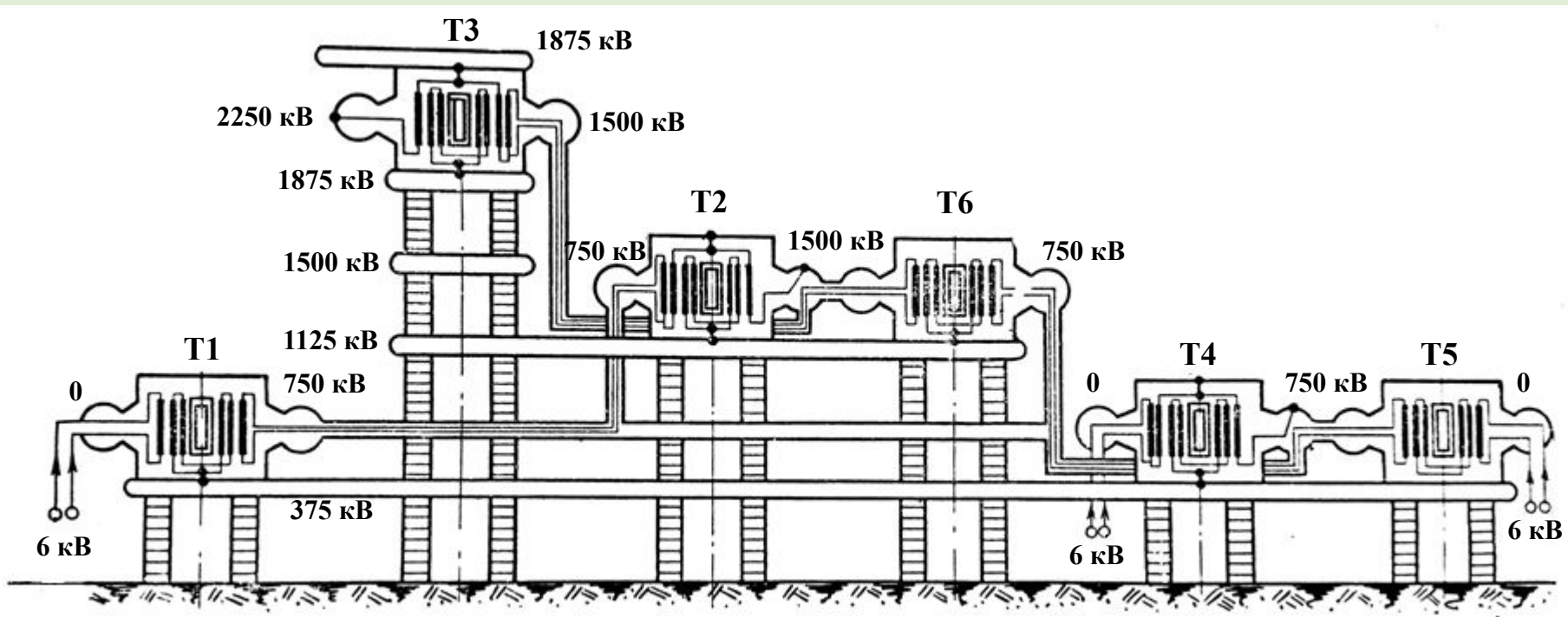


Схема каскада трансформаторов с последовательным питанием

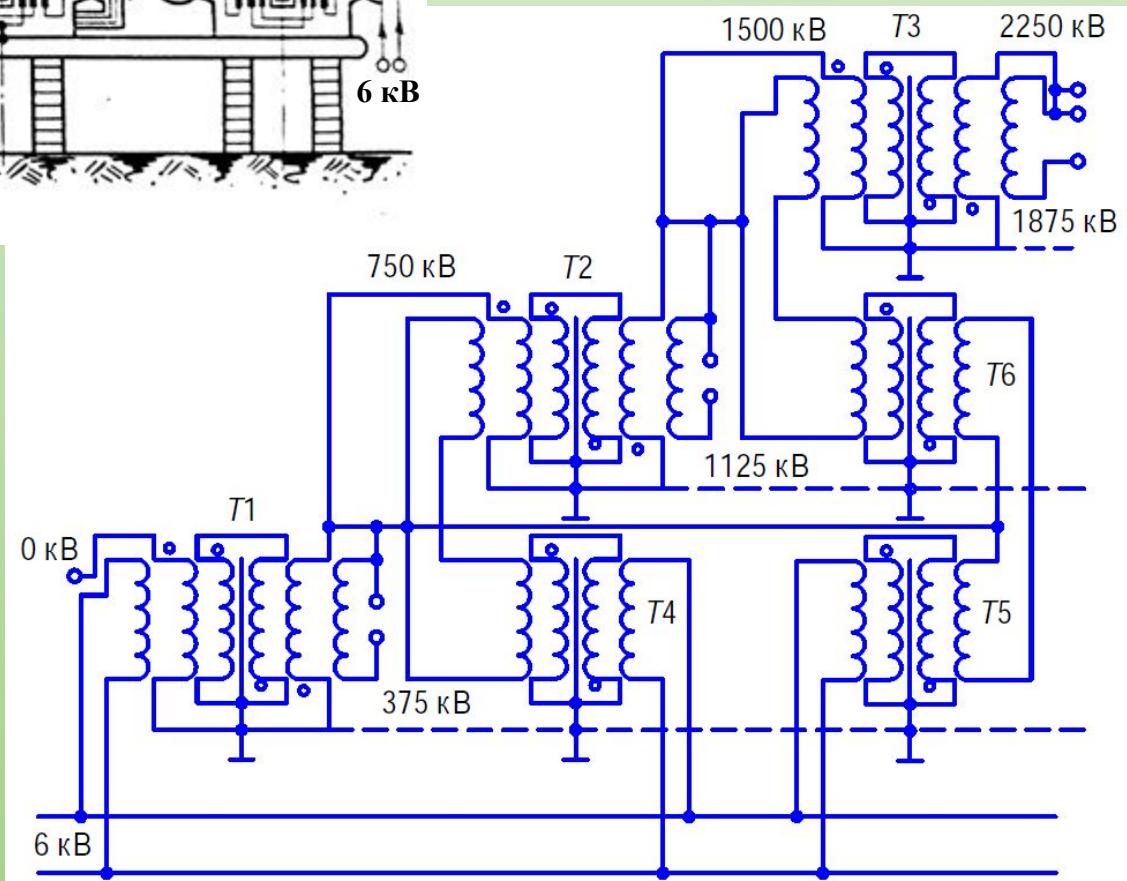


Вид испытательной установки с последовательным питанием трансформаторов



Вид испытательной установки  
с параллельным питанием  
трансформаторов

Схема каскада трансформаторов с  
параллельным питанием





3-х уровневый каскад трансформаторов  $3 \times 600$  кВ, 2 А

делитель переменного напряжения на 1500 кВ

Three-stage cascade transformer  $3 \times 600$  kV, 2 A cont. outdoor type with AC voltage divider 1500 kV

# Испытательные установки постоянного тока

$U_{\text{=}}$  используется для испытания изоляции:

- конденсаторов;
- кабелей;
- вращающихся машин.

(объекты испытаний с большой  $C$ )

Преимущества:

- нет необходимости использовать высокомошные трансформаторы;
- испытательные установки  $U_{\text{=}}$  имеют меньшие размеры по сравнению с  $U_{\text{~}}$ ;
- есть возможность измерять ток утечки.

Недостатки:

- $U$  распределяется в изоляции пропорционально  $R$ , а не обратно пропорционально  $C$ , как при  $U_{\text{~}}$ .

# Однокаскадные схемы выпрямления

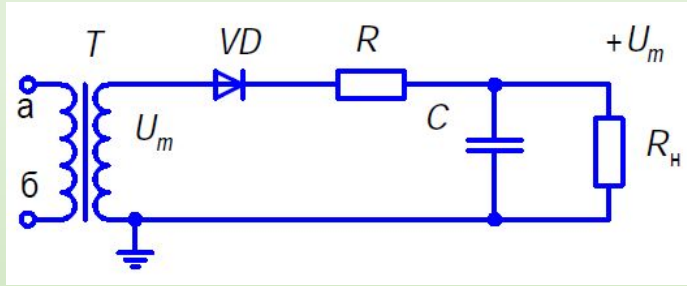


Схема однополупериодного выпрямителя

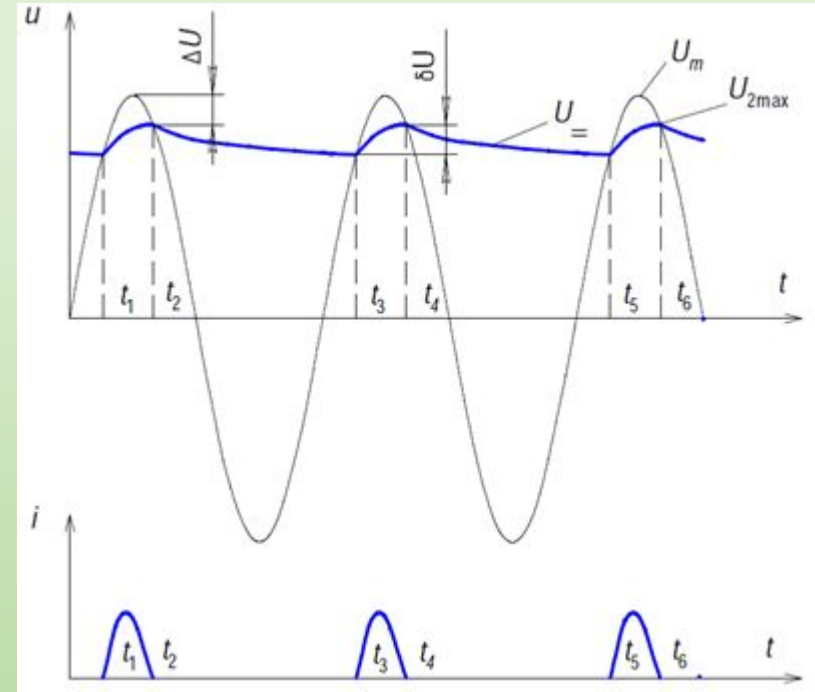
При  $R_n = \infty$

$$I = 0, \Delta U = 0, \delta U = 0, U_{\text{ср}} = U_m;$$

При  $R_n \neq \infty$

$$I \neq 0, U_{2\text{max}} < U_m \text{ на величину } \Delta U$$

$$\delta U = \frac{T}{2RC}$$



Графики напряжения и тока через вентиль

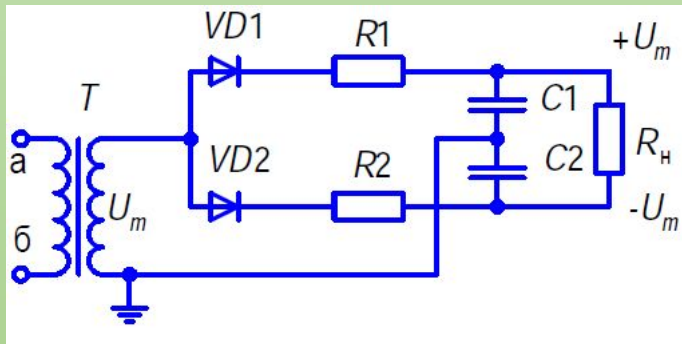


Схема удвоения напряжения с симметричным выводом

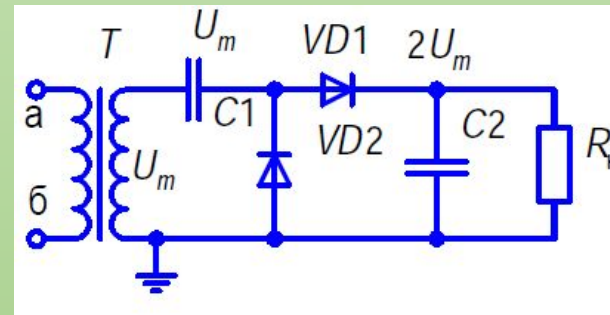


Схема выпрямителя с удвоением напряжения по отношению к земле

# Схемы умножения напряжения

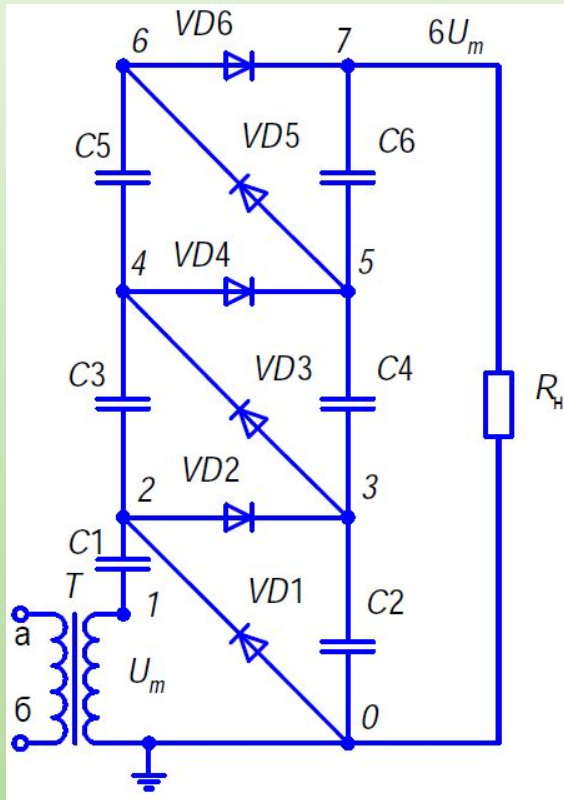
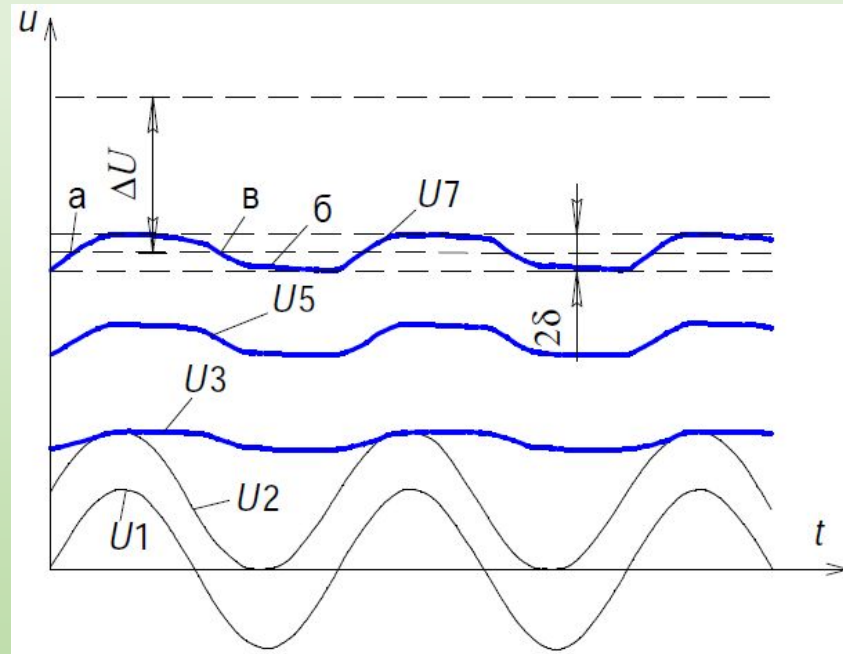


Схема однополупериодного умножителя



Пульсации напряжения на выходе схемы умножения

При  $R_n = \infty \rightarrow U_{\text{вых}} = 2n \cdot U_m$   
 $n$  – число ступеней.

При  $R_n \neq \infty$  см. рисунок  
 а – зарядка конденсаторов правой части схемы;  
 б – стекание заряда с конденсаторов на нагрузку;  
 в – подзарядка конденсаторов левой части схемы от конденсаторов правой части.

$$\Delta U = \frac{I_{cp}}{f \cdot C} \left( \frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{1}{6} n \right)$$

$$\delta U = \frac{I_{cp}}{2f \cdot C} (n+1)n$$

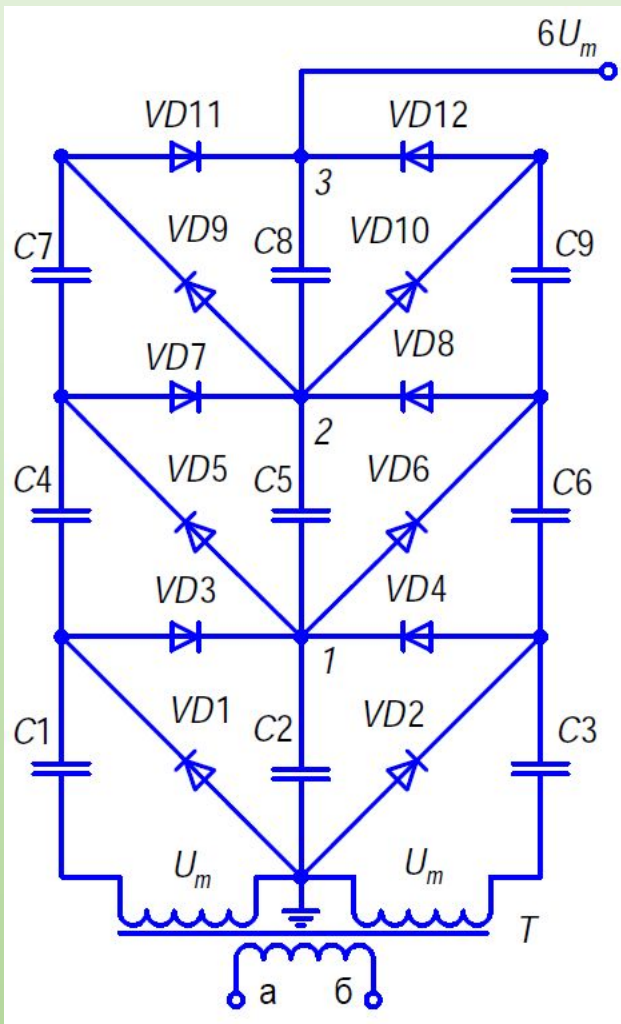


Схема двухполупериодного  
умножителя

$$\Delta U = \frac{I_{cp}}{f \cdot C} \frac{2n^2 + 3n + 6}{12}$$

$$\delta U = \frac{I_{cp}}{f \cdot C} \frac{n}{4}$$

При увеличении числа вентилей в 2 раза и конденсаторов в 1.5 раза значение  $\Delta U$  и  $\delta U$  уменьшается в 8 раз.

Еще большее снижение  $\Delta U$  и  $\delta U$  возможно при использовании параллельного соединения 3 схем при питании от 3-х фазной сети.



## Высоковольтные вентили

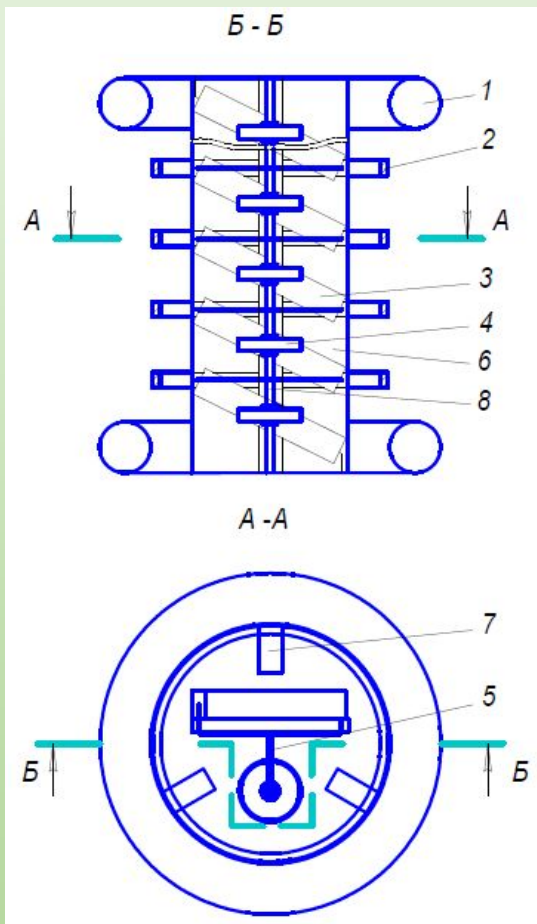


Рисунок высоковольтного вентилля

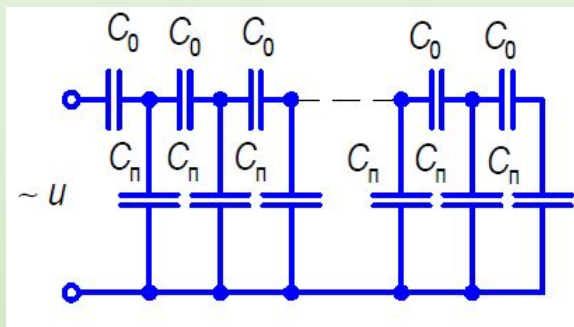


Схема замещения цепочки диодов при обратном напряжении

- 1 – торцевые экраны;
- 2 – экраны кольцевые для исключения коронного разряда на составных элементах вентилля;
- 3 – высоковольтные диоды;
- 4 – конденсаторы;
- 5 – соединительные скобы для крепления диодов и конденсаторов;
- 6 – монтажная плата из изоляционного материала;
- 7 – крепежные стойки из изоляционного материала.

$$C_0 = C_{\text{дио́да}} + C_{\text{доп}}$$

Должно быть  $C_0 \geq 3C_{\text{П}}$

$$C_{\text{П}} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{2h}{r}} \cdot \frac{1}{n}$$

- $l$  – длина вентилля;
- $h$  – расстояние до земли;
- $r$  – эквивалентный радиус вентилля;
- $n$  – количество диодов.

Испытательная установка постоянного напряжения на 2000 кВ, 10 мА



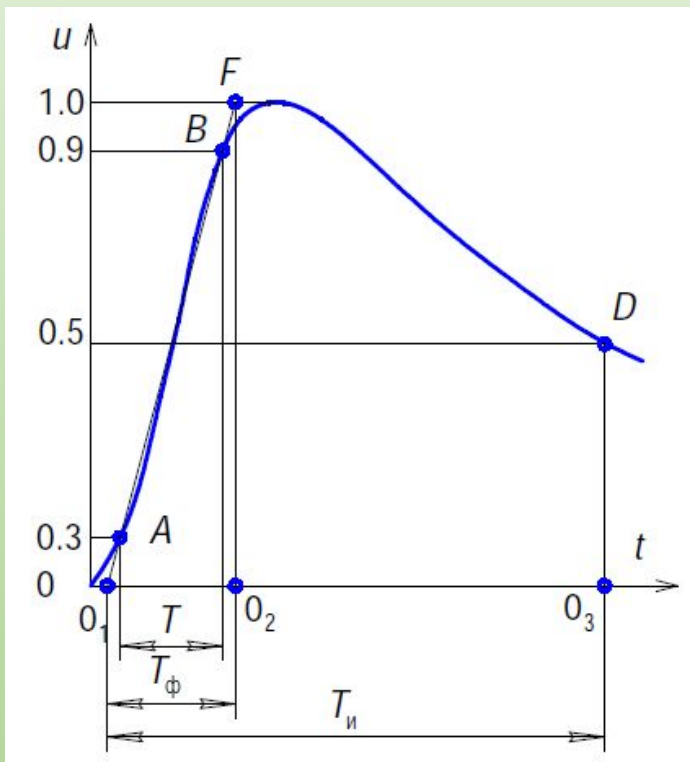
Высоковольтный измерительный резистор

DC voltage test set 2000 kV, 10 mA for testing power cables, including a HV measuring resistor and automatic grounding system (foreground)

# Генераторы импульсных напряжений

ГИН предназначены для воспроизведения импульсных воздействий грозового характера на изоляцию высоковольтного оборудования и генерирования импульсов высокого напряжения микро- и наносекундного диапазонов.

## Параметры импульсов напряжения



Стандартный полный  
грозовой импульс «1.2/50»

$T$  – время, за которое  $U$  увеличивается с 30 до 90 %;

$T_u$  – время, за которое  $U$  уменьшается на 50 %.

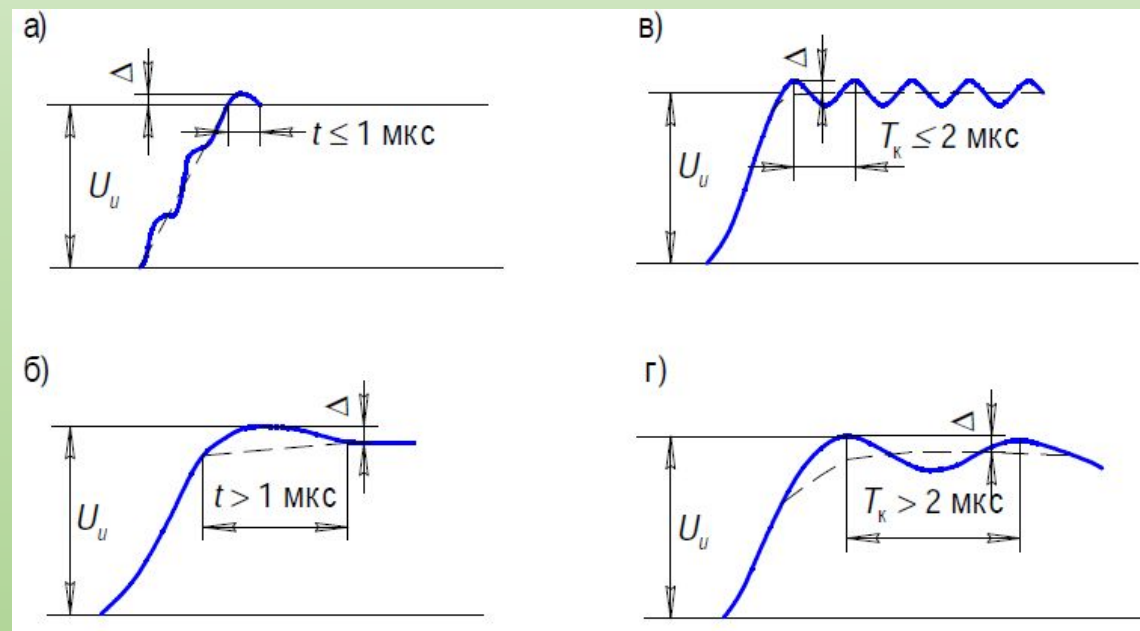
$$T_{\phi} = 1.67 T$$

$$T_{\phi} = 1.2 \pm 0.36 \text{ мкс}$$

$$T_u = 50 \pm 10 \text{ мкс}$$

а, в – тах средней линии;

б, г – тах импульса.



Определение максимального значения  
аperiodического импульса: а, б – с одиночными  
выбросами; в, г – наложенными колебаниями

Бывает еще стандартный срезанный грозовой импульс  
(на фронте или на спаде)  $T_c = 2 - 5 \text{ мкс}$

## Схемы однокаскадных ГИН

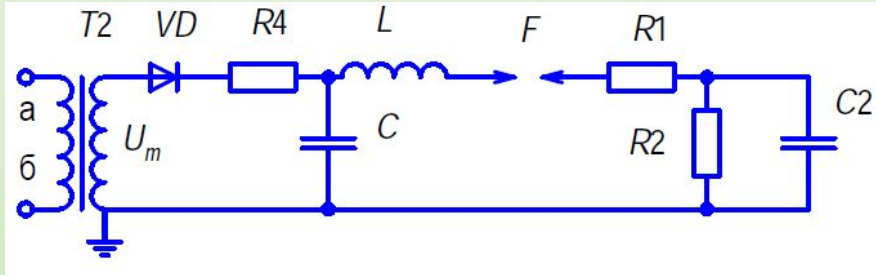


Схема одноступенчатого ГИН

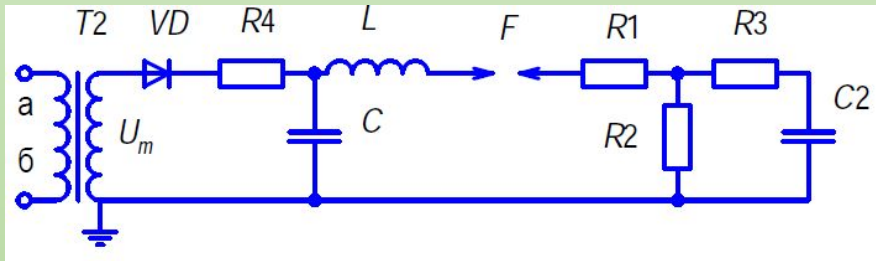


Схема одноступенчатого ГИН  
с разделенными фронтным и  
демпферным резисторами

$R_1$  устраняет ВЧ колебания  $U$ ;

$C_2$  формирует фронт импульса;

$R_2$  формирует спад импульса;

$R_4$  ограничивает зарядный ток емкости  $C$ ;

$L$  – паразитная индуктивность контура;

$F$  – искровой разрядник;

$C > C_2$  в 10 и более раз.

$$U = U_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right) \quad \text{– напряжение в контуре } C - R_1 - C_2$$

$$U = U_m e^{-\frac{t}{(R_1 + R_2)C}} \quad \text{– напряжение в контуре } C - R_1 - R_2$$

$$U_{C_2} = \frac{U_m R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{– } U_{\max} \text{ на } C_2 \text{ (амплитуда импульса)}$$

$R_1 \ll R_3 \rightarrow U_{C_2}$  во второй схеме выше

$$U_{\max} \approx 400 \text{ кВ}$$

Срезанные импульсы создаются с помощью разрядников, подключенных параллельно объекту испытания

## Схемы многокаскадных ГИН

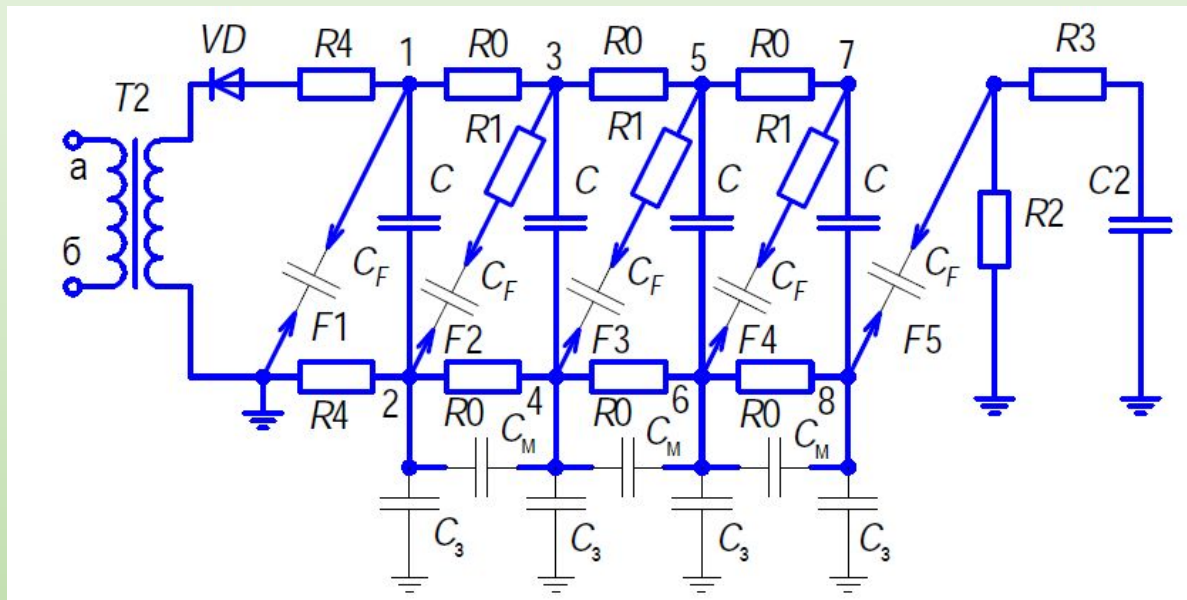


Схема многоступенчатого ГИН

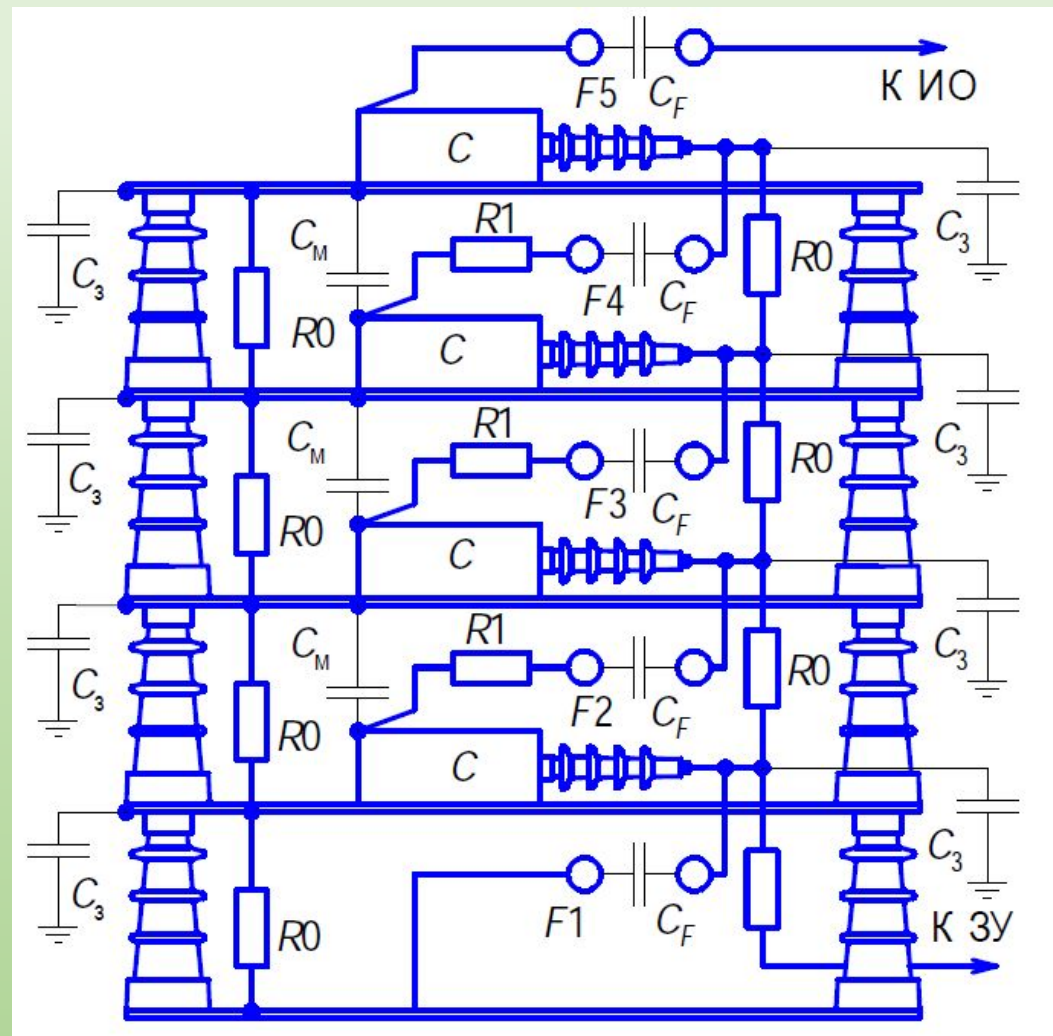
$C_F$  – емкость разрядника;

$C_M$  – емкость между этажами ГИН;

$C_3$  – емкость этажа ГИН относительно земли;

$C_{II} = C_F + C_M$  – продольная емкость.

$$K_n = n - \exp\left(-\sqrt{\frac{C_3}{C_{II}}}\right) - \text{коэффициент перенапряжения на } n \text{ разряднике}$$



Общий вид многокаскадного ГИН этажерочного типа

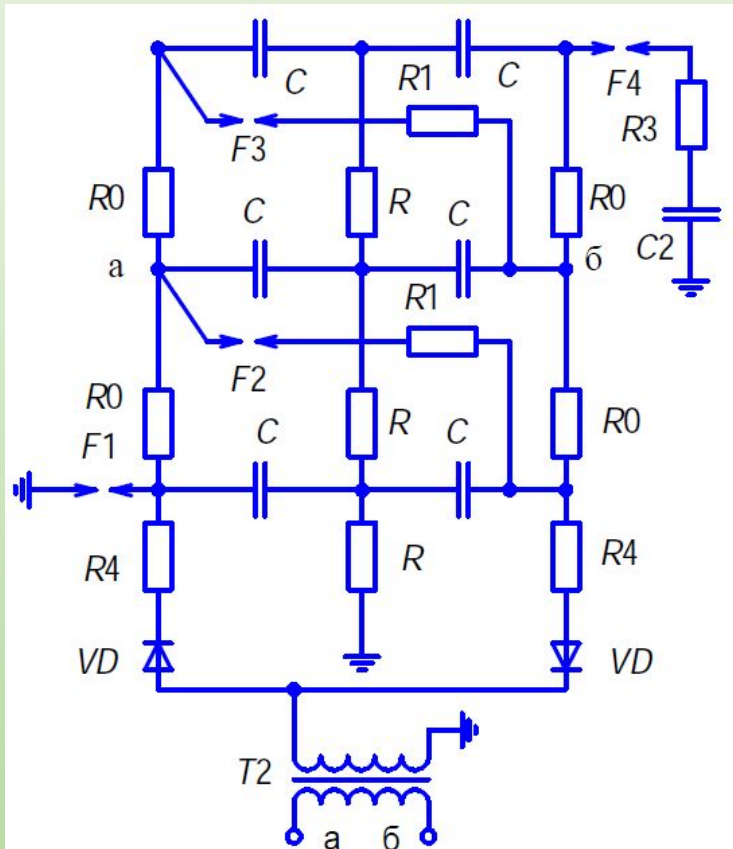
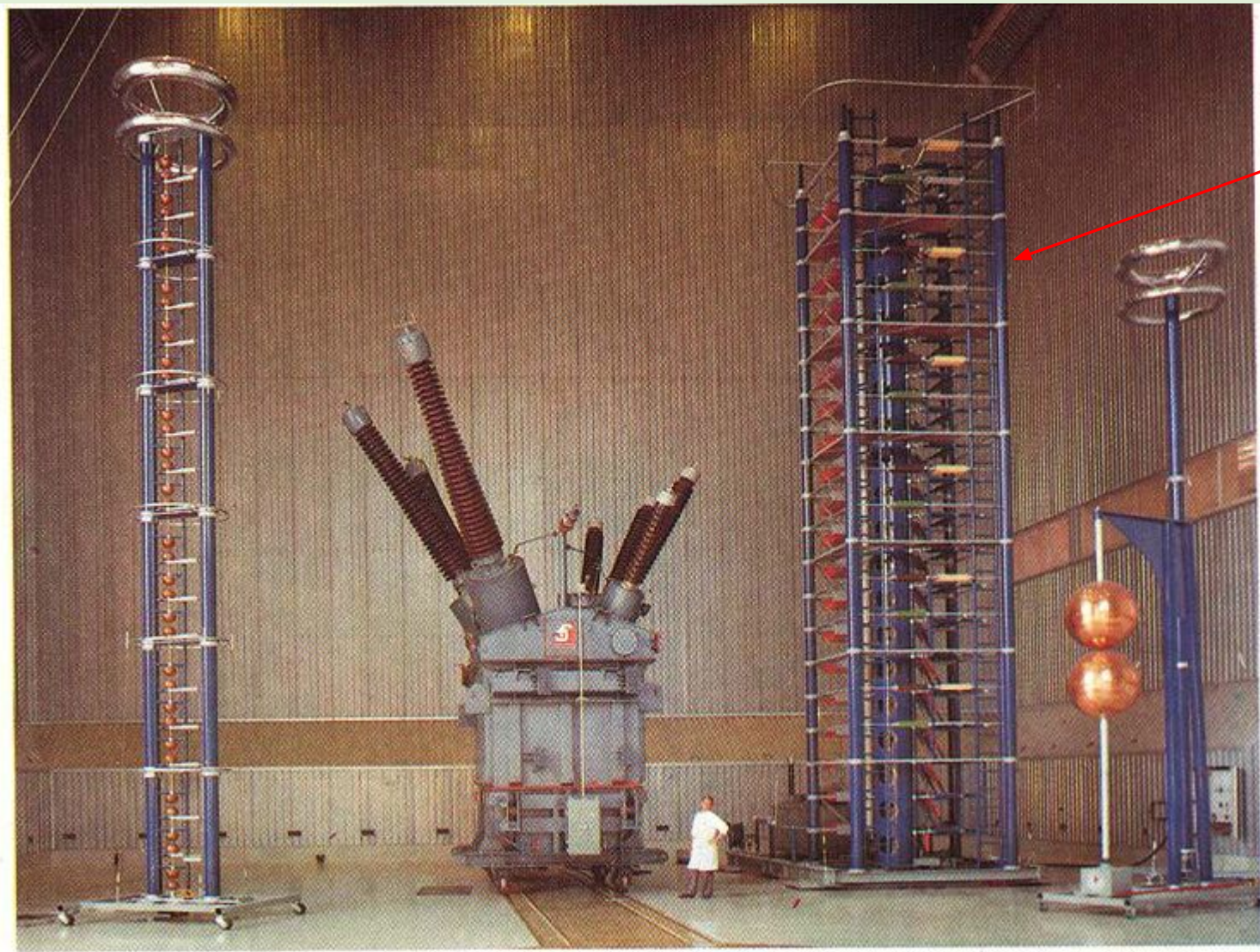


Схема многоступенчатого ГИН  
с 2 конденсаторами на ступени

Преимущества данной схемы:

- используются 2 полупериода питающего напряжения → исключается намагничивание магнитопровода трансформатора;
- напряжение на каждой ступени в 2 раза выше → большее  $U_{max}$ ;
- меньшее число разрядников по отношению к числу конденсаторов → более стабильное срабатывание.



ГИН на 4000 кВ

# Конструкции ГИН

ГИН используются:

- для исследований и испытаний электрической изоляции;
- в качестве источников высокого напряжения в физических лабораториях при изучении ядерных процессов;
- в медицинских лабораториях для терапевтических целей;
- в импульсной рентгенографии;
- в нефтяной промышленности для удаления некоторых эмульсий;
- в горной и горнодобывающей промышленности для разрушения горных пород и обогащения полезных ископаемых.

Различные конструкции ГИН:

- для работы в помещениях или на открытом воздухе;
- стационарные или передвижные;
- опорные или подвесные.

Требования к ГИН:

- малую индуктивность разрядного контура;
- малый вес;
- доступность обслуживания и ремонта;
- возможность регулировки формы и амплитуды импульса;
- возможность переоборудования с целью увеличения амплитуды импульса или емкости в разряде.



## Основные параметры ГИН:

- максимальная амплитуда импульса;

$$U_m = U \cdot n \cdot \eta$$

- емкость при разряде;

$$C_p = \frac{C_k}{n}$$

- величина запасаемой энергии;

$$W_{\Gamma} = \frac{C_p \cdot U^2}{2}$$

- удельная энергия;

$$W_{y\partial} = \frac{W_{\Gamma}}{V}$$

$n$  – число ступеней ГИН;

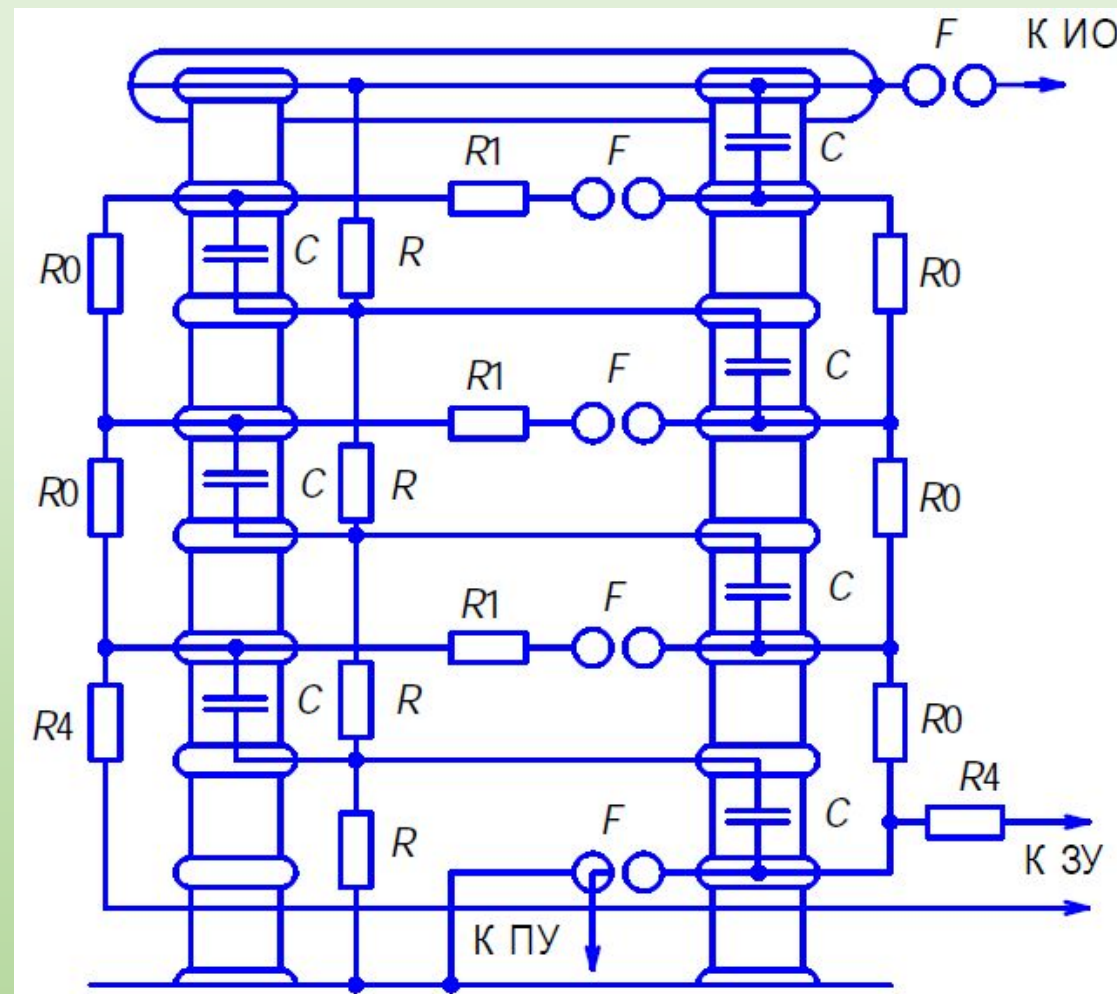
$\eta$  – коэффициент использования зарядного напряжения;

$C_k$  – емкость одного конденсатора;

$V$  – объем всех элементов ГИН.

## Типы многокаскадных ГИН:

- лестничные ( $W_{y\partial} = 0.01 - 0.5$  кДж/м<sup>3</sup>);
- этажерочные ( $W_{y\partial} = 0.2 - 1.2$  кДж/м<sup>3</sup>);
- башенные ( $W_{y\partial} = 0.5 - 3.5$  кДж/м<sup>3</sup>);
- колонные ( $W_{y\partial} = 1 - 4$  кДж/м<sup>3</sup>).

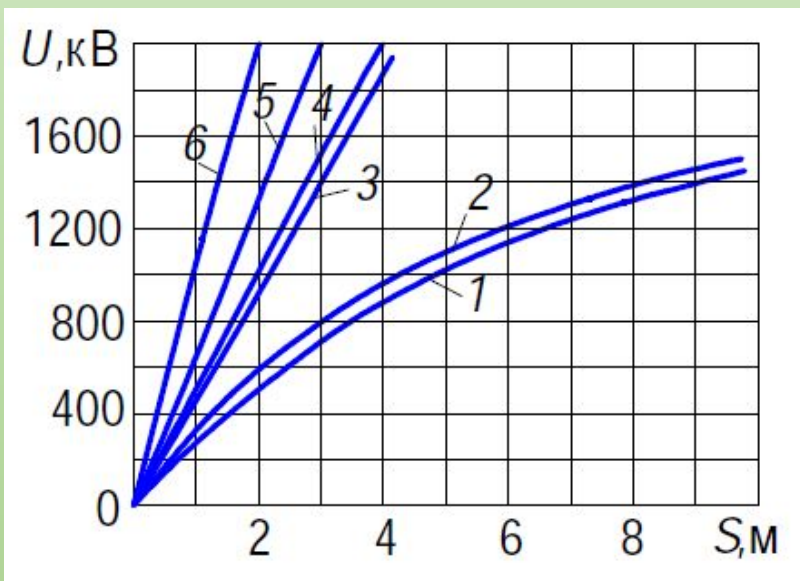


Общий вид многокаскадного  
ГИН колонного типа

## Размещение ГИИ в высоковольтном зале

Минимальное расстояние между высоковольтными установками и расстояние до объектов с нулевым потенциалом:

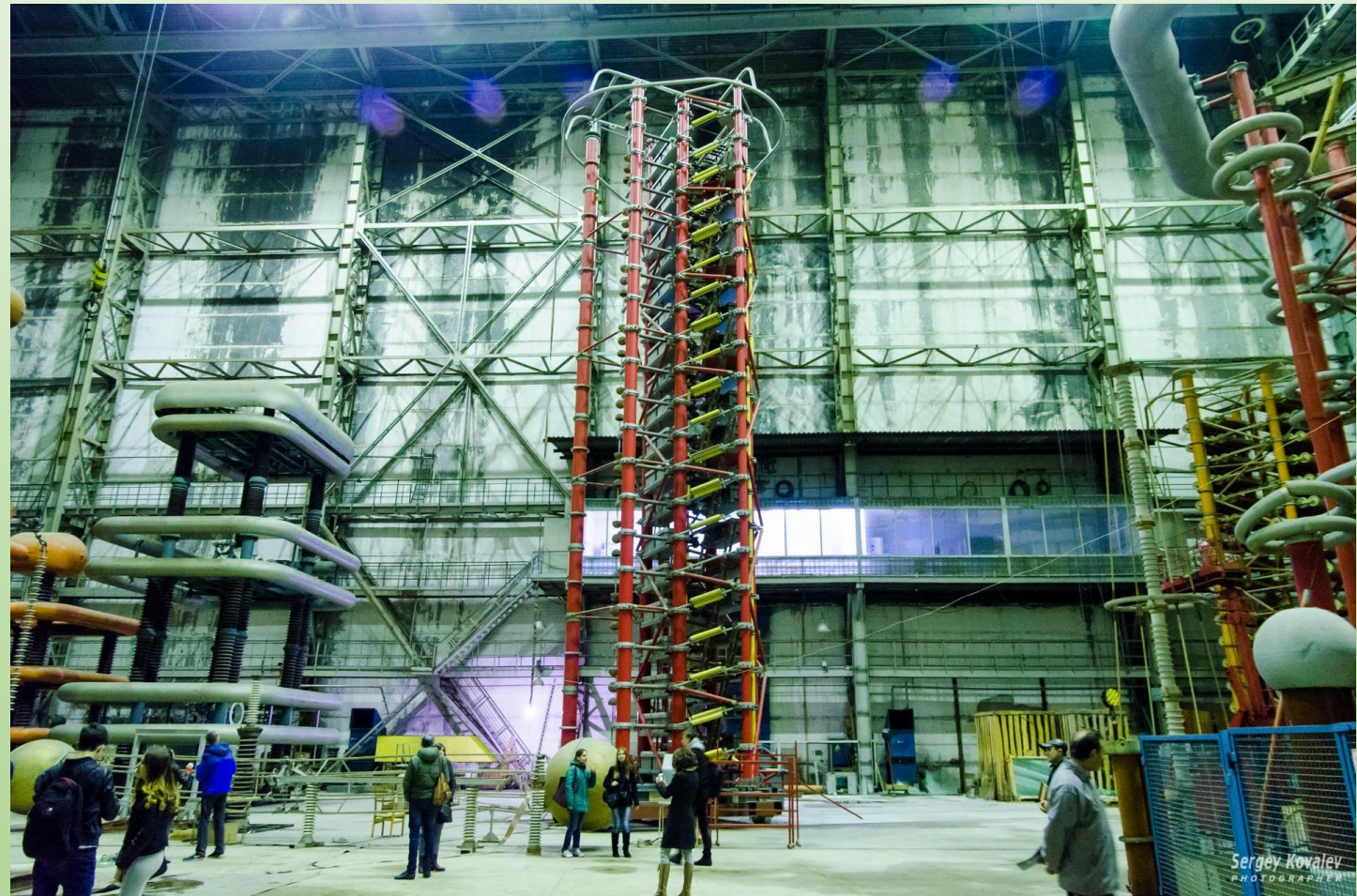
- до 1000 кВ
  - переменное  $U$  50 Гц – 350 кВ/м;
  - постоянное  $U$  – 400 кВ/м;
  - импульсное  $U$  – 500 кВ/м;
- выше 1000 кВ
  - см. рисунок ☺



- 1 – переменное  $U$  ( $f = 50$  Гц);
- 2 – импульсное  $U$  с длительностью фронта 2500 – 3000 мкс;
- 3 – импульсное  $U$  «1.2/50» положительной полярности;
- 4 – импульсное  $U$  «1.2/50» отрицательной полярности;
- 5 – постоянное  $U$  положительной полярности;
- 6 – постоянное  $U$  положительной полярности.

Минимальные расстояния до  
высоковольтных установок

## Высоковольтные испытательные залы

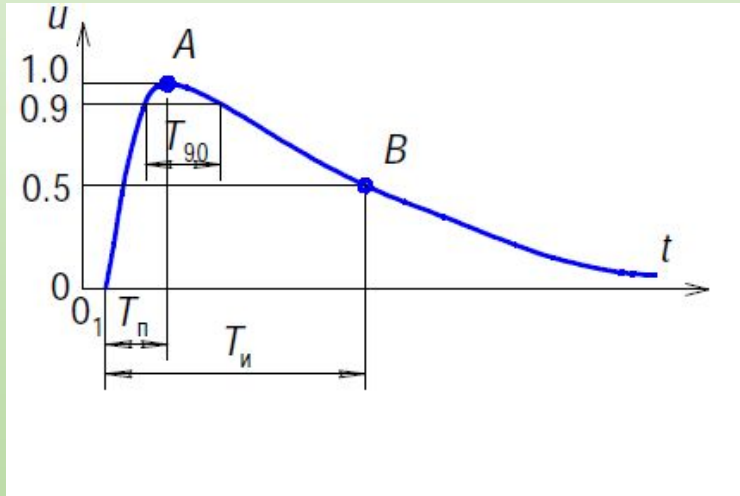


# Генераторы коммутационных импульсов

Коммутационные (внутренние) перенапряжения – наиболее частые перенапряжения в изоляции электрооборудования с рабочим напряжением 300 кВ и выше.

Генераторы коммутационных импульсов (ГКИ) = генераторы внутренних перенапряжений (ГВП).

## Параметры коммутационных импульсов напряжения



Апериодический

«250/2500»

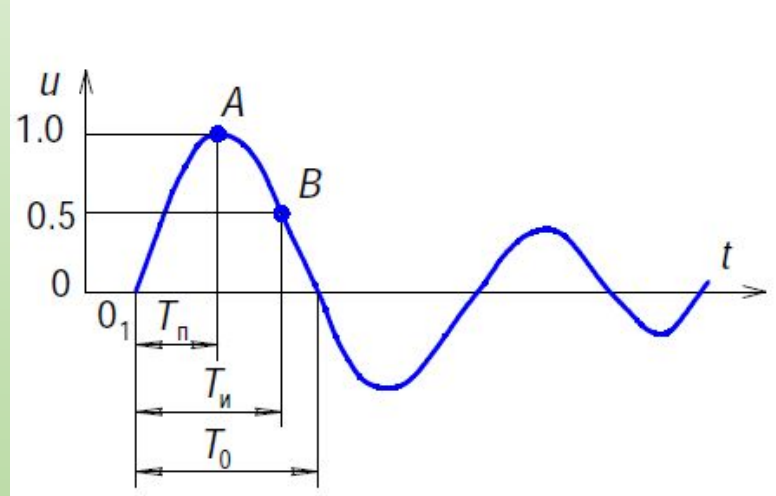
$$T_{\text{п}} = 250 \pm 50 \text{ мкс}$$

$$T_{\text{и}} = 2500 \pm 750 \text{ мкс}$$

Используют также:

«100/2500», «500/2500», «1000/5000».

$$T_{\text{п}} \pm 20 \%, T_{\text{и}} \pm 30 \%, U_m \pm 3 \%$$

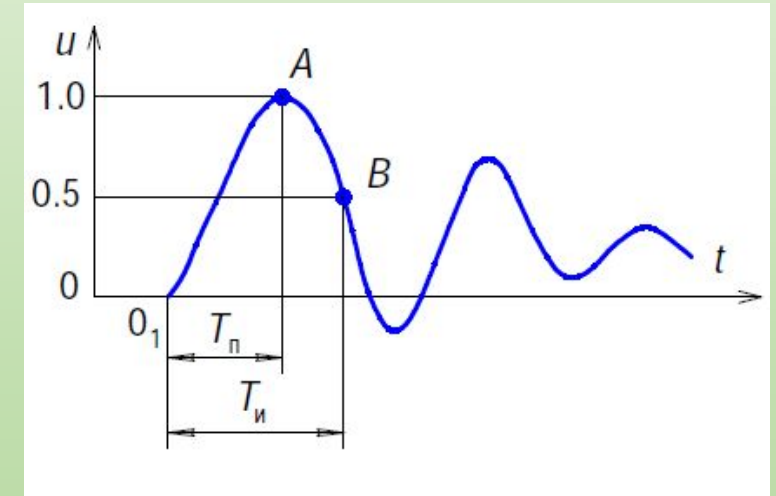


Колебательный (затухающие колебания вблизи нулевого значения)

«4000/7500»

$$T_{\text{п}} = 4000 \pm 1000 \text{ мкс}$$

$$T_{\text{и}} = 7500 \pm 2500 \text{ мкс}$$



Колебательный (затухающие колебания вблизи более низкой частоты)

«20/500»

$$T_{\text{п}} \geq 20 \text{ мкс}$$

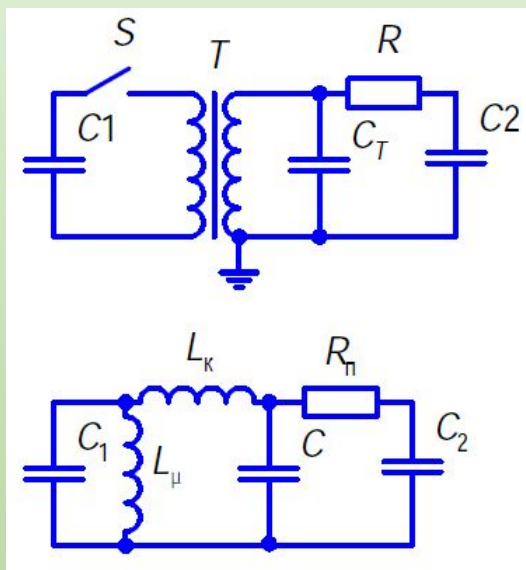
$$T_0 \geq 500 \text{ мкс}$$

$$T_{90} \geq 200 \text{ мкс}$$

## Схемы генераторов коммутационных импульсов

Апериодические коммутационные импульсы получают с помощью ГИН (используются большие  $C$  и  $R$ ).

Схемы колебательных коммутационных импульсов:



$C_2$  – емкость испытуемого объекта;

$C_T$  – емкость испытательного трансформатора;

$R$  – резистор, регулирующий время подъема импульса;

$L_k$  – индуктивность КЗ трансформатора (формирует время подъема);

$L_\mu$  – индуктивность ХХ трансформатора (формирует длительность импульса).

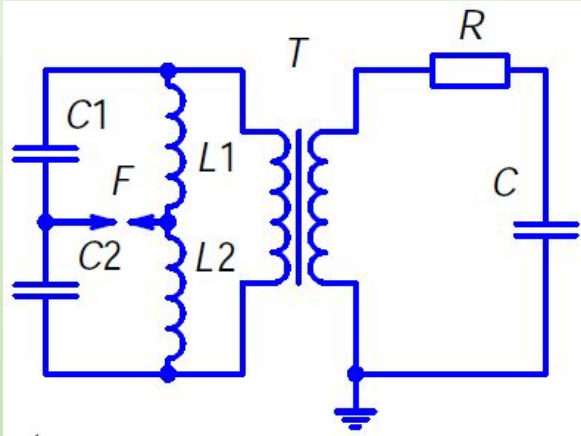
Трансформатор имеет разное значение  $L$ , т.к.  $\mu = f(H)$ .

ГКИ на основе трансформатора,  
возбуждаемого разрядом конденсаторной батареей

Недостатки данной схемы:

- трудность регулирования длительности импульса;
- низкий коэффициент использования зарядного  $U$ ;
- невозможность применения, когда по условиям испытания требуется ограничение напряжения второго полупериода по сравнению с первым.

Схема формирования затухающих колебаний вблизи нулевого значения



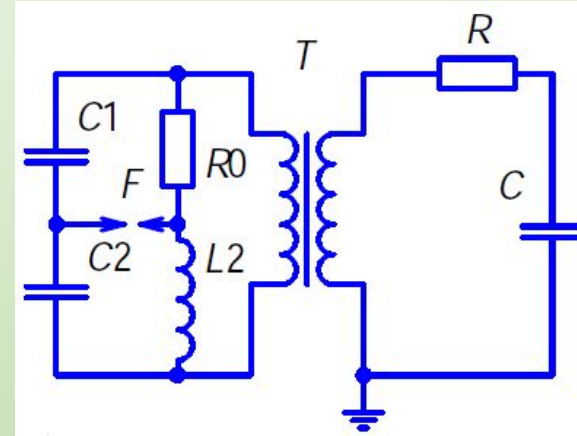
ГКИ на основе двух колебательных контуров и трансформатора

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad \text{— частота колебательных контуров.}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

Большая  $f$  определяет  $T_{пр}$ ,  
меньшая  $f$  определяет  $T_{ит}$

Схема формирования затухающих колебаний вблизи более низкой частоты



ГКИ на основе колебательного контура, контура апериодического разряда и трансформатора

Преимущества данных схем:

- возможность регулирования формы  $U$  в широких пределах;
- более высокий коэффициент использования зарядного  $U$ .

# Схемы для испытания коммутационной и пропускной способностей электрических аппаратов

## Генератор импульсных токов (ГИТ)

Применение ГИТ:

- имитация токов молнии ( $10^4 - 10^5$  А);
- исследование пропускной способности коммутационных аппаратов;
- исследование термических и электрохимических воздействий импульсных токов на элементы электрооборудования.

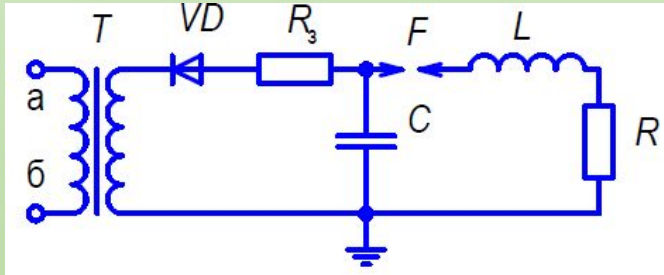


Схема ГИТ

$$R \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ — апериодический разряд.}$$

$$t_m = \frac{2L}{R} = \sqrt{LC} \quad I_m = \frac{U_c}{\sqrt{L}} \cdot \frac{1}{e}$$

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ — колебательный разряд.}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad I_m = \frac{U_c}{\sqrt{L}}$$

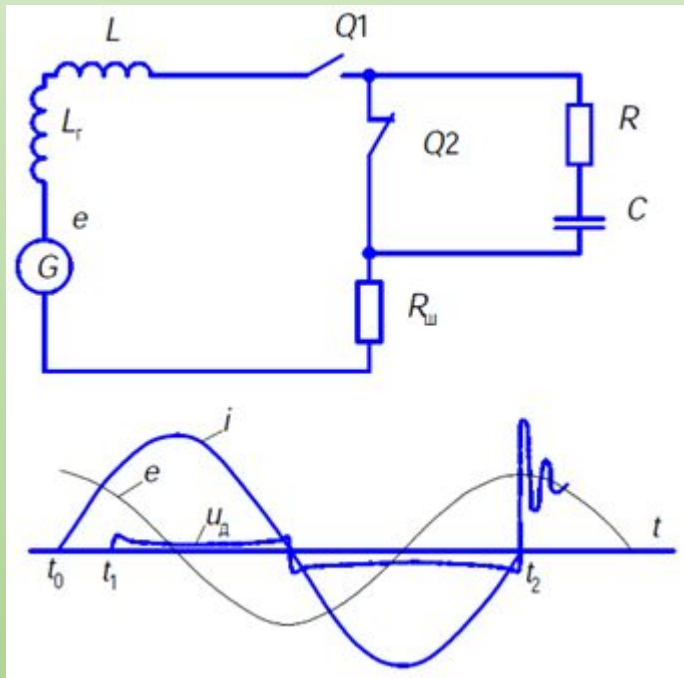
## Схемы для испытания высоковольтных выключателей на отключающую способность

Особенности:

- проектирование коммутационного оборудования невозможно без проведения экспериментальных исследований;
- выключатели должны отключать токи КЗ ~ десятки – сотни кА.

Сложности:

- нельзя для проверки подключить коммутационное оборудование к действующей сети;
- создание необходимой нагрузки на исследуемом оборудовании.



$G$  – ударный генератор;

$L_G$  – индуктивность генератора;

$L$  – внешняя индуктивность (реактор);

$t_0$  – момент замыкания контакта  $Q_1$ ;

$t_1$  – момент размыкания контакта  $Q_2$ ;

$t_2$  – момент погасания дуги и восстановление напряжения на контакте  $Q_2$ ;

$u_d$  – напряжение дуги в контакте  $Q_2$ ;

$R$  и  $C$  регулируют форму восстановленного напряжения на разомкнутом контакте  $Q_2$ ;

$R_{ш}$  – токовый шунт для измерения осциллограммы тока,

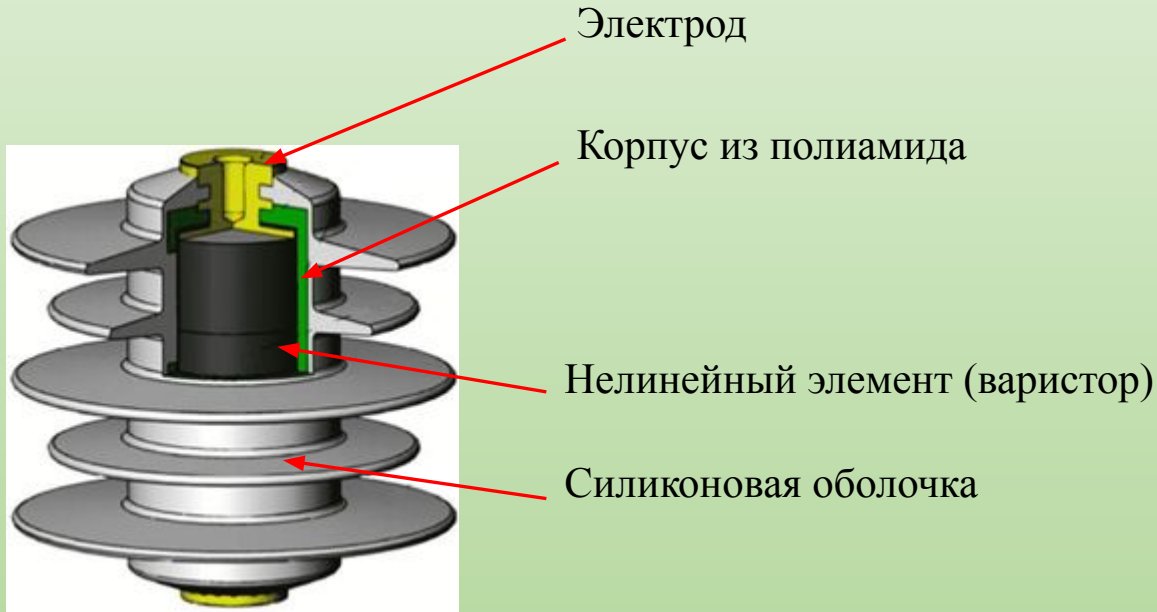
$Q_2$  – испытуемый контакт.

Схема испытания высоковольтных выключателей с применением ударного генератора



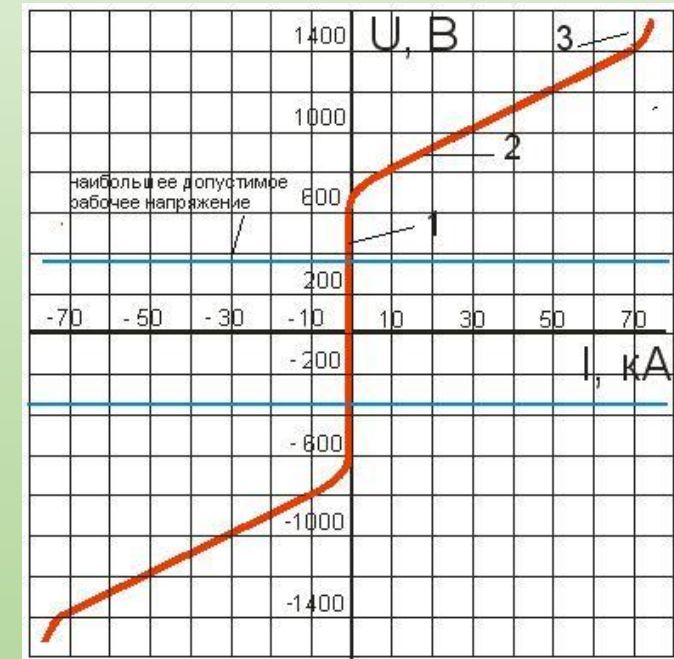
## Схемы для исследования пропускной способности нелинейных ограничителей перенапряжений

ОПН – электрический аппарат, предназначенный для защиты оборудования систем электроснабжения от коммутационных и грозовых перенапряжений. ОПН также можно назвать разрядником без искровых промежутков.



Устройство ОПН

Варистор изготавливают из  $ZnO$  + оксиды других Me (Bi, Sb, Co, Mn, Ni, Cr, Si).



Вольт-амперная  
характеристика ОПН

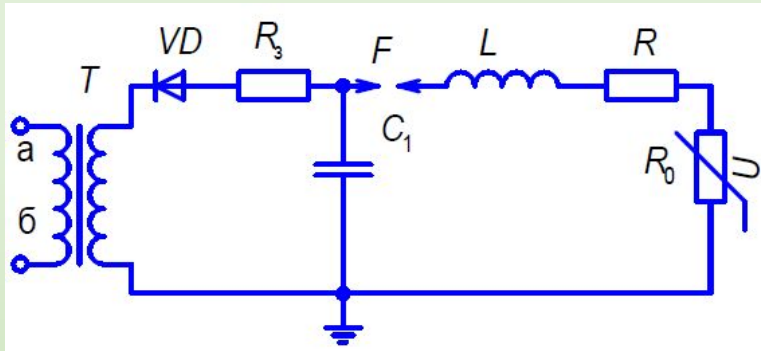
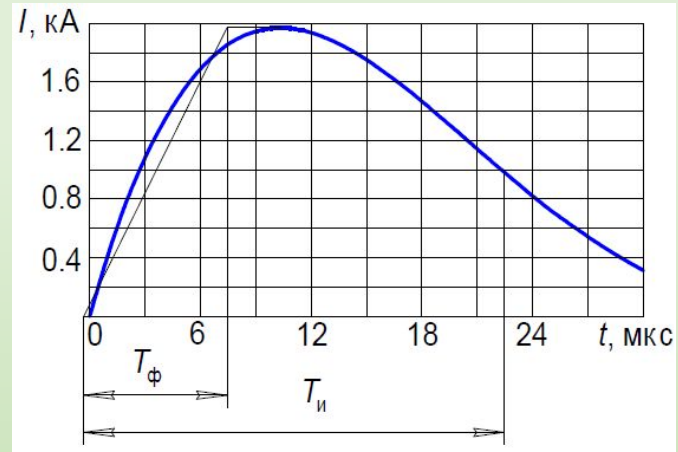


Схема испытания аperiodическим импульсом тока



Форма импульса тока «8/20»

«8/20»

$$T_{\Phi} = 8 \pm 1 \text{ мкс}$$

$$T_{И} = 20 \pm 2 \text{ мкс}$$

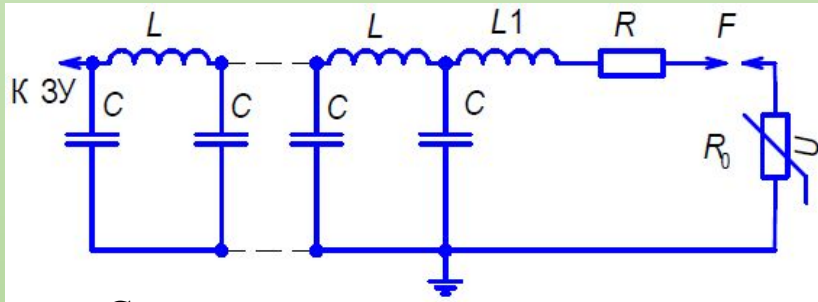
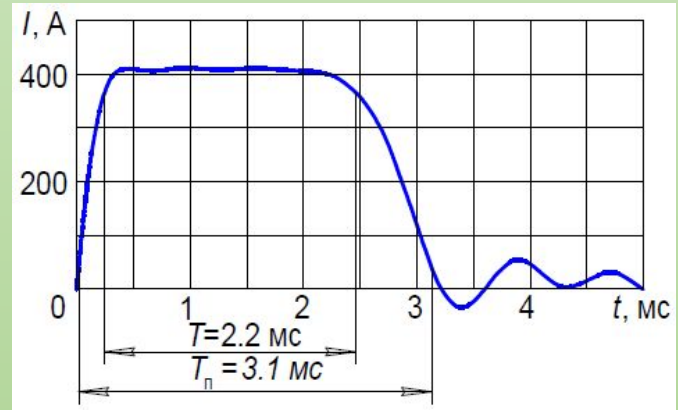


Схема испытания прямоугольным импульсом тока



Форма прямоугольного импульса тока

$T$  – условная длительность

$$I > 90 \% I_{max}$$

$T_{И}$  – полная длительность

$$I > 10 \% I_{max}$$

$$T_{И} - T < 1 \text{ мс}$$

# Измерение установившихся значений высокого напряжения

## Электростатические киловольтметры

Типы электростатических киловольтметров:

- абсолютные;
- технические.

$$F = \left( \frac{\partial W_E}{\partial x} \right)_{U=\text{const}} \quad \text{— сила взаимодействия проводников в электростатическом поле.}$$

$$W_E = \frac{CU^2}{2} \quad \rightarrow \quad F = \frac{U^2}{2} \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{x} \quad \rightarrow \quad F = \frac{\partial W_E}{\partial x} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2x} U^2 = kU^2$$

Преимущества:

- максимальное измеряемое напряжение 300 – 400 кВ;
- низкая погрешность измерения (0.01 – 0.4 %).

Недостатки:

- сложное и неудобное измерение.

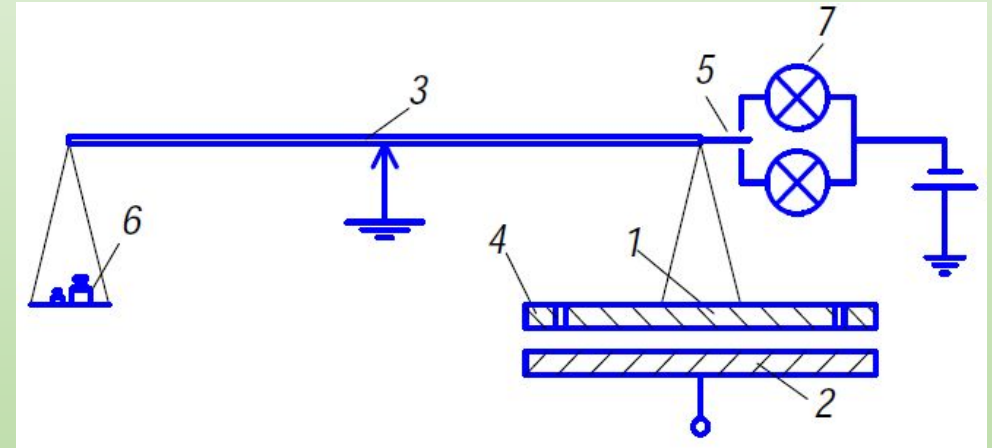
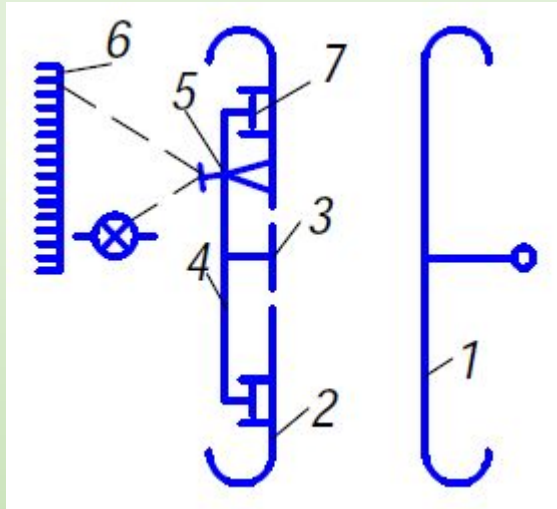


Схема абсолютного электростатического киловольтметра

- 1 – подвижный электрод;
- 2 – неподвижный электрод;
- 3 – коромысло;
- 4 – охранное кольцо;
- 5 – контактная система;
- 6 – гирьки;
- 7 – сигнальные лампы.

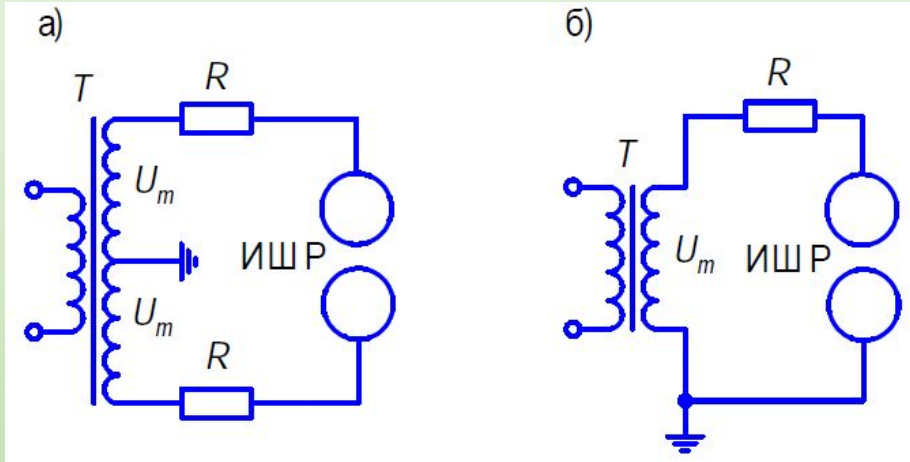


- 1, 2 – неподвижные электроды;
- 3 – подвижный электрод;
- 4 – коромысло;
- 5 – ось вращения;
- 6 – шкала и световой указатель;
- 7 – воздушный демпфер.

Схема технического электростатического киловольтметра с вращательным движением подвижного электрода

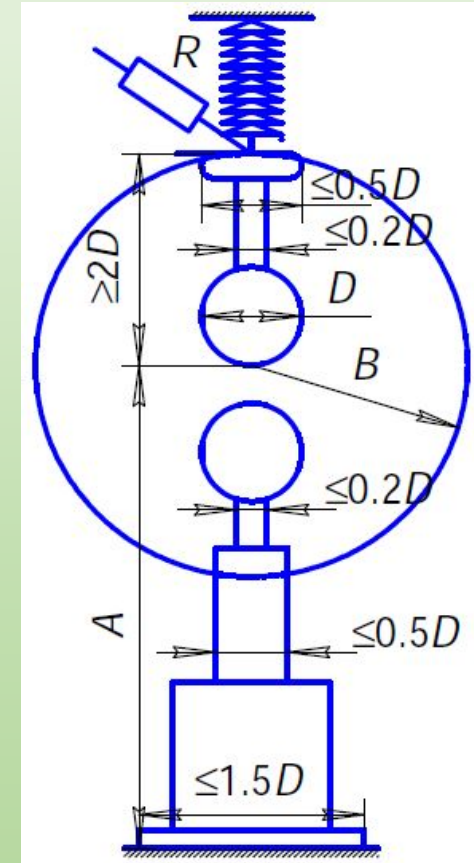
- Также бывают электростатические киловольтметры с поступательным движением подвижного электрода (конструкция и принцип действия аналогичны).
- Главное преимущество всех киловольтметров – высокое внутренне сопротивление ( $R \sim 10^{15} \Omega$ ).

## Измерение высокого напряжения шаровым разрядником



Схемы включения измерительного шарового разрядника:  
а – симметричная; б – несимметричная

- Широкий диапазон измеряемых напряжений (десятки – тысячи кВ);
- Погрешность измерения  $\pm 3\%$ .



Расположение измерительного шарового разрядника

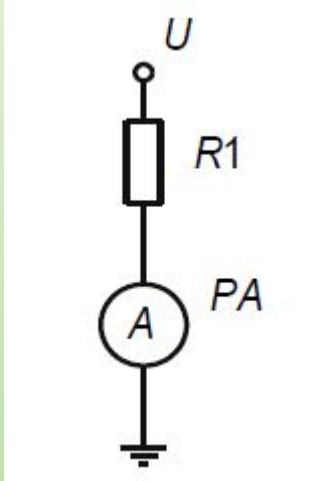
Необходимые условия при измерении напряжения шаровыми разрядниками:

1. Минимальное расстояние от точки с максимальной  $E$  до земли и окружающих предметов;
2. Удаленность соединительных проводов от шаровых электродов;
3. Правильный диаметр электродов в зависимости от расстояния между ними ( $0.05 D \leq S \leq 0.5$  (или  $0.75) D$ );
4. Сопротивление защитного резистора  $1 - 10 \Omega/V$ ;
5. Рабочее состояние электродов.

Диаметр шара $D$ , см	Высота подвески верхнего шара $A$	Наименьшее допустимое расстояние $B$	
		$S \leq 0.5 D$	$0.5 D < S < 0.75 D$
До 6.25	$(7 - 9) D$	$14S$	$7D$
10 - 15	$(6 - 8) D$	$12S$	$6D$
25	$(5 - 7) D$	$10S$	$5D$
50 - 75	$(4 - 6) D$	$8S$	$4D$
100	$(3.5 - 5) D$	$7$	$3.5D$
150 - 200	$(3 - 4) D$	$6S$	$3$

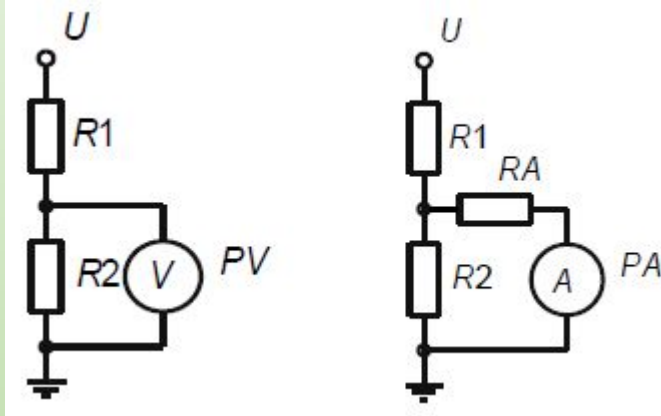
- Необходимо делать поправку на температуру, давление и влажность воздуха.

## Измерение высокого напряжения постоянного тока низковольтными приборами с дополнительными резисторами



$$U = IR_1$$

Схема измерения высокого напряжения постоянного тока низковольтным прибором с добавочным резистором



Схемы измерения высокого напряжения постоянного тока с помощью электростатического вольтметра

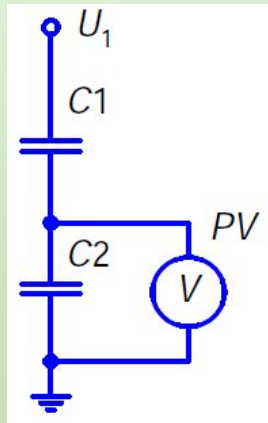
$$U = U_{R2}K$$

$$U = IR_{\text{д}}K$$

$$K_{\text{д}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ — коэффициент деления}$$

- Сопротивление  $R_1$  — цепочка резисторов ( $R = 0.5 - 1 \text{ М}\Omega$ ,  $U = 0.5 - 1 \text{ кВ/шт.}$ );
- $I_{\text{max}} \leq 100 \text{ мкА}$ .

## Измерение высокого напряжения переменного тока низковольтными приборами с делителями напряжения



Схемы измерения высокого  
напряжения переменного тока с  
помощью емкостного делителя  
напряжения

$$U = U_{д2} K$$

$$K_{д} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \text{ — коэффициент деления емкостного делителя напряжения.}$$

В качестве верхнего плеча делителя  $C_1$  могут быть использованы:

- высоковольтные конденсаторы;
- электродные системы (шар-шар, плоскость-плоскость);
- опорные или подвесные изоляторы.

Электродная система шар-шар  $d = 12.5 \text{ см}$ ,  $S = 10 \text{ см} \rightarrow C \approx 5 \text{ пФ}$ .

Гирлянда из 6 изоляторов  $\rightarrow C \approx 6 \text{ пФ}$ .



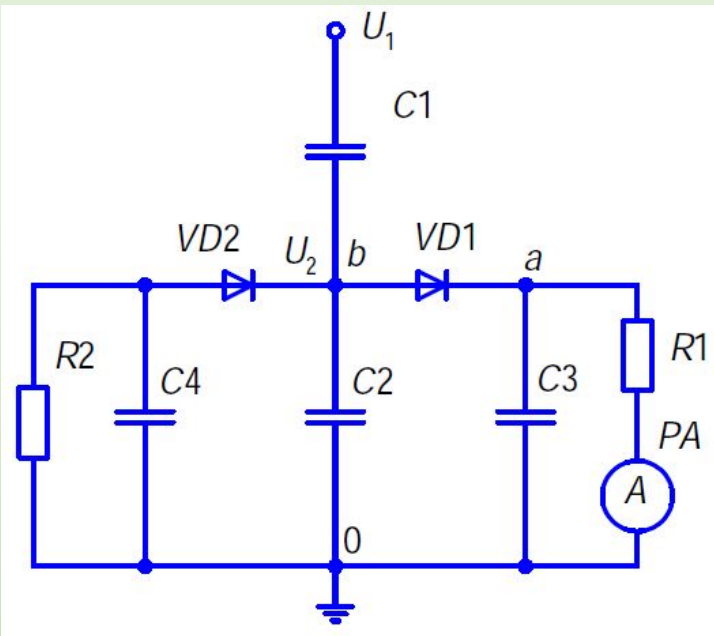
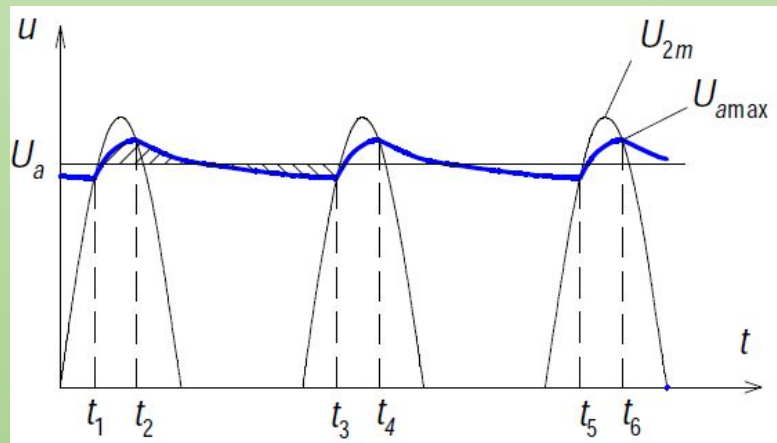


Схема измерения амплитудного значения высокого напряжения переменного тока



Форма напряжения на нижнем плече делителя

$C_1, C_2$  – емкостной делитель;  
 $VD_1, VD_2$  – полупроводниковые диоды;  
 $C_3$  – измерительная емкость;  
 $R_2, C_4$  – симметрирующие схему элементы;  
 $R_1$  – дополнительный резистор;  
 $PA$  – измерительный прибор.

$$U_1 = IK_D$$

$$K_D = \frac{C_1}{C_1 + C_2} R_1$$

$\tau = R_1 C_3$  – постоянная времени.

Если  $\tau = 1$  с  $\rightarrow$  погрешность измерения  $\sim 1\%$ .

Измерение  $U$  в точках (a) и (b) дает возможность проверить синусоидальность измеряемого напряжения.

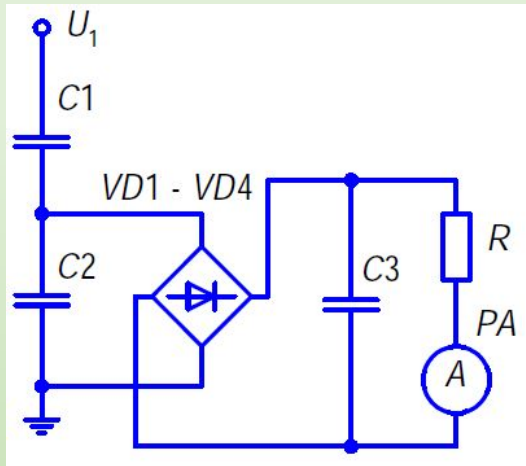


Схема измерения высокого напряжения переменного тока с использованием диодных мостов

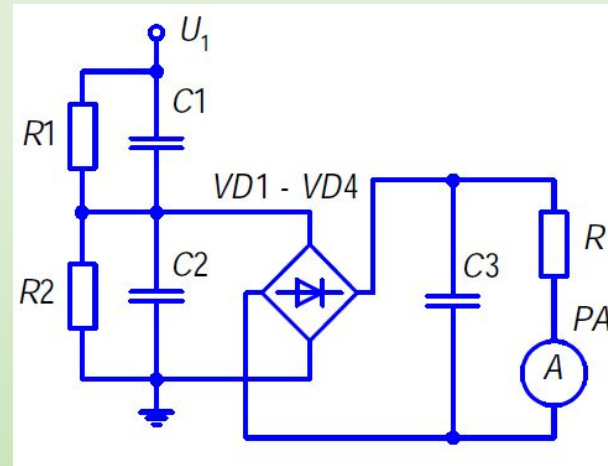


Схема измерения высокого напряжения переменного и постоянного токов

$VD_1 - VD_2$  – двухполупериодный выпрямитель.

$R_1 C_1 = R_2 C_2$  – условие равенства коэффициентов деления при  $U_{\sim}$  и  $U_{=}$

# Измерение импульсного высокого напряжения

## Измерение максимального значения

Измерение только максимального значения импульсного  $U$  достаточно при проведении массового контроля выпускаемого заводом оборудования (ограничители перенапряжений, разрядники)

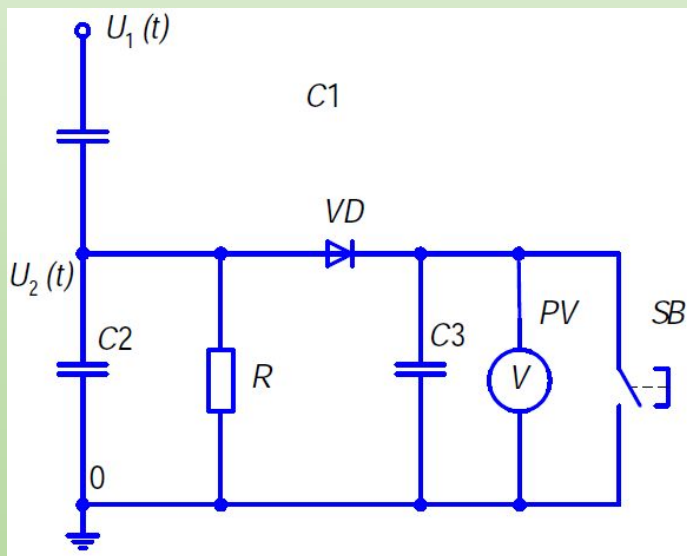
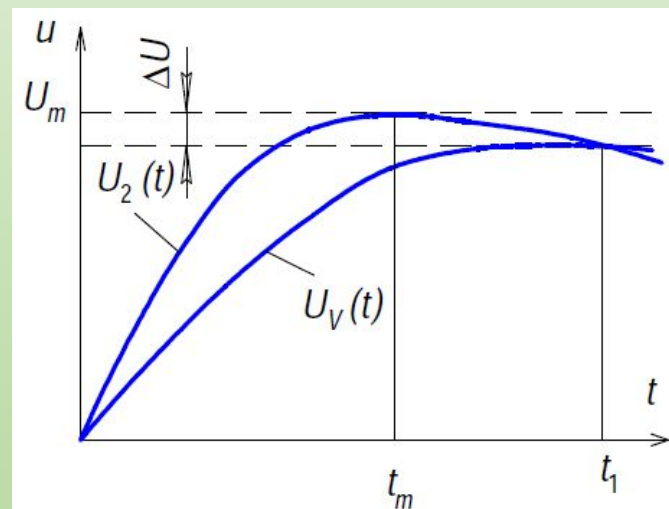


Схема измерения максимального значения импульсного напряжения



Графики напряжения

Т.к. в открытом состоянии  $R_{VD} \sim$  несколько дес.  $\Omega \rightarrow$  измеренное  $U_m$  ниже реального значения на величину  $\Delta U$ .

Кнопка SB нужна для разряда измерительной емкости  $C_3$ .

Сопротивление  $R \sim 1 \text{ M}\Omega$  необходимо для исключения постоянной составляющей из  $U_2(t)$ .

## Резистивно - емкостной делитель напряжения

Применяется для регистрации срезанных грозовых, коммутационных колебательных и более коротких импульсов напряжения.

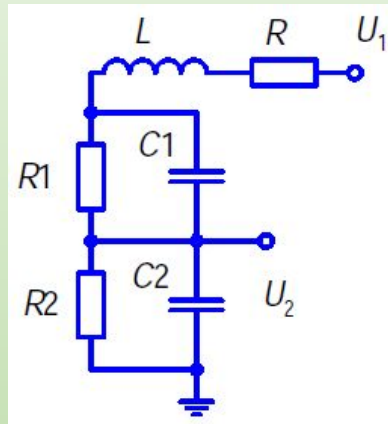


Схема резистивно – емкостного делителя напряжения

$L$  – индуктивность контура подсоединения;  
 $R$  – демпфирующее сопротивление.

Должно быть  $R_1 C_1 = R_2 C_2$

$$K_D = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Если  $R_1 C_1 \neq R_2 C_2$ , то  $K_D = f(t)$

# Измерение больших импульсных токов

Большие импульсные токи необходимо измерять:

- при исследовании атмосферных процессов (при разрядах молнии);
- при изучении физики плазмы;
- при испытаниях силовых выпрямителей, высоковольтных выключателей, вентильных разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений.

## Измерение импульсных токов с помощью низкоомных шунтов

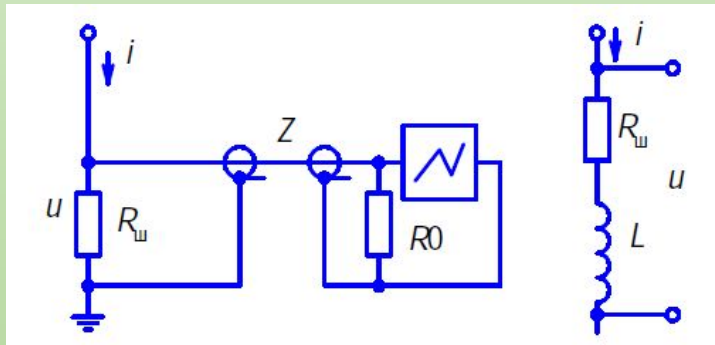


Схема подключения токового шунта  
и его схема замещения

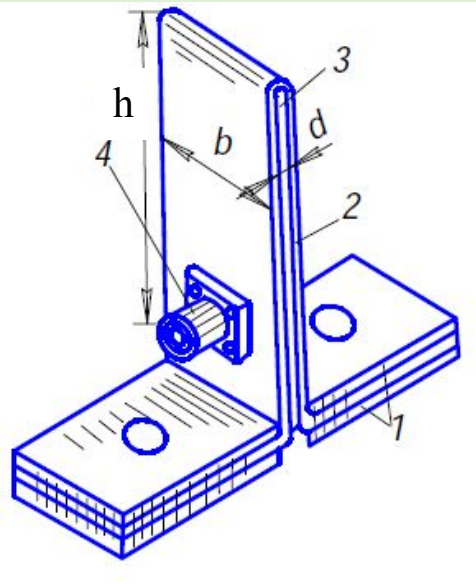
$u(t) = i(t)R_{ш}$  – напряжение на токовом шунте без учета индуктивности.

$u(t) = i(t)R_{ш} + L \frac{di}{dt}$  – напряжение на токовом шунте с учетом индуктивности.

$R_0$  – сопротивление для исключения отражения волн.

Индуктивность можно не учитывать, если  $\omega L < 0.05 R_{ш}$

$\omega$  – частота сигнала или эквивалентная частота фронта импульса.



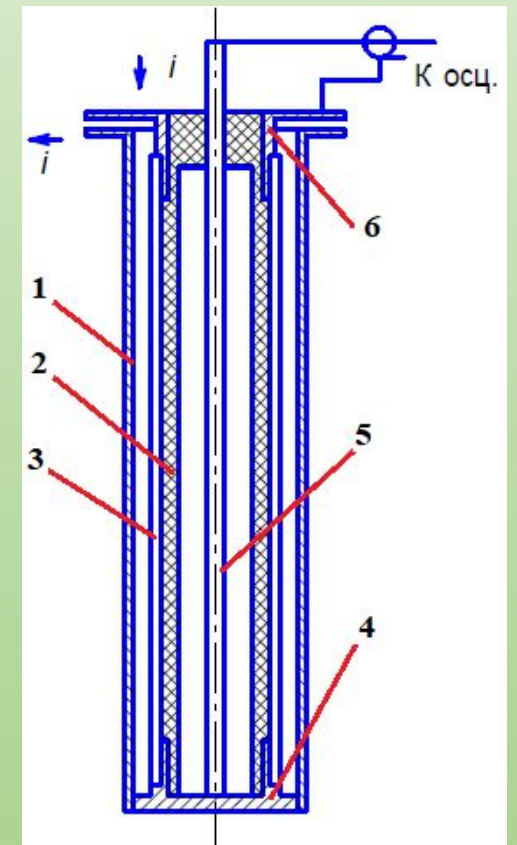
Бифилярный токовый шунт

- 1 – медные пластинчатые зажимы;
- 2 – бифилярно сложенные ленты из металла с высоким удельным сопротивлением;
- 3 – слой диэлектрика;
- 4 – коаксиальный разъем.

$$L = \frac{2\mu_0 h d}{b} \text{ – индуктивность бифилярного токового шунта.}$$

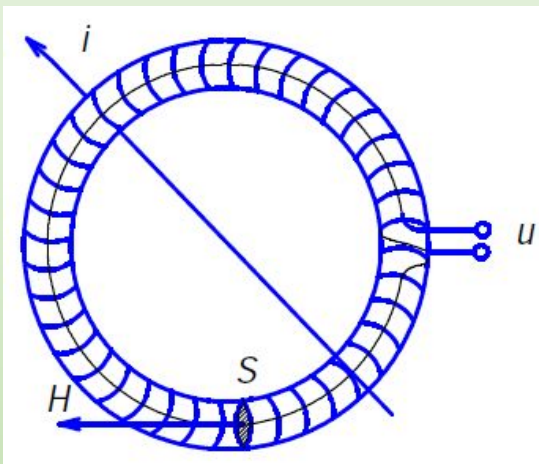
- 1 – обратный проводник;
- 2 – диэлектрический цилиндр;
- 3 – прямой проводник;
- 4 – соединительный фланец;
- 5 – стержень для подключения осциллографа;
- 6 – фланец для подключения осциллографа.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R_{\text{внешн.}}}{R_{\text{внутр.}}} \text{ – индуктивность коаксиального токового шунта.}$$

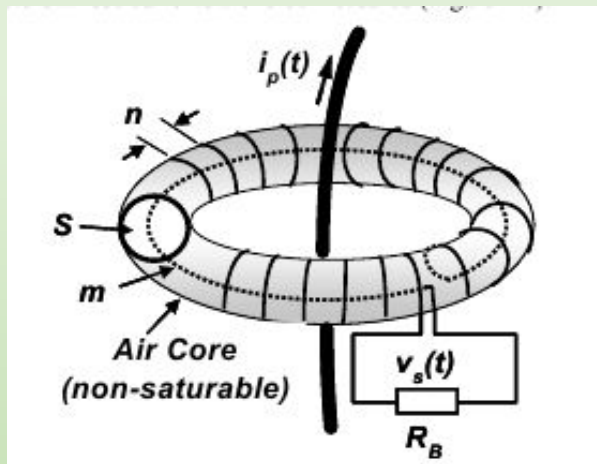


Коаксиальный токовый шунт

## Измерение импульсных токов с помощью воздушных трансформаторов тока

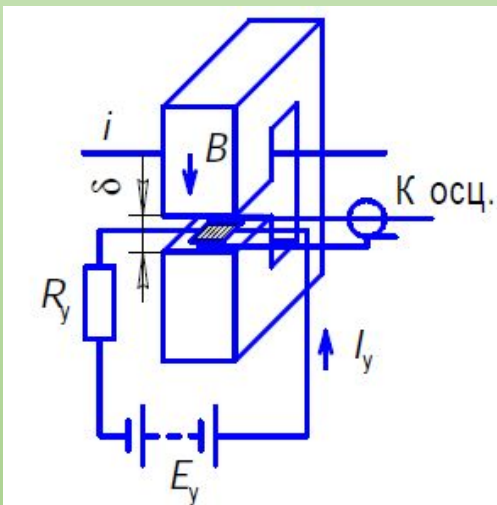


Катушка Роговского



$$u(t) = \frac{\mu\mu_0 w S}{l} \frac{di}{dt} \text{ – индуцируемое напряжение.}$$

## Измерение импульсных токов с помощью датчиков Холла



Подключение датчика Холла

$$u(t) = \frac{K_X B I_{упр}}{d} \text{ – индуцируемое напряжение.}$$

$$H(t) = \frac{i(t)}{\delta} \rightarrow B = \mu_0 H$$

$d$  – толщина полупроводящей пластины;

$K_X$  – коэффициент Холла;

$I_{упр}$  – ток управления.