

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ИЗОЛЯЦИЯ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Я рада вас приветствовать, товарищи ребята!
Конечно, если вы в МЭИ, а не ушли куда-то...



Учиться, учиться и учиться....



Привет из 2016

ВКЛЮЧАЙ МОЗГИ!



УЧЕНИЕ - СВЕТ!

Литература:

а) основная литература:

1. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1986.
2. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976.
3. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 2 и 3. /Под общ. ред. профессоров МЭИ. М.: Изд-во МЭИ, 2004

б) дополнительная литература:

1. К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А.А. Рейхердт. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
2. Г.А. Евдокунин, С.С.Титенков. Внутренние перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ. – СПб.: Издательство Терция, 2004.

№ п/п	Раздел дисциплины. Форма промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по разделам)
				лк	пр	лаб	сам.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Основные свойства и электрические характеристики внешней изоляции электроустановок	15	2	3	2		10	Тест по внешней изоляции
2	Грозовые перенапряжения и молниезащита ЭУ	17	2	5	2		10	Устный опрос
3	Коммутационные перенапряжения	16		6			10	Устный опрос
4	Современные средства ограничения перенапряжений в системах электроснабжения	20	2	4	5		11	Контрольная работа
	Зачет	4					4	Дифференцированный зачет
	Итого:	72		18	9		45	

Цель курса — установление взаимосвязи между электрическими свойствами основных видов изоляции, уровнями воздействующих на них в эксплуатации перенапряжений и характеристиками защитной аппаратуры

В результате изучения курса обучающиеся должны:

- уметь** оценивать электрическую прочность простейших изоляционных конструкций, значения грозовых и внутренних перенапряжений;
- **знать** нормы и методы проведения испытаний изоляции электрооборудования;
- иметь представление** о процессах, приводящих к ухудшению характеристик изоляции

Общая характеристика курса

Надежность работы электроустановок в значительной мере определяется состоянием изоляции

Виды воздействий на изоляцию

1. Изоляция постоянно находится под действием рабочего напряжения

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	3	6	10	20	35	110	220	330	500	750	1150
$U_{\text{раб.наиб.}}, \text{кВ}$	$1,15U_{\text{ном}}$							$1,1U_{\text{ном}}$	$1,05U_{\text{ном}}$		
	3,5	6,9	11,5	23	40,5	126	252	363	525	787,5	1200
$U_{\text{ф.наиб.}} = \frac{U_{\text{раб.наиб.}}}{\sqrt{3}}, \text{кВ}$	2,0	4,0	6,65	13,3	23,4	72,8	146	210	304	455	695
нейтраль	изолированная, компенсированная, резистивно заземленная					заземленная					

2. В процессе эксплуатации возможны повышения напряжения сверх наибольшего рабочего – **внутренние и внешние перенапряжения**

Источником **внутренних перенапряжений** являются электродвижущие силы генераторов систем, а причиной- нормальные или аварийные коммутации, сопровождаемые колебательными процессами или резонансными явлениями. Их принято оценивать коэффициентом перенапряжений

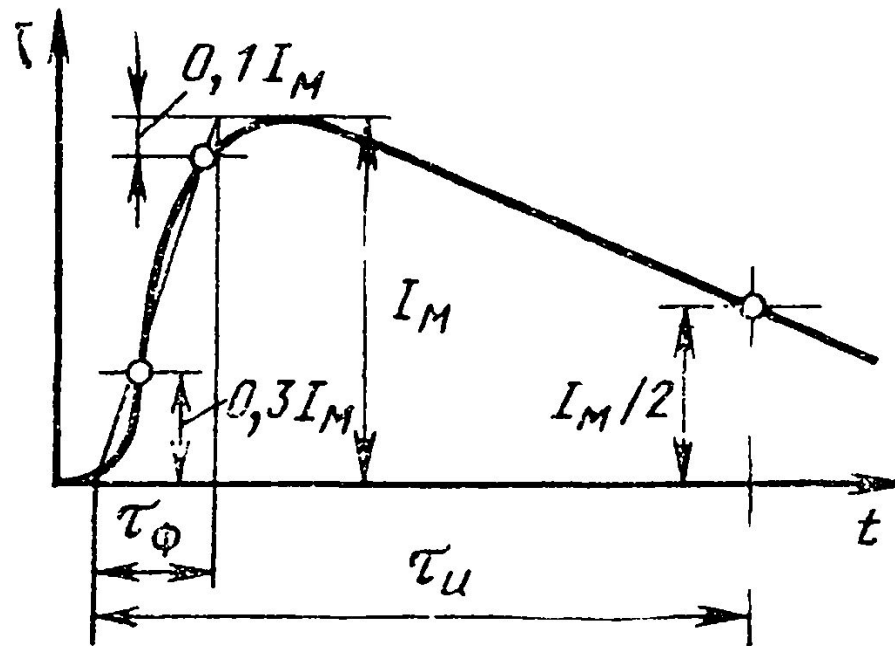
$$K_{\text{пер}} = K_{\text{уд}} \cdot K_{\text{уст}}$$

$K_{\text{уд}}$ - ударный коэффициент, зависящий от фазы коммутации и характеристик объекта, представляет собой отношение максимального напряжения переходного процесса к вынужденной составляющей устанавливающегося напряжения

$K_{\text{уст}}$ - отношение устанавливающегося напряжения к наибольшему рабочему фазному напряжению

Основной причиной внешних (атмосферных) перенапряжений являются удары молнии в электроустановки.

Ток молнии имеет в простейшем случае форму импульса



Для токов молнии характерны длины фронта $\tau_f \leq 10$ мкс и длины импульса $\tau_{\text{и}} \leq 100$ мкс, максимальные значения токов молнии достигают 200 кА

Изоляция ЭУ не выдерживает столь интенсивных воздействий, происходит пробой, переходящий в поддерживаемый напряжением источника дуговой разряд.

Для ликвидации таких замыканий используются следующие мероприятия:

1. В ЭУ до 35 кВ эффективным средством гашения дуги однофазного замыкания являются ДГР, подключаемые к нейтрали сети
2. В ЭУ напряжением 110 кВ и выше используется АПВ
3. Использование грозозащитных тросов на ВЛ напряжением 110 кВ и выше

Импульсы грозовых перенапряжений, распространяясь от места удара, достигают подстанционного оборудования и могут повреждать его.

Внешняя изоляция электроустановок

Ликвидация замыканий при грозовых ударах возможна только потому, что воздушная изоляция самовосстанавливается после снятия напряжения или погасания дуги.

К **внешней** изоляции относятся воздушные промежутки и изоляторы наружной установки (внешняя поверхность).

Основной особенностью внешней изоляции является зависимость ее характеристик от атмосферных условий.

Изоляторы наружной установки имеют электрическую прочность, зависящую от загрязнения их поверхности и осадков

Внутренняя изоляция

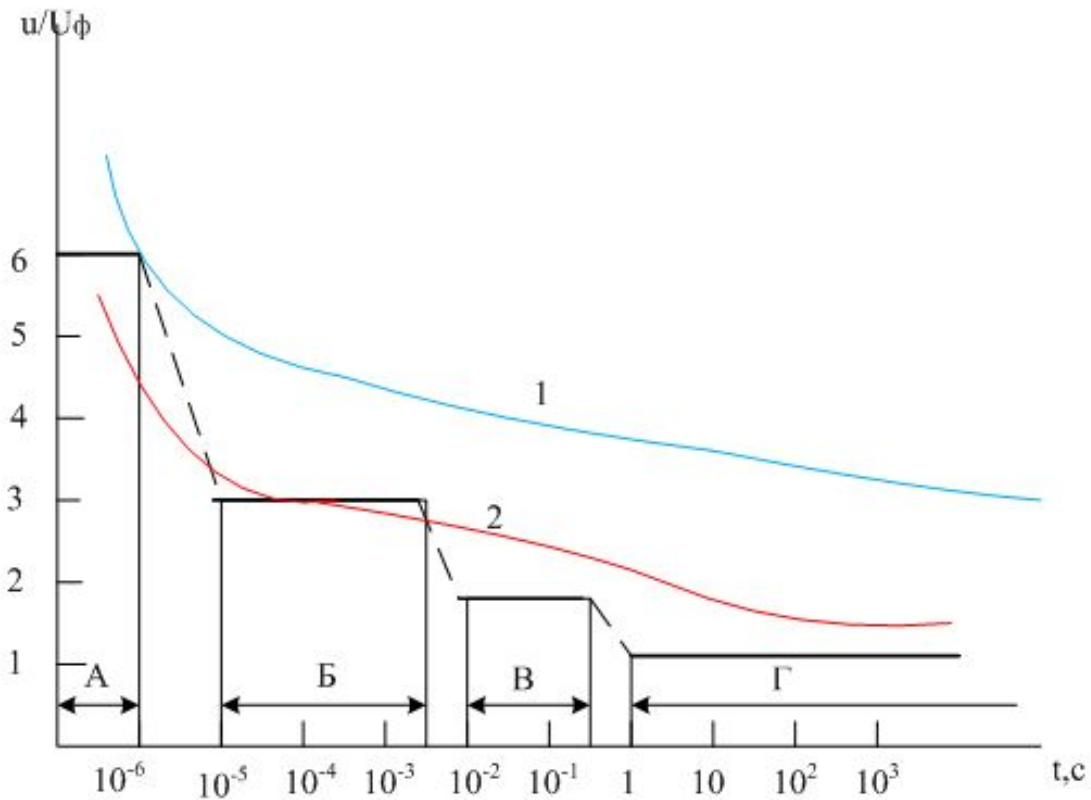
Это изоляция обмоток электрических машин, изоляция кабелей, герметизированная изоляция вводов и силовых конденсаторов, изоляция между контактами выключателя в отключенном состоянии и т.д.

Внутренняя изоляция обычно представляет собой комбинацию твердого и жидкого или газообразного диэлектриков.

Особенностью внутренней изоляции является ее **старение**.

Пробой твердой и комбинированной изоляции — **явление необратимое**. Жидкая и газовая изоляция способны самовосстанавливаться, однако многократные пробои приводят к ухудшению их характеристик

Понятие координации изоляции



- А- грозовые перенапряжения; Б – внутренние перенапряжения;
- В – длительные повышения напряжения; Г – рабочее напряжение

Пробивное напряжение изоляции тем выше, чем меньше время воздействия напряжения

Однако создание изоляции, которая выдерживала бы любые перенапряжения экономически неоправданно и технически невозможно, т.к. перенапряжения носят вероятностный характер.

Поэтому необходимо использование защитных аппаратов, облегчающих условия работы изоляции.

Взаимное согласование значений воздействующих напряжений, характеристик защитной аппаратуры и электрических характеристик изоляции, обеспечивающее надежную работу и высокую экономичность ЭУ, называется **координацией изоляции**

Общая характеристика внешней изоляции

При нормальных атмосферных условиях электрическая прочность воздушных промежутков относительно невелика и в однородном поле при межэлектродных расстояниях более 1 см имеет значение, не превышающее 30 кВ/см. В большинстве изоляционных конструкций при приложении высокого напряжения создается резконеоднородное электрическое поле. Электрическая прочность воздуха в таких полях еще меньше и при расстояниях между электродами порядка 1—2 м составляет приблизительно 5 кВ/см, а при расстояниях 10—20 м снижается соответственно до 2,5—1,5 кВ/см. В связи с этим габариты воздушных линий электропередачи и распределительных устройств в значительной мере определяются электрической прочностью воздуха и при увеличении номинального напряжения очень быстро возрастают.

Влияние атмосферных условий

На разрядные напряжения воздушных промежутков оказывают влияние давление P , температура T и абсолютная влажность γ воздуха.

Н.А.У.: $P=760$ мм рт.ст., $T=293^\circ\text{K}$, $\gamma=11\text{г/м}^3$

При увеличении γ в 1,5 раза $U_{\text{разр}}$ возрастает примерно на 5 %

При увеличении T на каждые 3° сверх нормы $U_{\text{разр}}$ снижается на 1%

Снижение давления при подъеме на каждые 100 м над уровнем моря приводит к снижению разрядного напряжения на 1%

Изоляторы

Требования, предъявляемые к изоляторам:

1. Высокая электрическая прочность

Пробивное напряжение твердого диэлектрика в изоляторе должно быть не менее, чем в 1,5 раза выше напряжения перекрытия по поверхности

2. Высокая механическая прочность

3. Низкая гигроскопичность

4. Высокая трекингостойкость

Назначение и виды изоляторов

Изоляторы по назначению делятся на

- **опорные**

опорно-штыревые и опорно-стержневые

- **проходные**

- **подвесные**

тарельчатые и стержневые

Фарфоровые опорные изоляторы. ИОР-10-3,75 УХЛ2



Изоляторы опорные штыревые фарфоровые ОШН-20-80 УХЛ1 (ОНШ-10-20)



Фарфоровые проходные изоляторы.





Полимерные изоляторы

Изолятор опорный полимерный.



изоляторы подвесные полимерные



Изоляторы опорные полимерные ИОСК-4/10-П



Полимерный изолятор ТП-20 взамен снятого с производства ТФ-20.01.



Полимерный изолятор проходной 10 кВ ИПЭЛ 10-5-045-00
УХЛ1 или УХЛ2.





Разрядные напряжения изоляторов

На разрядные напряжения изоляторов влияют те же факторы (P , T , γ), которые влияют на разрядные напряжения воздушных промежутков, т.к. разряд развивается в воздухе вдоль поверхности изолятора.

Кроме этого влияет состояние поверхности изолятора, а именно увлажненность и загрязнения.

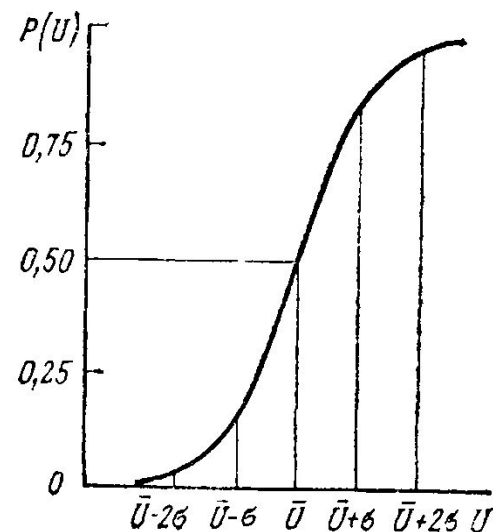
Поэтому для изоляторов наружной установки установлены следующие виды испытательных напряжений:

1. Сухоразрядное напряжение – при сухой и чистой поверхности
 2. Мокроразрядное напряжение – поверхность увлажнена искусственным дождем по стандартной методике
 3. Грязеразрядное напряжение – поверхность увлажнена и загрязнена
- При испытаниях по п.п.1,2 результаты приводятся к Н.А.У.

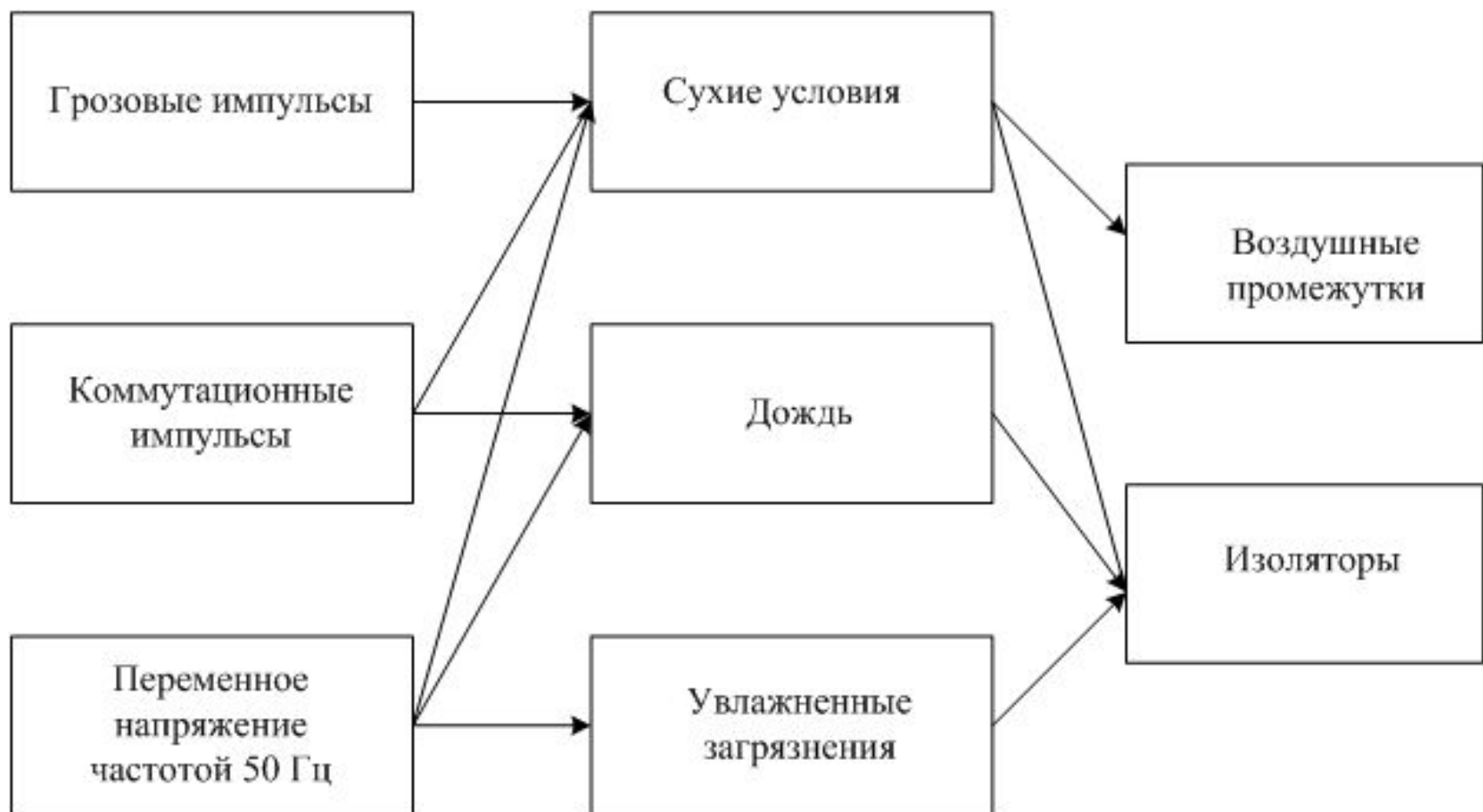
Виды и условия испытания внешней изоляции

$$P(U) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(u-\bar{U})^2}{2\sigma^2}} du,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\bar{U} - U)^2}{N - 1}}.$$



$$c = \frac{\sigma}{\bar{U}} 100 \%$$



Электрофизические процессы в газах

Нарушение электрической прочности газового промежутка происходит под действием ударной ионизации электронами, приобретающими дополнительную энергию за счет сил электрического поля. Интенсивность этой ионизации определяется при заданной напряженности электрического поля в основном двумя величинами — энергией ионизации газа и средней длиной свободного пробега.

Движение заряженных частиц в газах

В отсутствие внешнего электрического поля частицы находятся в состоянии хаотического (теплового) движения, постоянно сталкиваясь (взаимодействуя) с другими частицами.

Если на единицу пути частица испытала z столкновений, то средняя длина ее свободного пробега

$$\lambda = 1/z$$

Эта величина зависит от концентрации частиц, а следовательно, от давления и температуры газа. Если относительная плотность воздуха

$$\delta = \frac{pT_0}{T\epsilon_0}$$

То зависимость λ от температуры и давления имеет вид

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\delta}$$

где λ_0 - средняя длина свободного пробега при НАУ

Действительная длина для каждой частицы отличается от средней и носит вероятностный характер.

Вероятность того, что действительная длина свободного пробега больше или равна X , составляет

$$P(x) = \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

Наличие внешнего электрического поля приводит к возникновению направленного движения заряженных частиц, т.е. к появлению в газе электрического тока.

Движение частиц под действием поля называется дрейфом. Скорость дрейфа

$$v = KE$$

Средняя скорость дрейфа частиц пропорциональна напряженности электрического поля. Коэффициент пропорциональности $K = v/E$ называется подвижностью и представляет собой скорость дрейфа частицы в электрическом поле с напряженностью $E = 1 \text{ В/см}$.

Кроме дрейфа существует диффузия – движение частиц, вызванное разницей их концентраций. Основное уравнение диффузии

$$J = -D \frac{dN}{dx}$$

Показывает, что при постоянном градиенте концентрации вдоль оси X, количество частиц, проходящих за 1 сек через единицу площади, перпендикулярной оси X, пропорционально градиенту концентрации с коэффициентом D. Последний пропорционален средней длине свободного пробега и зависит также от массы частиц.

Возникновение и исчезновение заряженных частиц в газе

Таблица 1.1. Энергии возбуждения и ионизации некоторых газов

Газ	Энергия возбуждения атомов или молекул, эВ	Энергия возбуждения метастабильных состояний, эВ	Энергия ионизации, эВ			
			атома или молекулы	положительного иона	двухзарядного иона	трехзарядного иона
N ₂	6,1	6,2	15,6	—	—	—
N	6,3	2,4; 3,6	14,5	29,5	47,0	77,0
O ₂	7,9	1,0; 1,8	12,5	34,7	54,8	77,5
O	9,1	2,0; 4,2	13,6	35,0	55,0	77,0
H ₂	11,2	—	15,4	—	—	—
H	10,2	—	13,6	—	—	—
He	21,2	19,8; 20,7	24,6	54,4	—	—
CO ₂	10,0	—	13,7	—	—	—
H ₂ O (пар)	7,6	—	12,8	—	—	—

Виды ионизации

1. Ударная

2. Термоионизация

3. Фотоионизация

Коэффициент ударной ионизации

Для того, чтобы электрон приобрел энергию ионизации, он должен пройти без столкновений путь

$$x_{\text{и}} = \frac{W_{\text{и}}}{eE} = \frac{U_{\text{и}}}{E}$$

Если принять для простоты рассуждений, что путь $x_{\text{и}}$ электрон пролетает без столкновений, то это означает, что энергия $W_{\text{и}}$ набирается за один пробег электрона. Подобная ситуация действительно может быть при низких давлениях, когда велики значения λ . Вероятность того, что электрон пролетит путь $x_{\text{и}}$ без столкновений, составляет

$$P(x_{\text{и}}) = \exp\left(-\frac{x_{\text{и}}}{\lambda}\right), \quad (1.20)$$

но это есть и вероятность приобретения электроном энергии $W_{\text{и}}$, при которой возможна ионизация, т. е. $P(x_{\text{и}})$ можно считать вероятностью ионизации.

Процесс ионизации газа путем соударения нейтральных молекул с электронами называется ударной ионизацией и характеризуется коэффициентом ударной ионизации α ,

который равен числу ионизаций, производимых электроном на пути в 1 см по направлению действия сил электрического поля. Коэффициент α определяется как произведение среднего числа столкновений на пути в 1 см и вероятности ионизации:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{x_{\text{и}}}{\lambda}\right). \quad (1.21)$$

Поскольку число столкновений электрона с частицами газа на пути в 1 см пропорционально давлению

$$z = \frac{1}{\lambda} = Ap,$$

то с учетом (1.19) получаем

$$\alpha = Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right), \quad (1.22)$$

где A и $B = AW_{\text{и}}/e$ — постоянные, зависящие от характеристик газа и значения температуры.

$$\alpha_{\text{эф}} = \alpha - \eta.$$

$$\frac{\alpha_{\text{эф}}}{\delta} = 0,2 \left(\frac{E}{\delta} - 24,5 \right)^2$$

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{0,2}{\delta} (E - 24,5\delta)^2.$$

Лавина электронов

Рассмотрим промежуток между двумя электродами в газе. Если в этом промежутке появился электрон, то, двигаясь к аноду, при достаточной напряженности электрического поля он может при столкновении ионизировать молекулу газа. Образовавшийся при этом свободный электрон вместе с начальным ионизирует новые молекулы. Число свободных электронов будет непрерывно возрастать. Процесс нарастания числа электронов, движущихся в электрическом поле по направлению к аноду, получил название лавины электронов.

$$n = \exp \left(\int_0^x \alpha dx \right)$$

Условие самостоятельности разряда

$$\gamma \exp \left(\int_0^L \alpha dx \right) \geq 1 \quad \gamma \exp (\alpha L) \geq 1,$$

Число вторичных электронов пропорционально числу актов ударной ионизации. Коэффициент пропорциональности γ называется коэффициентом вторичной ионизации. Значение γ зависит от природы и давления газа, материала катода и напряженности электрического поля, а также от того, какой процесс вторичной ионизации превалирует. При разрядах в воздухе с преобладающим влиянием бомбардировки катода положительными ионами коэффициент γ имеет порядок 10^{-2} .

Разряды в воздушных промежутках при длительно действующих напряжениях

Разрядные напряжения промежутков с однородным полем

К длительно действующим напряжениям относятся постоянное напряжение и переменное напряжение с частотой 50 Гц. Поскольку развитие разряда происходит за время, значительно меньшее, чем полупериод переменного напряжения, то при таких воздействиях их продолжительность не может оказывать влияния на разрядные напряжения.

между ними.

Зависимость значений разрядных напряжений от длины промежутка и давления газа может быть получена на основе условия самостоятельности разряда в форме (1.46), поскольку это условие в применении к промежутку с однородным полем означает его пробой.

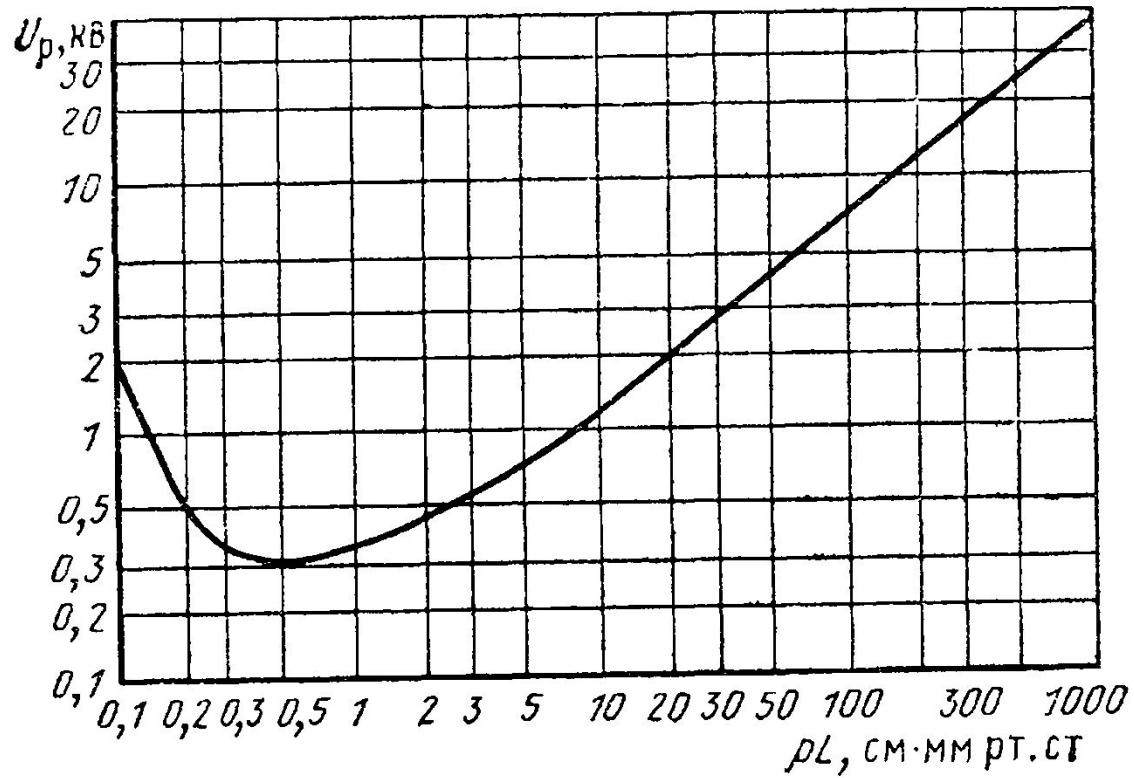
$$\gamma \exp(\alpha L) \geq 1, \quad \alpha = A p \exp\left(-\frac{B p}{E}\right),$$

$$\alpha L \approx \text{const} = K, \quad \ln \frac{1}{\gamma} = \text{const} \quad E = U/L$$

$$A(pL) \exp\left[-\frac{B}{U_p}(pL)\right] = K,$$

$$U_p = \frac{B(pL)}{\ln \frac{A(pL)}{K}}.$$

Закон Пашена



$$U_p = 24,5\delta L + 6,4 \sqrt{\delta L}.$$

Разряд в воздушном промежутке в неоднородном поле

Как отмечалось, условие самостоятельности разряда выполняется при начальном напряжении. Для промежутков с однородным электрическим полем начальное напряжение всегда совпадает с разрядным. Выполнение условия самостоятельности разряда в промежутках с неоднородным полем еще не означает их пробоя. В слабонеоднородных полях эффективный коэффициент ударной ионизации $\alpha_{эф} > 0$ по всей длине промежутка, поэтому при выполнении условия самостоятельности разряда промежуток пробивается и начальное напряжение равно разрядному. В резко-неоднородных полях $\alpha_{эф} > 0$ в узкой зоне около электрода и при выполнении условия самостоятельности разряда возникает корона (см. § 1.3). В этом случае разрядное напряжение может значительно превышать начальное.

Для однородного поля

$$U_{\text{разр}} = U_{\text{нач}} \quad E_{\text{разр}} = E_{\text{нач}}$$

Для неоднородного поля

$$U_{\text{разр}} > U_{\text{нач}} \quad E_{\text{разр}} > E_{\text{нач}}$$

$$k_{\text{н}} = E_{\text{max}}/E_{\text{ср}}.$$

При $k_{\text{н}} \leq 4$ электрическое поле относится к слабонеоднородным и соответствующие промежутки называются некоронирующими или промежутками со слабонеоднородным полем. Промежутки, в которых $k_{\text{н}} > 4$, называются коронирующими или промежутками с резконеоднородным полем.

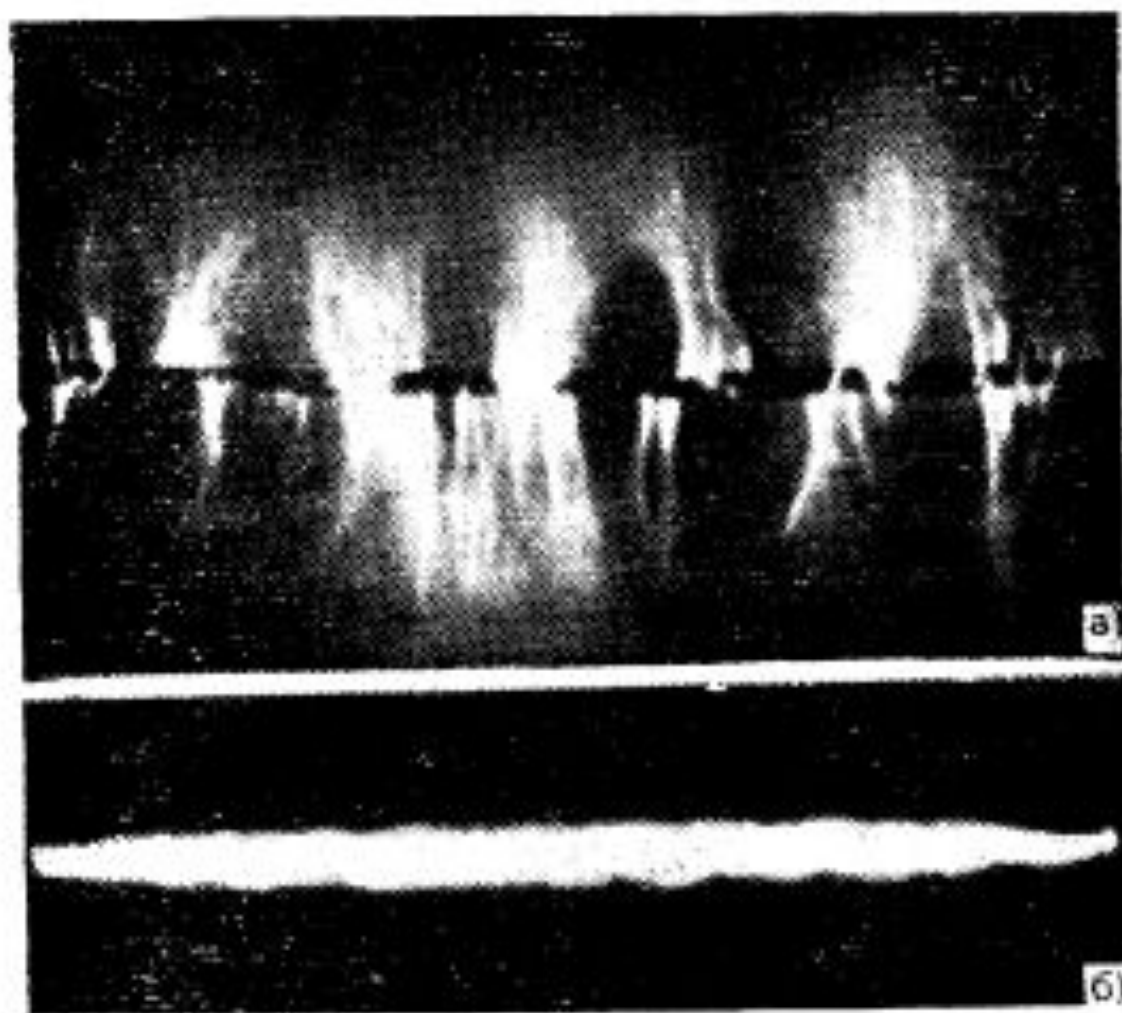
Пробой коронирующего промежутка

Коронный разряд или корона – это самостоятельный разряд, при котором ударная ионизация электронами имеет место не по всей длине промежутка, а лишь в части промежутка у электродов.

Коронный разряд может иметь лавинную и стримерную форму.

При лавинной форме, характерной для электродов с малыми радиусами кривизны (1 – 2мм), зона ионизации имеет достаточно однородную структуру, а свечение сосредоточено в узком чехле.

При стримерной короне структура зоны ионизации дискретна, а свечение имеет место в узких каналах - стримерах.

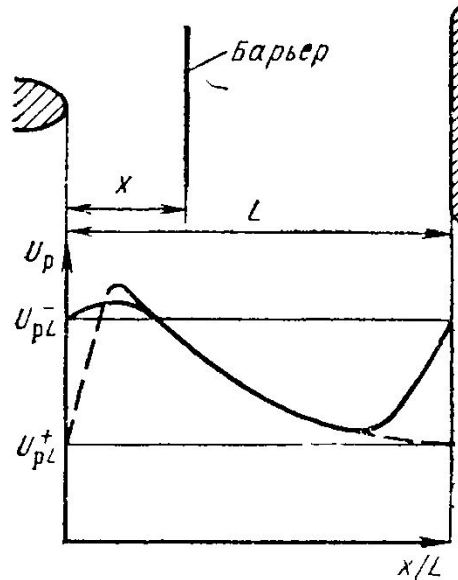


Пробой коронирующего промежутка происходит при напряжении, большем начального (см. рис. 5.5). Если разрядный промежуток несимметричный, т. е. его электроды имеют разные радиусы кривизны, то пробивное напряжение зависит от полярности электрода с меньшим радиусом кривизны: при отрицательной полярности оно существенно выше, чем при положительной (рис. 5.7). Объясняется это тем, что при положительной полярности подвижные электроны легко уходят из зоны разряда на электрод, а остающийся положительный объемный заряд усиливает напря-

женность электрического поля во внешней части промежутка, способствуя дальнейшему развитию разряда. При отрицательной полярности, наоборот, малоподвижный положительный объемный заряд уменьшает напряженность поля во внешней части промежутка и для развития разряда требуется значительно большее напряжение. Средние разрядные напряженности при положительной полярности стержня составляют 4,5 кВ/см, а при отрицательной — примерно 10 кВ/см, что существенно (в 3—5 раз) меньше, чем при разрядах в однородном поле.

Повышение электрической прочности промежутков

1. Увеличение радиуса кривизны электродов с помощью экранов
2. Применение диэлектрических барьеров в коронирующих промежутках



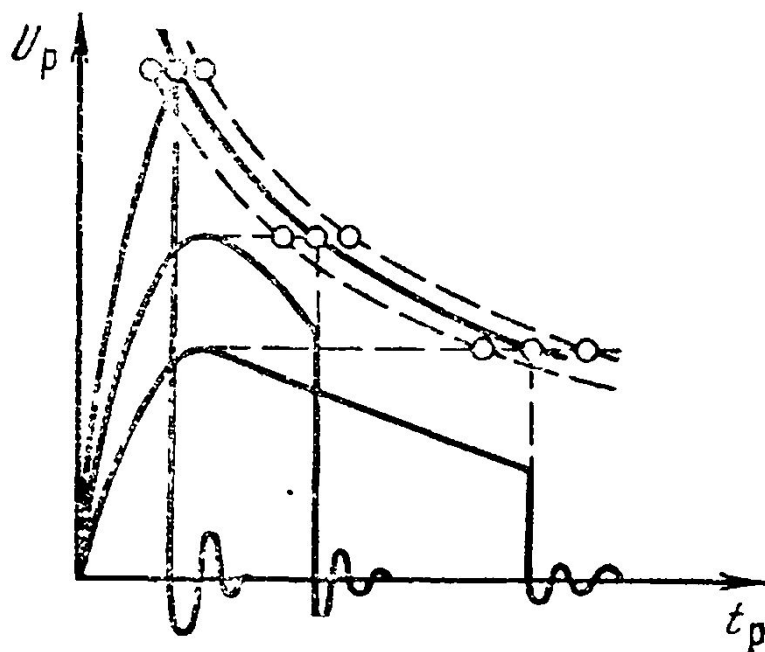
Разряды в воздушных промежутках при грозовых и коммутационных импульсах

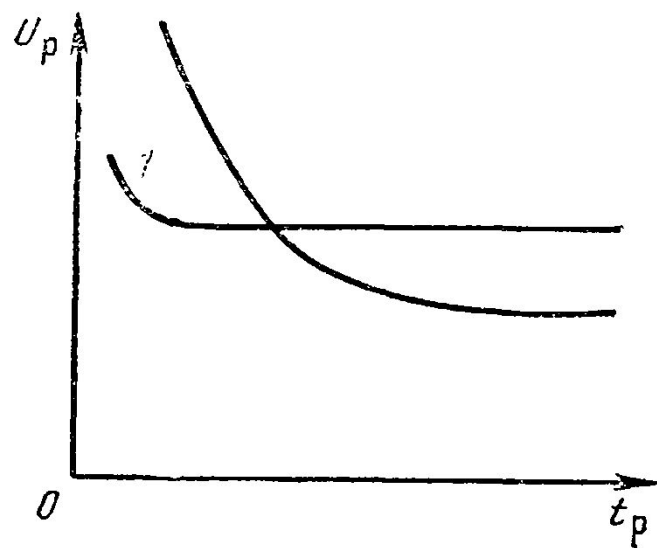
Время разряда и вольт-секундные характеристики воздушных промежутков

При кратковременных импульсах значение разрядного напряжения воздушных промежутков зависит от продолжительности воздействия. Если к промежутку приложено напряжение, достаточное для пробоя, то для развития и завершения разряда в промежутке необходимо определенное время t_p , называемое *временем разряда*.

$$t_p = t_x + t_c + t_{\phi}$$

Зависимость максимального напряжения разряда от времени действия импульса называется вольт-секундной характеристикой изоляции. Поскольку начало и скорость развития ионизационных процессов зависят от значения напряжения, вольт-секундные характеристики зависят от формы импульса.

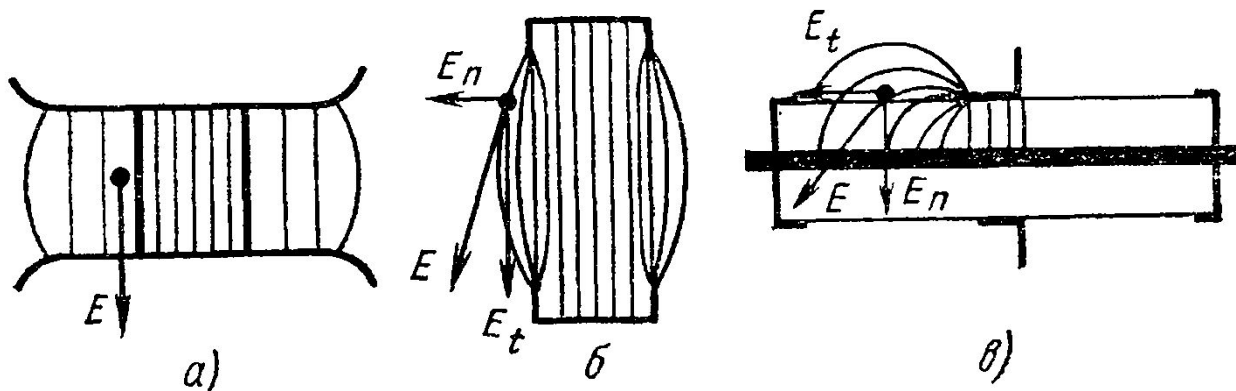




$$K_{\text{ПМП}} = \frac{U_p}{U_{\sim}}$$

Электрическая прочность изоляторов

3 случая расположения твердого диэлектрика в электрическом поле



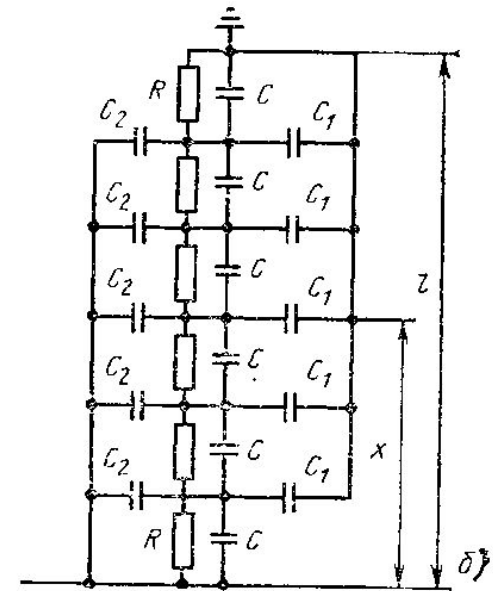
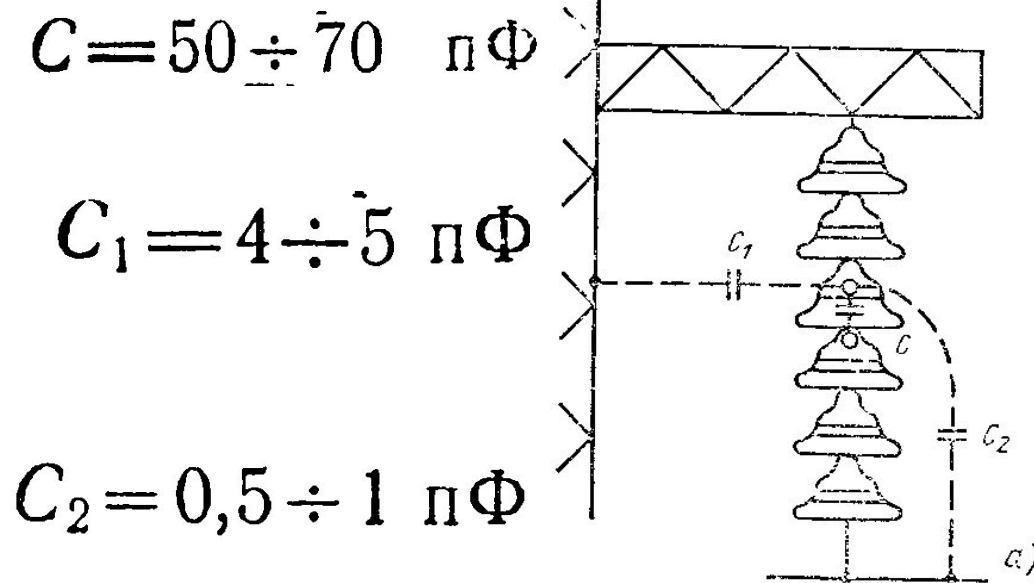
Скользящий разряд

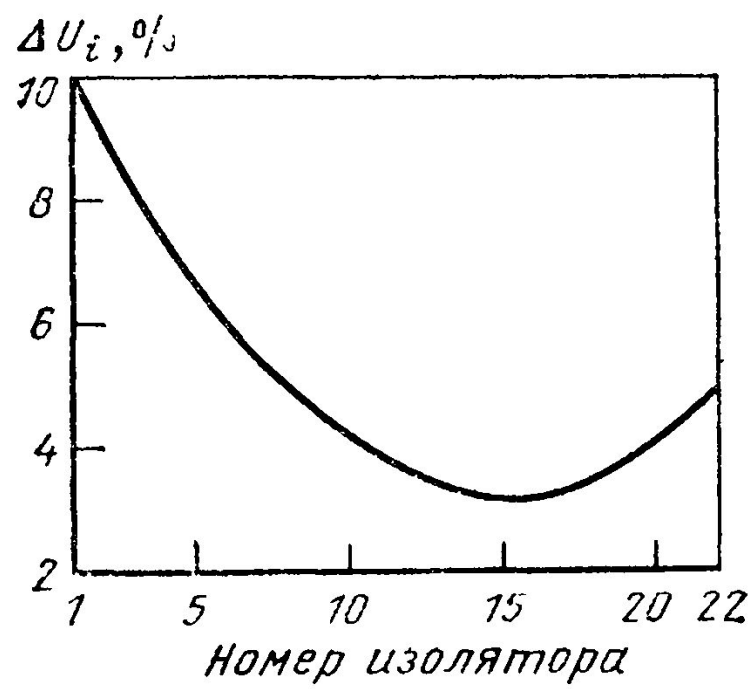
Проводимость канала скользящего разряда значительно больше проводимости канала стримера. Поэтому падение напряжения в канале скользящего разряда меньше, а на непокрытой части промежутка больше, чем в каналах стримера. Увеличение напряжения на непокрытой части промежутка приводит к удлинению канала скользящего разряда и полному перекрытию промежутка при меньшем значении напряжения между электродами.

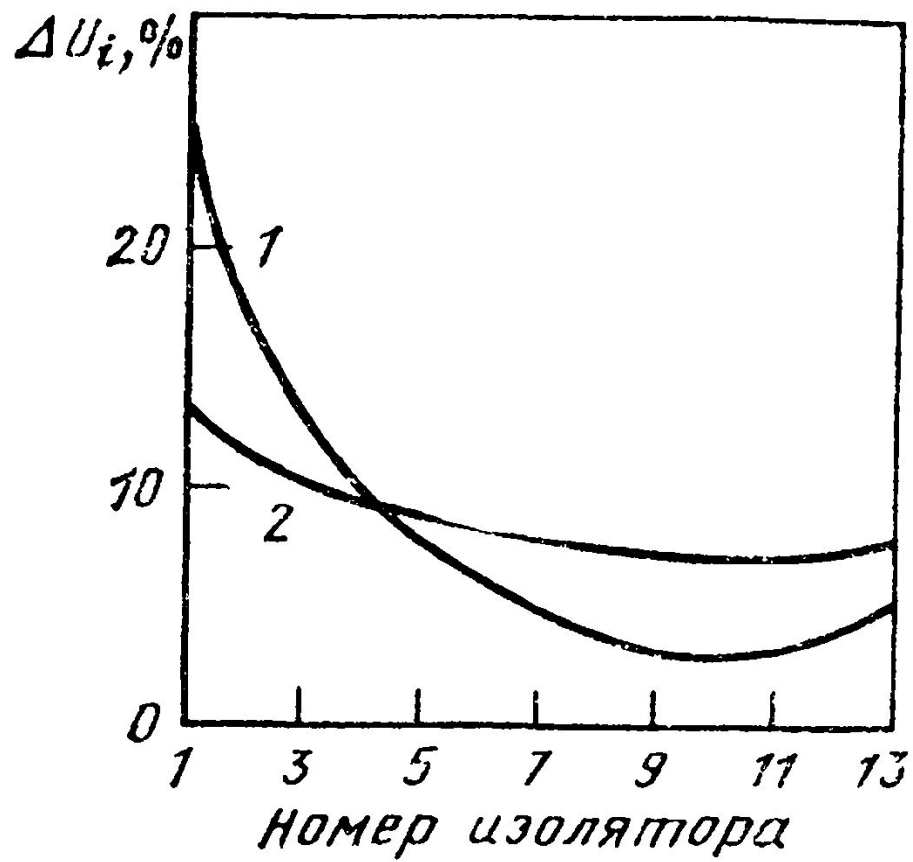
$$l_{\text{ск}} = \kappa_1 C^2 U^5 \sqrt[4]{\frac{du}{dt}}$$

$$U_p = \kappa L^{0,2} \left(\frac{d}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{0,4}$$

Распределение напряжения вдоль гирлянды подвесных изоляторов







Эксплуатационный контроль изоляторов

1. Метод контроля изоляторов, основанный на измерении распределения напряжения по гирляндам или колонкам. Позволяет обнаружить изоляторы с достаточно развитыми дефектами.

2. Метод, основанный на измерении частичных разрядов. Частичные разряды создают радиопомехи, применяют измеритель помех.

3. Испытания повышенным напряжением

Эксплуатационные мероприятия, повышающие надежность работы изоляторов:

Обмывка

Очистка струей сжатого воздуха

Ручная очистка

Покрытие гидрофобными пастами

Общая характеристика внутренней изоляции

Внутренней изоляцией называют те элементы или участки электроизоляционной конструкции или системы электрической изоляции установки, в пределах которых изоляционные промежутки между проводниками заполнены газообразными, жидкими или твердыми диэлектрическими материалами или их комбинацией, но не атмосферным воздухом. Изоляционные промежутки в атмосферном воздухе составляют внешнюю изоляцию.

Общие свойства

сложный характер зависимости электрической прочности от длительности воздействия напряжения;

в большинстве случаев необратимость разрушения при пробое;

влияние на поведение в эксплуатации механических, тепловых и других внешних воздействий.

Длительная электрическая прочность внутренней изоляции

Виды старения внутренней изоляции

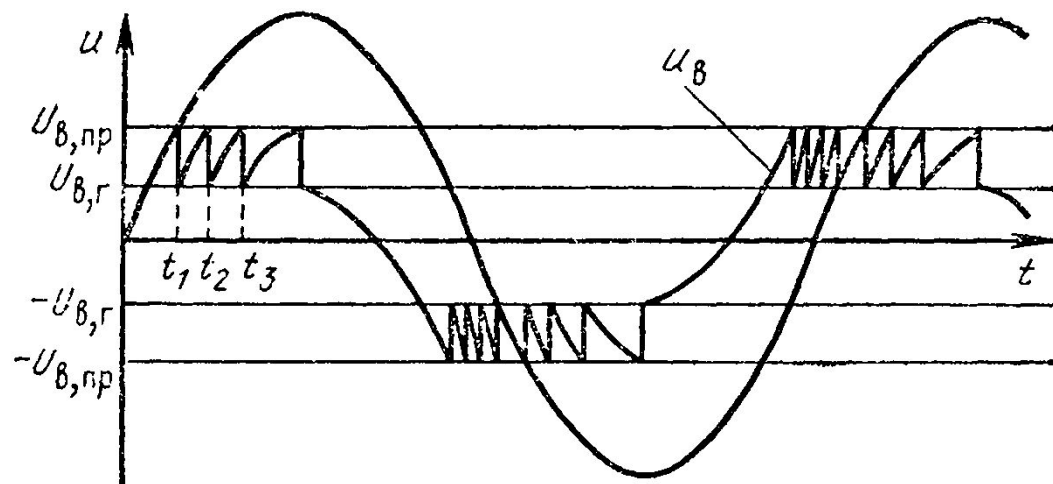
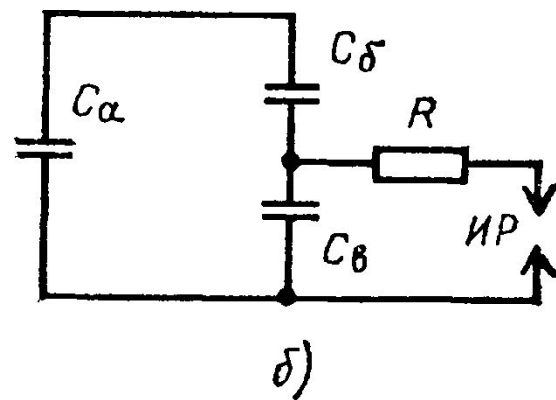
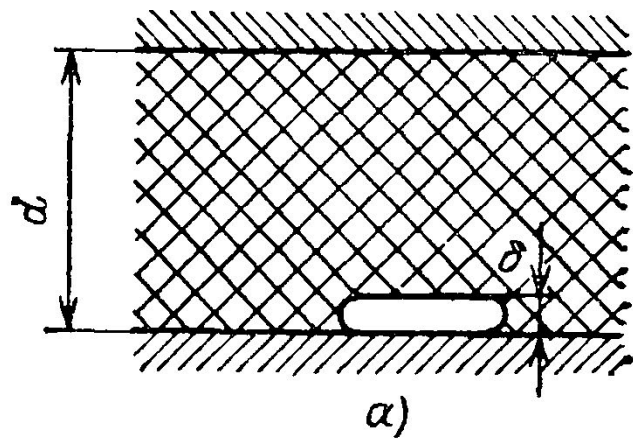
В эксплуатации на внутреннюю изоляцию электрооборудования воздействуют электрические, тепловые, механические и другие нагрузки. Они неизбежно вызывают в изоляции сложные процессы, следствием которых является постепенное ухудшение свойств, именуемое старением. Как правило, изменения свойств изоляции носят необратимый характер и завершаются пробоем. В отдельных случаях последствия старения могут быть устранены путем восстановительного ремонта изоляции.

Электрический механизм старения

При рабочем напряжении во внутренней изоляции электрооборудования могут развиваться процессы электрического старения. Установлено, что такое старение может иметь место при напряженностях электрического поля, во много раз меньших (в 5—20 раз и более) пробивных напряженностей, измеренных при кратковременном приложении напряжения.

Частичными разрядами (ЧР) называют разрядные процессы в изоляции, которые развиваются под действием приложенного напряжения и распространяются лишь на часть изоляционного промежутка.

Частичные разряды могут возникать в ослабленных местах изоляции, например в газовых включениях, или в местах резкого усиления электрического поля, в частности у острых краев электродов. Наибольшую опасность представляют ЧР в газовых включениях, так как в этом случае ЧР возникают при меньших напряжениях, чем в жидких или твердых компонентах внутренней изоляции.



$$U = U_{ч,р} = \frac{U_{в,пр}}{\sqrt{2}} \frac{C_0 + C_в}{C_в}$$

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_{гн} S_в}{d - \delta}, \\ C_в &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_{гв} S_в}{\delta}, \end{aligned} \right\}$$

где δ — размер газового включения в направлении поля; d — толщина изоляции; $S_в$ — площадь сечения газового включения, перпендикулярного силовым линиям электрического поля; $\epsilon_{гв}$ и $\epsilon_{гн}$ — относительные диэлектрические проницаемости соответственно заполняющей включение среды и изоляции.

$$U_{ч,р} = \frac{U_{в,пр}}{\sqrt{2}} \frac{\epsilon_{гв}}{\epsilon_{гн}} \frac{d}{\delta}$$

Наименьшее значение напряжения $U_{ч,р}$ имеет место, если газовое включение находится в области наибольших напряженностей. В этом случае

$$U_{ч,р} = \frac{U_{в,пр}}{\sqrt{2}} \frac{\epsilon_{гв} d}{\epsilon_{гн} \delta K_{н}},$$

где $K_{н}$ — коэффициент неоднородности электрического поля в изоляции, равный отношению максимальной напряженности E_{max} к средней напряженности $E_{ср}$ в изоляционном промежутке.

Как следует из закона Пашена для газовых включений размером δ в сотые доли миллиметра при давлении, близком к атмосферному, пробивное напряжение $U_{в,пр}$ слабо зависит от размеров включения и равно для воздуха примерно 300 В. Тогда выражение для $U_{ч,р}$, кВ, принимает следующий вид:

$$U_{ч,р} \approx 0,2 \frac{\epsilon_{гв} d}{\epsilon_{гн} \delta K_{н}}.$$

Можно показать, что число ЧР в единицу времени в случае, если напряжения $U_{в,пр}$ и $U_{в,г}$ не зависят от полярности напряжения, определяется выражением

$$n_f = 4f \frac{U - \eta U_{ч,р}}{U_{ч,р} (1 - \eta)},$$

где U — воздействующее на изоляцию напряжение; f — частота; $\eta = U_{в,г}/U_{в,пр}$. По опытным данным $\eta = 0,5 + 0,8$.

наименьшее число ЧР в единицу времени имеет место при $U = U_{ч,р}$ и равно $n_{f,min} = 4f$. При $f = 50$ Гц $n_{f,min} = 200$ с⁻¹.

Если в изоляции имеется несколько газовых включений разного размера и расположенных различным образом в толще изоляции, то суммарное число ЧР в единицу времени

$$n_f = 4f \sum_{i=1}^{i=k} \frac{U - \eta U_{\text{ч,р},i}}{U_{\text{ч,р},i}(1 - \eta)},$$

где $U_{\text{ч,р},i}$ — напряжение появления ЧР в i -м включении; k — число включений в изоляции, для которых $U_{\text{ч,р},i} \leq U$.

Таким образом, при напряжениях $U \gg U_{\text{ч,р}}$ в газовых включениях регулярно возникают и гаснут ЧР. При каждом разряде в его канале рассеивается некоторая энергия $W_{\text{ч,р}}$, часть которой идет на разрушение изоляции. Средняя мощность регулярно повторяющихся ЧР определяется выражением

$$P_{\text{ч,р}} = n_f W_{\text{ч,р}}.$$

$$W_{ч,р} = \frac{C_3 (U_{в,пр}^2 - U_{в,г}^2)}{2},$$

где $C_3 = C_в + \frac{C_а C_б}{C_а + C_б}$ — эквивалентная емкость изоляции между теми точками схемы замещения, между которыми развивается ЧР. Поскольку $C_а \gg C_б$, а $C_в \gg C_б$, то $C_3 \approx C_а$.

Для оценки порядка величины $W_{ч,р}$ и $P_{ч,р}$ можно использовать формулу (1) для емкости $C_а$ и принять $U_{в,пр} = 300$ В, а $\eta = 0,5$. Тогда получим, что для включения, размер которого вдоль электрического поля $\delta = 0,1$ мм и площадь сечения $S_в = 1$ мм², энергия $W_{ч,р}$ имеет значение порядка 10^{-8} Дж, а средняя мощность $P_{ч,р}$ при $U_m = U_{ч,р}$ — порядка 10^{-6} Вт. Как видно, энергия $W_{ч,р}$ и средняя мощность $P_{ч,р}$ могут быть чрезвычайно малыми. Однако энергия $W_{ч,р}$ сообщается малым участкам поверхности газового включения за очень короткий промежуток времени, т. е. концентрированно, поэтому под действием ЧР происходит разрушение микрообъемов изоляции, прилегающих к газовому включению. Со временем размеры газового включения увеличиваются в направлении электрического поля, процесс завершается полным пробоем изоляции.

Тепловое старение

Диэлектрические материалы, используемые для изготовления внутренней изоляции установок высокого напряжения, при комнатной температуре практически инертны. Однако при рабочих температурах (60—130 °С) в этих материалах возникают или резко ускоряются химические реакции. Сущность этих реакций обычно весьма сложна и зависит от химического состава материалов, количества содержащейся в изоляции влаги, доступа кислорода из окружающего воздуха и ряда других факторов. На ход этих реакций могут оказывать влияние проводниковые и другие материалы, входящие в конструкцию. Например, медь проводников может быть катализатором термоокислительных процессов в минеральных маслах.

Для ограничения темпов теплового старения и обеспечения требуемых сроков службы изоляционных конструкций для отдельных видов изоляции устанавливаются наибольшие допустимые рабочие температуры (см. § 18.9).

Т а б л и ц а 18.1. Нагревостойкость электроизоляционных материалов (по ГОСТ)

Класс нагрево- стойкости	$T_{д.р.}, ^\circ\text{C}$	Краткая характеристика материалов
У	90	Непропитанные и не погруженные в жидкий диэлектрик волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шелка
А	105	Пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шелка
Е	120	Синтетические органические пленки
В	130	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами
Ф	155	То же, что класс В, но в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами
Н	180	То же, что класс В, но в сочетании с кремний-органическими связующими и пропитывающими составами
С	180	Слюда, керамика, стекло, кварц, применяемые без связующих или с неорганическими связующими составами

Механическое старение

Внутренняя изоляция или ее отдельные элементы из твердых диэлектрических материалов обычно подвергаются в эксплуатации значительным статическим, переменным и ударным механическим нагрузкам. Под действием этих нагрузок в материалах происходят медленные процессы старения, имеющие место даже тогда, когда нагрузки во много раз меньше разрушающих, а деформации носят чисто упругий характер. Сущность старения в этом случае состоит в том, что в напряженном материале возникает упорядоченное движение локальных дефектов (на молекулярном уровне) и за счет этого образуются и постепенно увеличиваются в размерах микротрещины. Когда количество и размеры микротрещин достигают некоторых критических значений, наступает разрушение.

Электрохимический механизм старения

Появление влаги в изоляции приводит к резкому снижению сопротивления утечки, так как во влаге содержатся растворенные и диссоциированные примеси, т. е. свободные ионы. Уменьшение сопротивления утечки опасно тем, что приводит к росту диэлектрических потерь. Вследствие этого снижается напряжение теплового пробоя и, кроме того, происходит дополнительный нагрев изоляции, что влечет за собой ускорение темпов теплового старения.

Чтобы предотвратить увлажнение внутренней изоляции в процессе эксплуатации, многие конструкции высокого напряжения выполняются герметичными. Особые трудности при этом возникают в тех случаях, когда конструкция содержит большой объем масла (силовые трансформаторы, реакторы, вводы). Изменения температуры масла в широких пределах (от -40 до $+90^{\circ}\text{C}$) приводят к значительным изменениям его объема. При отсутствии специальных мер охлаждение и уменьшение объема масла приводят к втягиванию в конструкцию большого количества влажного воздуха. Чтобы исключить этот эффект, используют специальные защитные устройства — воздухоосушители, гибкие диафрагмы и т. д.

Пробой жидких и твердых диэлектриков при кратковременных воздействиях

Пробой жидких диэлектриков

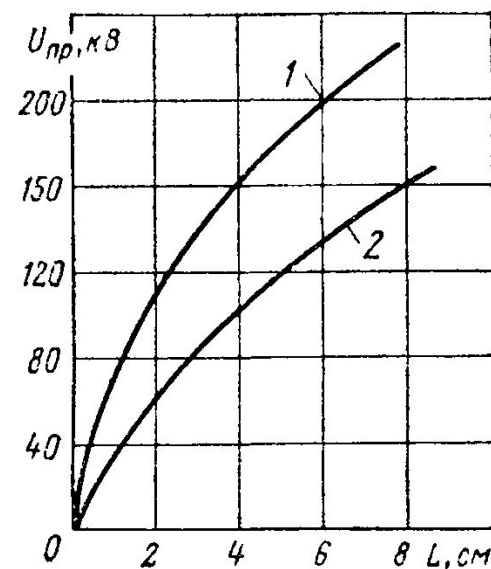
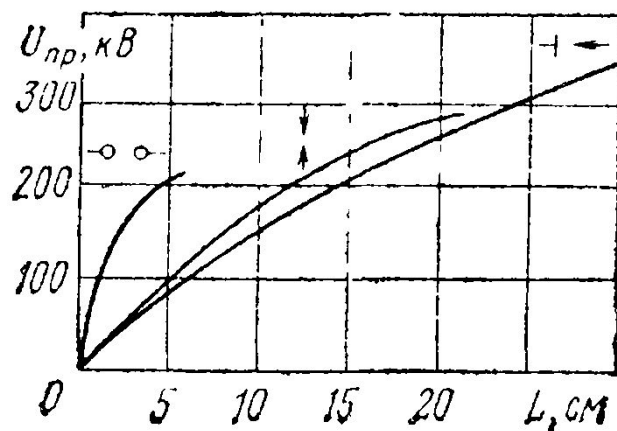
По происхождению жидкие диэлектрики бывают природные (нефтяное и касторовое масла) и синтетические (хлорированные углеводороды и кремнийорганические жидкости).

Наиболее распространены нефтяные изоляционные масла. Для их получения осуществляют перегонку нефти под вакуумом, в результате которой она разделяется на фракции. Одна из этих фракций — мазут — при дальнейшей перегонке дает соляровый дистиллят. Для удаления смол, серы и других вредных примесей дистиллят сначала обрабатывают крепкой серной кислотой, затем нейтрализуют щелочью, промывают водой и просушивают продуванием горячего воздуха. Фильтрацией через мелкоразмолотую отбеливающую глину производят дальнейшую очистку, и в зависимости от качества ее получают трансформаторное, кабельное или конденсаторное изоляционные масла. Конденсаторное масло — самое чистое, а трансформаторное имеет наибольшее количество примесей.

Электрическая прочность тщательно очищенного масла значительно превосходит прочность газов и приближается к прочности твердых диэлектриков. В однородном электрическом поле при разрядном напряжении между электродами вначале возникают отдельные самоугасающие искры. За счет содержащегося в масле газа и в результате испарения масла при нагреве его разрядом образуются газовые пузырьки, способствующие развитию разряда. При дальнейшем повышении напряжения возникновение искр учащается и, наконец, наступает устойчивый пробой при достаточно большой мощности источника в виде дуги.

В неоднородных полях вначале возникает стримерная корона. При повышении напряжения стримеры удлиняются и начинают перекрывать промежуток между электродами. Затем возникает устойчивый пробой.

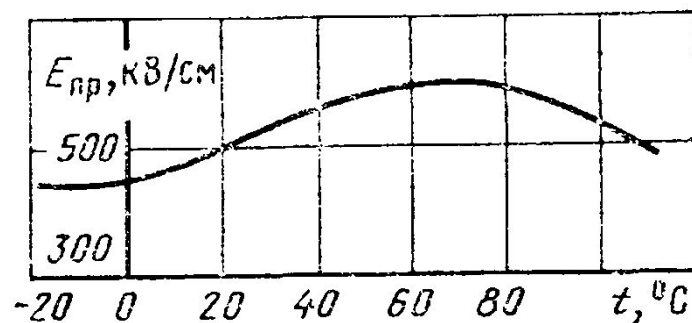
В технически чистом масле, как и в газах, разрядные напряжения уменьшаются с увеличением степени неоднородности электрического поля между электродами (рис. 11.1). При постоянном и импульсном напряжениях имеет место эффект полярности (рис. 11.2 и 11.3).



1 — отрицательный стержень; 2 — положительный стержень

При временах разряда до 1000 мкс, т.е. при воздействии импульсов напряжения, пробой масла является чисто электрическим. При больших временах на электрическую прочность и характер развития пробоя существенное влияние оказывают увлажнение и загрязнение масла. Влага может находиться в масле в трех состояниях: в растворенном виде, в виде эмульсии (под микроскопом в масле видны водяные шарики диаметром 2—10 мкм) и в виде отстоя на дне резервуара.

Молекулярно растворенная вода мало влияет на электрическую прочность масла. Вместе с тем даже малые доли процента эмульсионной воды значительно снижают его электрическую прочность (рис. 11.4). Это объясняется тем, что под действием электрического поля шарики эмульсионной воды поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий, образуя проводящий мостик, по которому и происходит разряд при более низком напряжении.



При увеличении температуры масла до 60—80 °С прочность масла возрастает (рис. 11.5), что объясняется переходом воды из эмульсионного в молекулярно-растворенное состояние. Дальнейшее повышение температуры вызывает испарение влаги, и прочность снижается из-за появления в масле пузырьков водяного пара.

Общее количество воды, которое может находиться в масле в молекулярно-растворенном и эмульсионном виде, ограничено. При содержании его более 0,02 % избыточная влага выпадает в виде отстоя на дно. Хотя сам отстой и не влияет на электрическую прочность, его появление свидетельствует о существенном ухудшении изоляционных свойств масел.

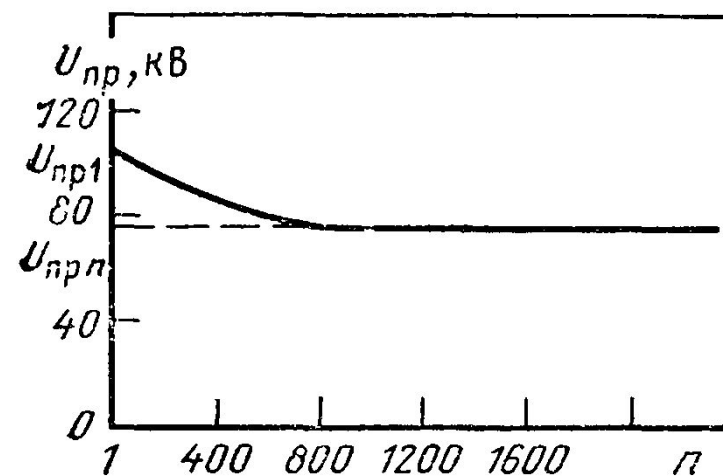
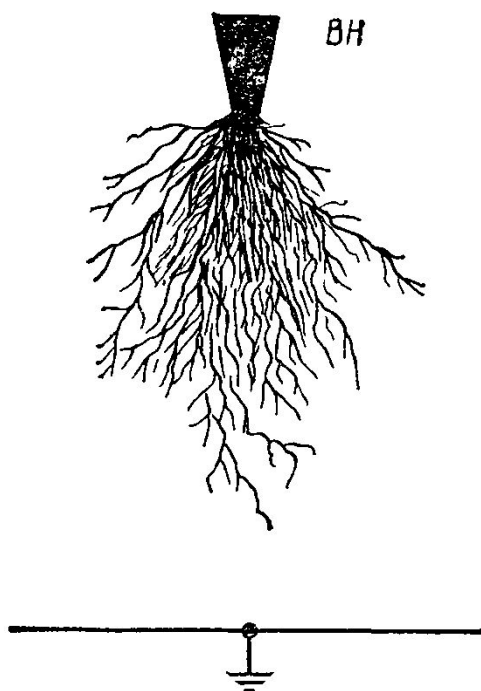
Разряд по поверхности твердого диэлектрика в масле

Относительная диэлектрическая проницаемость масла $\epsilon_{rм}$ значительно больше, чем воздуха ($\epsilon_{rм}=2,2\div2,4$; $\epsilon_{rв}=1$), и приближается к $\epsilon_{rд}$ твердого диэлектрика ($\epsilon_{rд}=3\div8$). Поэтому при одинаковых размерах и форме электродов и диэлектрика распределение электрического поля в масле более равномерное, чем в газе. Более равномерному распределению поля способствует также то, что масло имеет более высокую удельную объемную проводимость G . Наконец, масло по сравнению с газами имеет более высокую электрическую прочность. Благодаря этим факторам напряжения появления короны U_K и скользящих разрядов $U_{ск}$, а также разрядное напряжение U_p в масле существенно выше, чем в газах, при одинаковых размерах электродов и твердого диэлектрика.

Развитие короны и тем более скользящих разрядов на поверхности диэлектрика при рабочем напряжении недопустимо, особенно для органических материалов, которые могут быстро разрушаться вследствие воздействия на них повышенной температуры и химически активных веществ. При скользящих разрядах по поверхности слоистых диэлектриков вследствие высокой температуры в каналах разряда происходит интенсивное газообразование не только в масле, но и под верхним слоем твердого диэлектрика. Пузырьки газа не успевают выйти из-под этого слоя, и в дальнейшем скользящие разряды возникают внутри твердого диэлектрика. В результате происходит его «вспарывание».

Пробой твердых диэлектриков

При некоторой напряженности электрического поля свободные электроны накапливают энергию, достаточную для ионизации молекул диэлектрика. У электрода с малым радиусом кривизны сначала возникает очень тонкий канал разряда, который заполняется газообразными продуктами. Это приводит к значительному увеличению числа свободных электронов и дальнейшему развитию канала и его ветвлению. Разветвленные каналы имеют форму дендрита (рис. 11.6). Область, занимаемая каналами разряда, растет и достигает противоположного электрода. Завершение пробоя может сопровождаться механическим разрушением диэлектрика.

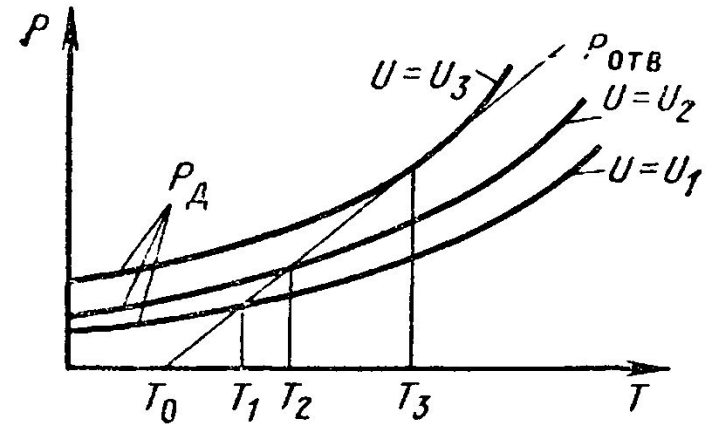


Тепловой пробой

$$P_{\text{Д}} = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta$$

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 e^{a(T-T_0)}$$

$$P_{\text{отв}} = \alpha S (T - T_0),$$



Основные виды внутренней изоляции

Маслобарьерная изоляция

Во многих изоляционных конструкциях (трансформаторы, вводы) используется изоляция, в которой промежутки с изоляционной жидкостью, обычно с трансформаторным маслом, перегорожены барьерами из твердой изоляции.

Действие барьера различно в однородных и неоднородных полях. В равномерном или слабонеравномерном поле барьер препятствует возникновению проводящих цепочек в изолирующей жидкости между электродами. Барьер, установленный вблизи электрода с большей напряженностью поля, повышает разрядное напряжение при длительном приложении напряжения промышленной частоты на 30 – 35 %. Аналогичное действие оказывает поверхностное покрытие твердым диэлектриком электрода, обладающего большей кривизной.

При импульсах проводящие цепочки не успевают образоваться, поэтому барьеры в слабонеравномерных полях не повышают импульсного напряжения. Это заключение, однако, относится к чистым промежуткам в масле. В реальных конструкциях с маслобарьерной изоляцией (МБИ), барьеры оказываются всегда эффективными.

Маслобарьерная изоляция

В резко неравномерном поле действие барьера в жидком диэлектрике аналогично действию барьера в газовом промежутке: разряды, возникающие в стадии короны, растекаясь по барьеру, выравнивают поле между барьером и плоскостью. Установка барьера повышает $U_{\text{пр}}$ промежутка с неравномерным полем в 2 – 2,5 раза. Наивысшие разрядные напряжения достигаются при установке барьера вблизи стержня на расстоянии 0,1 – 0,25d.

Коронный разряд в масле, возникающий в резко неравномерном поле при напряжении много меньше пробивного, может охватить весь промежуток между электродом и барьером. При грозовых и коммутационных импульсах коронный разряд не приводит к порче барьера, но при длительном приложении напряжения корона постепенно разрушает барьер, что приводит к уменьшению $U_{\text{пр}}$ всего промежутка. Поэтому возникновение коронного разряда при рабочем напряжении недопустимо. Так как наличие барьера не влияет на коронное напряжение, то в неравномерном поле барьеры не влияют на допустимую величину длительно приложенного напряжения.

Маслобарьерная изоляция

Типовая конструкция изоляции обмотки 110 кВ силового трансформатора. Главная изоляция состоит из масляных каналов и барьеров в виде изолирующих цилиндров. Барьеры затрудняют образование проводящих мостиков в масле и тем самым резко повышают электрическую прочность изоляционной конструкции. На конце обмотки электрическое поле неоднородно, что создает опасность поверхностного разряда по барьерам. С целью повышения разрядного пути изолирующие цилиндры выпускают за край обмоток. Для класса изоляции 110 кВ и выше необходимым дополнением к изолирующим цилиндрам должны быть угловые шайбы, удлиняющие путь поверхностного разряда на концах обмоток. Продольная изоляция обмоток 110 кВ и выше состоит из изоляции, покрывающей провода и катушки, и масляных каналов между катушками. Обмотка снабжена компенсирующим экраном.

Маслобарьерная изоляция

В конструкции изоляции для трансформаторов более высокого напряжения (например, 500 кВ) обмотка имеет петлевую конструкцию, так что в установке компенсирующих экранов нет необходимости. Угловые шайбы установлены не только между обмотками, но и на внешней стороне обмотки 500 кВ.

Уровень изоляции обмоток трансформатора определяется не только конструкцией изоляции напряжения изоляционными расстояниями, но и качеством изоляционных материалов. Для покрытия проводов и катушек применяется кабельная бумага; изолирующие цилиндры и угловые шайбы выполняются из прессшпана. В лучших образцах изолирующие цилиндры выполняются из электрокартона, а угловые шайбы штампуются из бумажно-целлюлозной массы. Все элементы волокнистой изоляции пропитываются маслом. Большое значение имеет технологическая обработка изоляции трансформатора, в частности сушка изоляции.

Маслобарьерная изоляция

На конструкцию изоляции трансформаторов сильное влияние оказывает то обстоятельство, что в активных частях трансформатора, т.е. в меди обмоток и в магнитопроводе, при работе выделяется большое количество тепла. Это заставляет выполнять изоляцию так, чтобы можно было непрерывно охлаждать активные части.

МБИ обладает достаточно высокой кратковременной электрической прочностью и позволяет интенсивно охлаждать конструкцию за счет циркуляции масла. Для того чтобы барьеры были эффективными, они должны располагаться перпендикулярно силовым линиям электрического поля. В проходных изоляторах, где электрическое поле в основном радикальное, это без труда достигается путем применения цилиндрических барьеров. В трансформаторах электрическое поле имеет сложную конфигурацию, поэтому приходится применять комбинацию барьеров разной формы.

Маслобарьерная изоляция

В трансформаторах в основном применяют три типа барьеров, показанных на рисунке: цилиндрический барьер 1, плоскую шайбу 2 и угловую шайбу 3. Количество барьеров зависит от номинального напряжения.

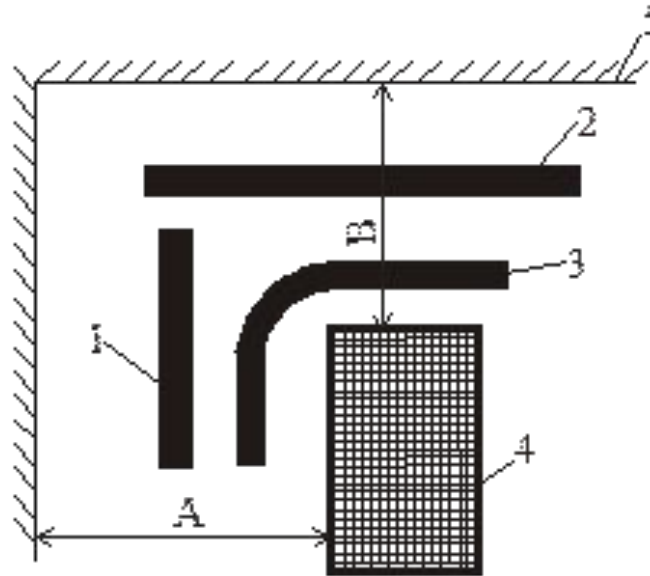


Схема главной изоляции обмотки силового трансформатора:

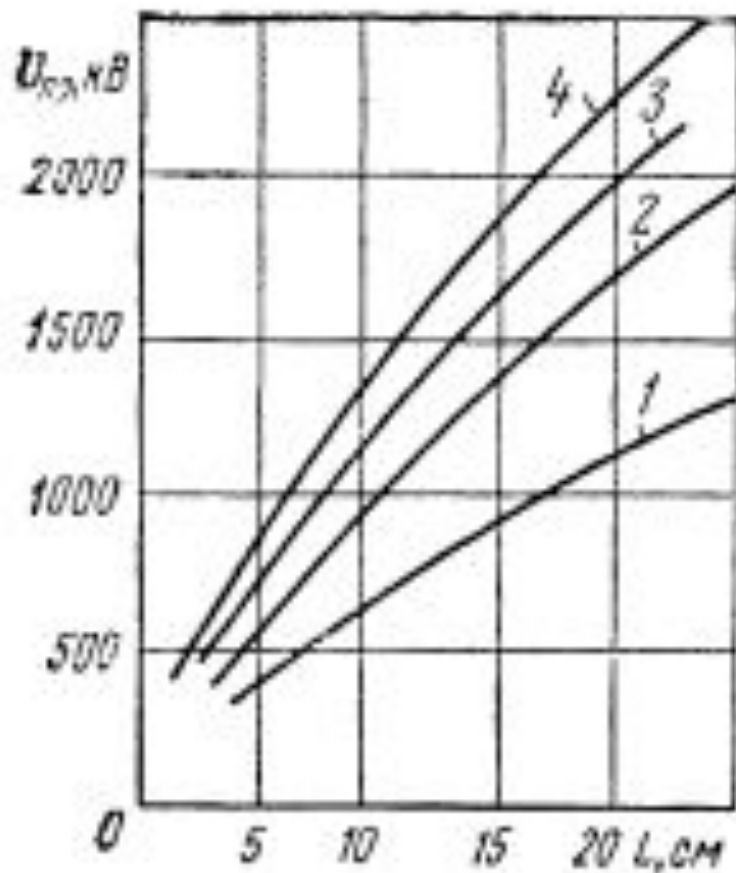
1 — цилиндрический барьер; 2 — плоская шайба; 3 — угловая шайба; 4 — обмотка ВН;

5 — ярмо магнитопровода; A и B - главные изоляционные расстояния

Маслобарьерная изоляция

Обычно расстояние от обмотки ВН до ярма приблизительно в два раза больше, чем расстояние до сердечника трансформатора, несмотря на то, что к этим промежуткам приложены одинаковые напряжения. Это связано с неблагоприятной формой электрического поля на концах обмотки, где напряженность имеет наибольшее значение. Поэтому при высоких номинальных напряжениях стремятся по возможности уменьшить напряжение на концах обмотки. Это удастся осуществить путем ввода напряжения в середину обмотки и деления ее на две параллельные ветви. В этом случае концы обмотки соответствуют нейтрали трансформатора, напряжение на которой в системах с заземленной нейтралью всегда меньше фазного. Это обстоятельство позволяет изоляцию нейтрали рассчитывать на меньшее напряжение, что значительно облегчает ее конструирование и уменьшает общие габаритные размеры трансформатора.

Маслобарьерная изоляция



Зависимость максимальных значений пробивного напряжения масло-барьерной изоляции от расстояния между обмотками трансформатора:

1 — $f=50$ Гц, $t=1$ мин; 2 — импульсы 600/1600 мкс;
3 — импульсы 1,2/50 мкс; 4 — срезанные импульсы при $t=2+3$ мкс

Маслобарьерная изоляция

Масло имеет меньшую электрическую прочность, чем твердая изоляция, поэтому при увеличении напряжения вначале происходит пробой наиболее нагруженного масляного промежутка (масляного канала). При этом ток в месте пробоя ограничивается сопротивлением последовательно включенной твердой изоляции и других масляных каналов, и поэтому полной потери изоляционных свойств не происходит. Однако в месте разрядов в масле создаются необратимые повреждения твердой изоляции, снижающие ее длительную электрическую прочность. Поэтому кратковременную электрическую прочность масло-барьерной изоляции принято характеризовать пробивным напряжением первого масляного канала.

Средством повышения электрической прочности МБИ служит также покрытие электродов сложной формы тонким слоем полимерного материала (поливинилбутирала — «бутвара»); а в случае электродов простой формы — изолирование их слоями бумажной ленты.

Твердая изоляция

Электрические характеристики твердых изоляционных материалов

Изоляционные материалы	$E_{пр}$, кВ/см	ϵ при 50 Гц	$\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц
Неорганические материалы:			
электрофарфор	280—350	6,0—7,2	0,02—0,04
стеатит	380—500	6,5—7,0	0,0005—0,003
стекло и стеклотекстолит	100—480	6,0—8,0	0,003—0,05
слюдаые изделия	120—500	5,8—7,5	0,008—0,07
асбест	30—60	7,0—8,0	0,2—0,5
Органические материалы:			
на основе целлюлозы:			
бумаги и картоны	100—500	2,2—2,7	0,001—0,03
фибра	35—70	—	—
гетинакс и текстолит	160—200	5,0—8,0	0,02—0,18
пропитанная древесина	40—80	7,0—8,0	0,06—0,3
синтетические материалы:			
термопластичные (поли- этилен, полистирол, фто- ропласт и др.),	250—600	2,2—4,0	0,0001—0,0008
термореактивные (эпоксидные компаунды)	250—500	—	0,01—0,05

Твердая изоляция

Керамические изоляционные материалы

Эти материалы получают из глинистых продуктов путем спекания при высокой температуре. Они представляют собой кристаллическую фазу и нерастворимы в воде. Формируются керамические изделия из пластичной массы при комнатной температуре. Дальнейший обжиг, сопровождающийся объемной усадкой, приводит к тому, что утрачиваются пластичные свойства исходного сырья, изделие становится твердым и стабильным по форме.

Фарфор и стеатит. Фарфор представляет собой силикат алюминия, в его состав входят 40 - 50 % каолина и глины (пластификатора), 20 - 30% оксида алюминия и 30% полевого шпата. Эта смесь дает высокопрочный фарфор (глинистый или глиноземистый фарфор) с лучшими механическими свойствами, чем применявшийся ранее кварцевый фарфор.

Твердая изоляция

Керамические изоляционные материалы

Стеатит представляет собой силикат магния. Затруднительная обработка, вызванная отсутствием связующего материала, является причиной того, что изделия из стеатита имеют малые размеры, и поэтому для изготовления больших изоляторов на высокие напряжения предпочитают использовать фарфор. Стеатит по сравнению с фарфором обладает лучшими механическими характеристиками и меньшими диэлектрическими потерями.

Фарфор в электроэнергетике используется в качестве изоляции воздушных линий электропередачи, газовых выключателей. Из фарфора изготавливаются опорные изоляторы разъединителей и сборных шин, вводы силовых трансформаторов, изоляционные конструкции измерительных трансформаторов напряжения и тока, изоляционные корпуса оборудования и т.д.

Твердая изоляция

Стекла

Они получают путем спекания различных оксидов. Наибольшее значение при изготовлении стекол имеют диоксид кремния SiO_2 в виде кварцевого песка, триоксид бора B_2O_3 и оксиды металлов PbO , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , BaO и др. При изготовлении стекол широко применяются более 500 видов разнообразных добавок. С их помощью получают и бесщелочное электротехническое стекло (содержание щелочи менее 0,8%), обладающее малой электропроводностью.

Е-стекло имеет преимущества при использовании в электротехнике по сравнению со щелочными стеклами. Стекла применяются в концевых разделках кабелей, при изготовлении вводов, конденсаторов, тарельчатых изоляторов воздушных линий электропередачи.

Твердая изоляция

Стекла

Е-стекло используется прежде всего в виде волокна для изготовления стеклопластиков. Волокна в электротехнических материалах содержат в зависимости от способа их вытягивания защитную оболочку с хорошим сцеплением эпоксидного основания и заполнителя.

Так как модуль упругости и прочность на разрыв стеклянных нитей гораздо выше, чем у эпоксидных смол, то материалы на основе стекловолокна обладают хорошими механическими свойствами. Стекловолоконными нитями бандажируются, например, обмотки электрических машин и укрепляются пакеты стали в трансформаторах. Стеклоткань используется для механического упрочнения изоляционных плат и труб для камер выключателей; стекловолоконный стержень является несущей частью стеклоэпоксидных подвесных изоляторов.

Твердая изоляция

Слюда

Это природный минерал, образованный различными химическими соединениями. Важнейшими видами слюды, применяемыми в электротехнике, являются мусковит (калиевая слюда, расщепляемая на тонкие слои) и флогопит (магниева слюда). Кристаллы слюды обладают способностью под действием механической нагрузки расщепляться по определенным кристаллографическим плоскостям. Это объясняется тем, что их кристаллическая структура представляет собой решетку с очень прочными связями в одной плоскости и со слабыми связями в плоскости, перпендикулярной первой.

В технике высоких напряжений преимущественно используется только такая слюда, которая при расщеплении дает крупные пластинки овальной или многоугольной формы толщиной от 0,02 до 0,10 мм. Для изготовления конденсаторов применяется так называемая блочная слюда с пластинами толщиной от 0,18 до 0,76 мм.

Слюда обладает термостойкостью вплоть до 600°C, ее температура плавления составляет 1200 - 1300°C. Слюда стойка к воздействию дуги, масла, облучения, противостоит тлеющим разрядам.

Твердая изоляция

Слюда

Применяемые в технике высоких напряжений пластинки слюды скрепляются, например, силиконовой или эпоксидной смолой, в результате чего образуются пластины или трубы стабильной формы (миканит), или наклеиваются на подложку из бумаги или стеклошелка - образуются гибкие полосы (микафолий).

Миканит применяется для изоляции коллекторных пластин электрических машин, цоколей ламп, элементов крепления электродов в электронных лампах, каркасов и т. д.

Микафолий представляет собой гибкую подложку - полосу бумаги или стеклошелка, на которую с нахлестом наклеены пластинки слюды с помощью шеллака, силиконовой или эпоксидной смолы.

Высокие теплостойкость, механическая прочность, негорючесть, устойчивость при воздействии масла и влаги позволяют использовать микафолий при изготовлении изоляции асинхронных двигателей, обмоток генераторов и сухих трансформаторов.

Твердая изоляция

Слюда

Слюдаинитовая лента состоит из одного слоя слюдинитовой бумаги толщиной 0,04 мм и одного или двух слоев подложки из стеклоленты толщиной 0,04 мм. Такая композиция обладает достаточно высокой механической прочностью (за счет подложек) и отмеченными выше качествами, характерными для слюды.

Из слюдинитовых лент и пропитывающих составов на основе эпоксидных и полиэфирных смол изготавливают терморезистивную изоляцию, которая при нагреве не размягчается, сохраняет высокую механическую и электрическую прочность.

Твердая изоляция

Слюда

Возможны два способа изготовления такой изоляции. В первом варианте намотка осуществляется лентами, заранее пропитанными под вакуумом термореактивным составом. После наложения необходимого количества слоев изоляция под вакуумом разогревается и опрессовывается до отверждения пропиточного состава. Во втором варианте намотка осуществляется сухой (непропитанной) лентой. Затем проводится сушка под вакуумом, пропитка горячим составом, нагнетаемым с избыточным давлением, и опрессовка до отверждения пропиточного состава. В обоих случаях режимы основных технологических операций выбираются так, что обеспечивается плотное прилегание слоев друг к другу и к проводникам обмотки, надежное заполнение термореактивным составом всех зазоров между слоями и пор в самих лентах. Соответствующие виды термореактивной изоляции у нас в стране называют «слюдотерм» и «монолит».

Твердая изоляция

Асбест – негорючий и теплостойкий минерал. Благодаря волокнистой структуре из него изготавливаются ткани, листы, плиты и пр. Используется для теплостойкой изоляции, предохранения от действия электрической дуги. Из-за наличия окислов железа и влаги асбест является полупроводящим материалом (удельное сопротивление до 10^4 Ом·м) и поэтому используется также в качестве полупроводящих покрытий и прокладок.

Твердая изоляция

Органическая изоляция

Органическая изоляция создается на основе целлюлозы, синтетических материалов или каучука. Основными недостатками изоляции на основе целлюлозы являются ее высокая гигроскопичность и низкая теплостойкость. Для уменьшения гигроскопичности бумагу пропитывают лаками или смолами. Пропитанные термореактивной бакелитовой смолой и спрессованные листы бумаги после термообработки образуют монолитный материал с высокими с высокими механическими свойствами, называют текстолитом.

Бумага обработанная хлористым цинком и спрессованная в виде листов или труб, называется фиброй. Этот материал поддается всем видам механической обработки и используется для обеспечения дугогашения в трубчатых разрядниках.

Высушенная и пропитанная древесина твердых пород используется для изготовления крепежных деталей. При термическом разложении фибра выделяет большое количество газов, поэтому она используется для изготовления крепежных деталей и прокладок. Из тонких листов древесного шпона после пропитки изоляционными смолами, прессования и термообработки получают дельта-древесину – листовой материал с высокими механическими свойствами и хорошими электрическими характеристиками.

Твердая изоляция

Высокомолекулярные полимерные изоляционные материалы

Эти материалы состоят из макромолекул, представляющих собой объединение по меньшей мере многих сотен атомных групп. Объединение атомных групп в макромолекулы может существовать в трех формах.

Одномерные группы образуют молекулы в виде более или менее длинных нитей - термопластов. Двумерные группы дают плоские макромолекулы. Трехмерные группы формируют пространственные макромолекулы, и материалы с такими молекулами называют duroпластами.

Формирование групп называют полиреакциями, при этом различают следующие процессы: полимеризацию, поликонденсацию и ступенчатую полимеризацию.

Твердая изоляция

Высокомолекулярные полимерные изоляционные материалы

Полимеризация. Этим термином обозначают полиреакции, при которых одинаковые или похожие так называемые мономеры (конструкционные элементы), имеющие двойные химически активные связи, объединяются друг с другом, причем увеличение молекул происходит без образования побочных продуктов.

Благодаря такому цепочечному объединению элементов возникают линейные молекулы. Если полимеризация происходит с участием мономеров одного вида, то ее называют гомополимеризацией. Если же в реакции принимают участие два и более вида мономеров, то речь идет о кополимеризации.

Твердая изоляция

Поликонденсация. В противоположность полимеризации в поликонденсации участвуют неодинаковые мономеры, образующие цепочечные или разветвленные макромолекулы. Мономеры должны иметь две, три и т. д. активные связи. Соединение функциональных групп сопровождается выделением побочных продуктов, таких, как вода, аммиак и др. Эти продукты в процессе полиреакции приводят к образованию пустот, и поэтому материалы, полученные поликонденсацией, могут быть использованы, как правило, при низких напряжениях.

Ступенчатая полимеризация. Это реакция полиприсоединения маломолекулярных элементов с двумя и более связями в вещество с активными атомами водорода путем отдельных, не зависящих друг от друга единичных реакций, при этом объединение групп происходит без образования побочных продуктов, чаще всего за счет смещения атомов водорода. Появляющиеся таким образом материалы обладают высокими диэлектрическими свойствами. Их называют полиаддуктами или продуктами ступенчатой полимеризации.

Твердая изоляция

Сводный перечень применяемых в технике высоких напряжений пластмасс

Тип полимеров, реакции	Дуропласты	Термопласты
Полимеризация	Сшитые полиэфирные смолы на основе ненасыщенных полиэфиров.	Полиэтилен (PE), полипропилен (PP), поливинилхлорид (PVC), полистирол (PS), полиацетал (POM) и др.
Поликонденсация	Фенольные смолы (PF), меламинные смолы (MF), алкидные смолы и т.д.	Линейные насыщенные полиэфирные смолы: поликарбонат (PC), нейлон, перлон, полиимиды.
Ступенчатая полимеризация	Эпоксидные смолы (EP), сшитые полиуританы (PUR) и др.	Линейные полиуританы (PUR).



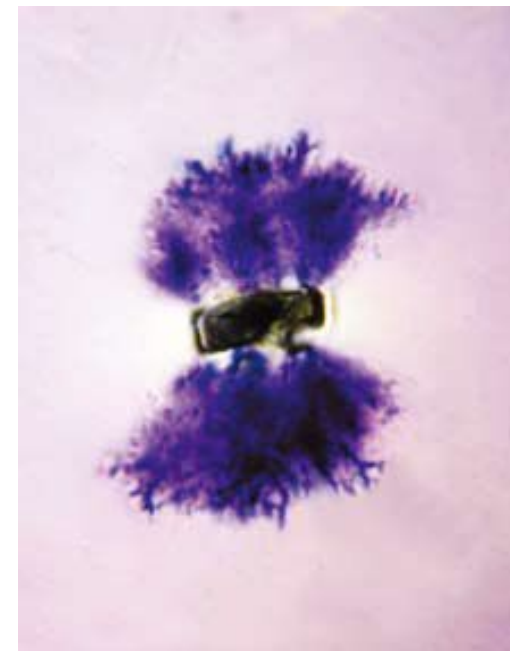
Водные триинги типа «бант», обладающие собственным оптическим поглощением в различных участках спектра. Различия обусловлены разницей в химической природе дефектов, на которых выросли триинги



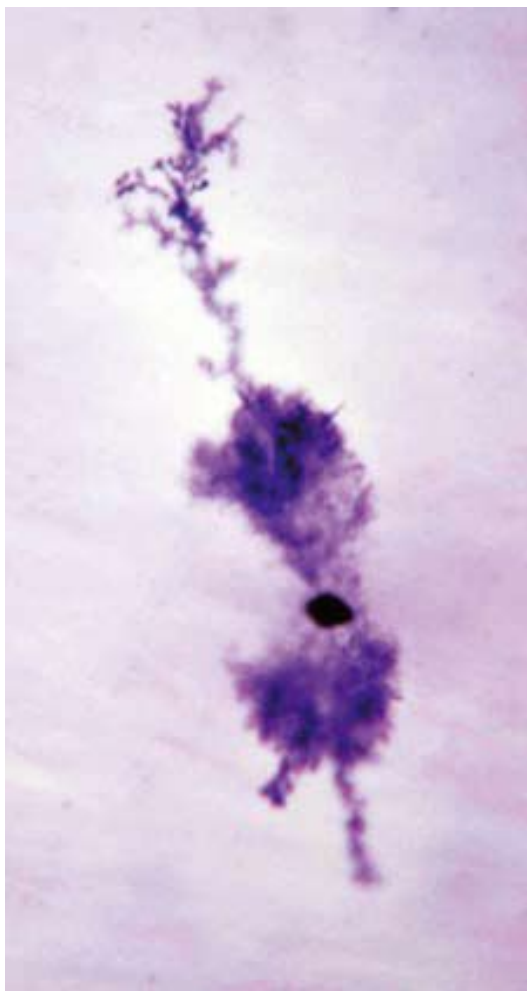
Водный триинг, зародившийся на волокне гидрофильного целлюлозного материала. Окраска метиленовым голубым



Водный триинг типа «веер», зародившийся на выступе электропроводящего экрана. Окраска метиленовым голубым



Триинг типа «бант», зародившийся на инородном включении в объеме изоляции. Окраска метиленовым голубым



При электрохимическом старении экструдированной изоляции силовых кабелей отказовое состояние достигается следующим образом. Сначала в течение длительного времени развиваются водные триинги; затем, по мере того как их размеры, а также степень деградации полимера в объеме ВТ достигают некоторого критического уровня (вступают в некоторую критическую область), на водных триингах как на вторичных дефектах зарождаются электрические триинги, которые сравнительно быстро прорастают через весь изоляционный слой, приводя к пробое.

Твердая изоляция

Эластомеры

К эластомерам относится силиконовая резина. Силиконовая резина - это материал, получаемый путем вулканизации силиконового каучука.

Силиконовый каучук не окисляется, стоек к воздействию озона, света, жиров и хлорированных дифенилов. Пары воды силиконовая резина впитывает лишь при температуре выше 130°C и разрушается только при больших временах воздействия паров. Силиконовая резина набухает в бензине, алифатических углеводородах, в ароматических растворителях и маслах и теряет свою механическую прочность.

Силиконовая резина горячей вулканизации применяется в качестве изоляции жил и оболочек кабелей, используемых в технике связи и электроснабжении, для уплотнений вводов в аппараты с жидкой средой и изготовления изоляции проводов и защитных колпаков распределителей в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания. Самоклеящиеся ленты из борсодержащей силиконовой резины используются в качестве изоляции кабелей.

Твердая изоляция

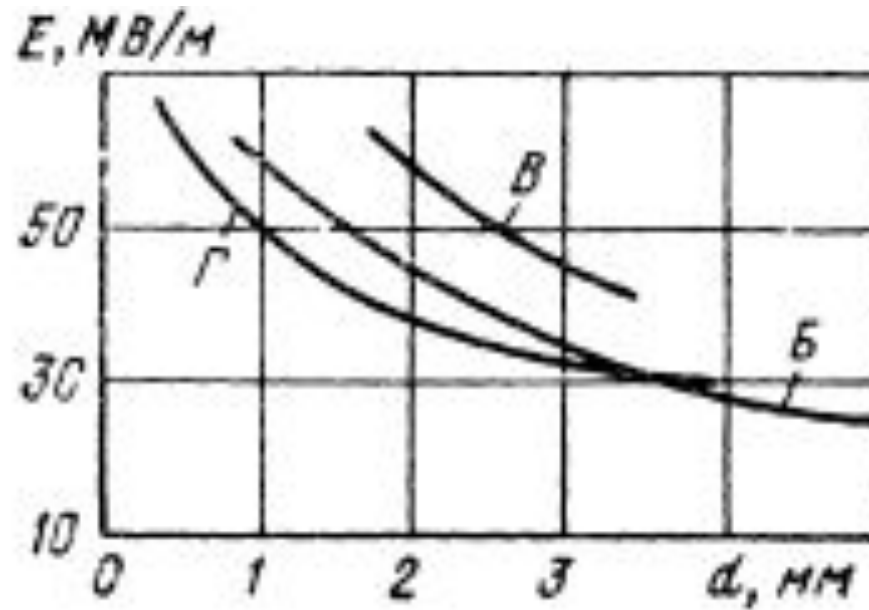
Эластомеры

Важнейшей областью применения силиконовой резины в технике высоких напряжений является изготовление подвесных изоляторов для воздушных линий электропередачи, состоящих из стеклотекстолитового стержня, устойчивого к растяжению, и экранов. Расширяется применение силиконовой резины при производстве штепсельных разъемов с регулированием поля для кабелей с пластмассовой изоляцией, работающих при средних напряжениях.

Твердеющие при низкой температуре материалы используются преимущественно для заливки обмоток и изготовления деталей, работающих при повышенных температурах.

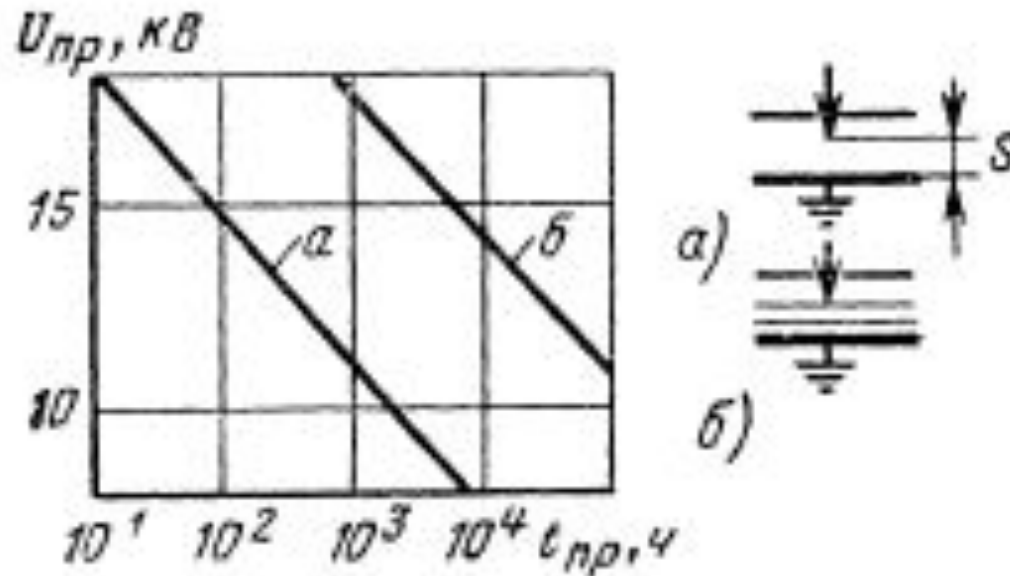
Существуют также другие виды эластомеров, такие, как этиленпропилен-кополимеризат (ЕРМ) и фторкаучук.

Твердая изоляция



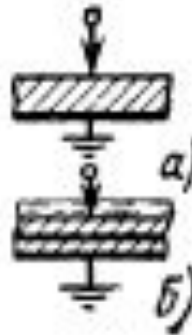
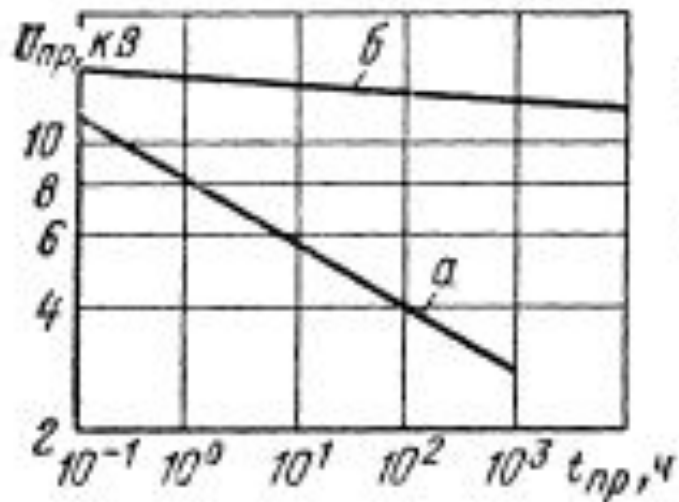
Зависимость электрической прочности картона марок Б, В и Г от толщины при испытаниях в трансформаторном масле (температура 90 ± 5 °C)

Твердая изоляция



Зависимость времени пробоя от приложенного напряжения для образцов ($d=3$ мм) с однородной (а) и многослойной (б) пленочной изоляцией

Твердая изоляция



Зависимость времени пробоя от приложенного напряжения для образцов из полиэтилена в воздухе (а) и пропитанного минеральным маслом (б). Толщина изоляции 100 мкм

Твердая изоляция

Бумажно-масляная изоляция

Бумажно-масляная изоляция состоит из слоев бумаги, пропитанной минеральным маслом. Из-за шероховатости бумаги между ее слоями имеются зазоры, заполненные маслом. Толщина масляных прослоек не превышает десятых долей миллиметра.

В зависимости от конструкции применяются два варианта исполнения изоляционного слоя.

Листовая или рулонная изоляция выполняется из сплошных листов или рулонов бумаги и применяется в конденсаторах и проходных изоляторах (вводах). Ленточная изоляция применяется для изолирования конструкций сложной формы или большой длины, а также в тех случаях, когда требуется обеспечить гибкость изоляции при монтаже или эксплуатации оборудования (например, в кабелях). Бумажная лента при этом может накладываться на изолируемые части последовательными слоями по спирали с положительным или отрицательным перекрытием. Ленточная изоляция с положительным перекрытием применяется, как правило, для изолирования конструкций сложной формы при ручной намотке, например, в трансформаторах тока. Изолирование с отрицательным перекрытием применяется при машинной намотке бумажных лент, например, для кабельной изоляции.

Твердая изоляция

Для удаления влаги и газов перед пропиткой минеральным маслом изоляция сушится под вакуумом при остаточном давлении $1,33—0,0.133$ Па ($10^{-2}—10^{-4}$ мм рт. ст.) и температуре $100—120^{\circ}\text{C}$.

Бумажно-масляная изоляция обладает высокой электрической прочностью, превосходящей прочность ее компонентов. Пробивные напряженности тонких слоев бумажно-масляной изоляции в поперечном по отношению к бумаге направлении составляют $500—600$ кВ/см, в то время как масло имеет напряженность пробоя около 200 кВ/см, кабельная бумага $100—150$ кВ/см а более плотная конденсаторная бумага $150—500$ кВ/см.

Прочность бумажно-масляной изоляции вдоль слоев бумаги существенно (в $10—20$ раз) ниже прочности в поперечном направлении, поэтому для нее опасны продольные составляющие напряженности электрического поля.

В зависимости от качества исходных материалов и технологии изготовления допустимые рабочие напряженности в бумажно-масляной, изоляции составляют $120—180$ кВ/см, в то время как в масляно-барьерной изоляции только $40—60$ кВ/см.

Твердая изоляция

Газовая изоляция

Применение газовой изоляции дает ряд преимуществ по сравнению с твердыми и жидкими диэлектриками. В частности, газовая изоляция отличается очень малыми диэлектрическими потерями и практически не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации. Применение ее приводит к резкому снижению массы конструкции и обеспечению ее пожаробезопасности. В ряде случаев конструкция устройства упрощается.

При увеличении давления электрическая прочность элегаза (SF_6) и воздуха становится выше прочности твердых и жидких диэлектриков, например минерального масла.

Газы, используемые для изоляции установок высокого напряжения, должны быть химически стойкими в электрическом разряде (не выделять химически активных веществ) и инертными (не вступать в реакции с материалами, в сочетании с которыми они применяются), а также обладать высокой теплопроводностью и низкой температурой сжижения, допускающей их применение при повышенных давлениях. Помимо этого, они должны быть негорючими и нетоксичными, а также иметь невысокую стоимость.

Твердая изоляция

Газовая изоляция

В настоящее время в качестве изоляции применяются воздух, азот и элегаз. Из них наибольшей электрической прочностью, превышающей прочность азота и воздуха примерно в 2,5 раза, обладает элегаз. Причина этого заключается в том, что элегаз является электроотрицательным газом, в состав его молекулы SF_6 входит фтор — галоген, легко присоединяющий к себе электрон и образующий устойчивые отрицательные ионы.

Рабочие давления элегаза ограничиваются возможностью его сжижения при сравнительно высоких температурах. При давлении около 0,3 МПа температура сжижения элегаза составляет -45°C , а при 0,5 МПа составляет -30°C . Такие температуры не являются редкостью для средней полосы, а тем более для северных районов нашей страны.

Твердая изоляция

Газовая изоляция

Понизить температуру сжижения элегаза, а следовательно, увеличить рабочее давление можно добавкой газов, имеющих более низкие температуры сжижения, например азота, температура сжижения которого при 3 МПа составляет -70°C . При 70%-ном содержании азота в элегазе температура сжижения смеси при давлении 8 МПа составляет -45°C . Таким образом, рабочее давление такой смеси при температуре -45°C почти в 30 раз больше, чем у чистого элегаза. Электрическая прочность такой смеси всего на 10—15% ниже прочности чистого элегаза.

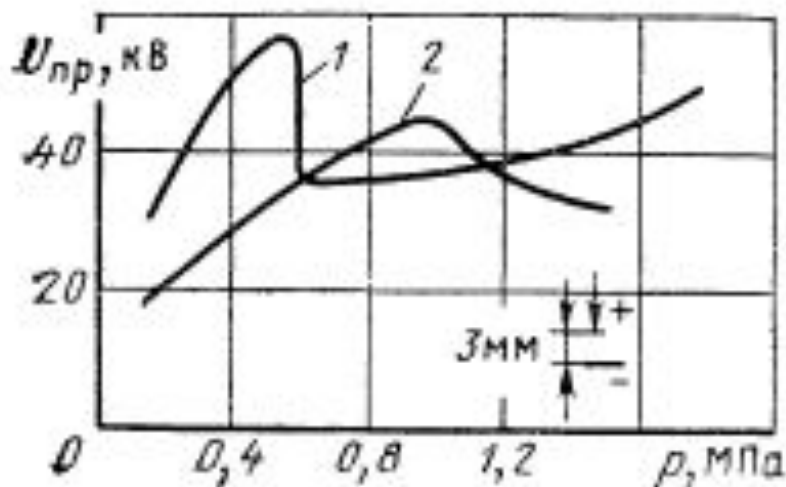
Области применения газовой изоляции разнообразны. Воздух под избыточным давлением в несколько атмосфер используется в основном в образцовых конденсаторах на напряжение до 35 кВ. Ограниченное применение воздуха связано с тем, что при частичных разрядах в воздухе образуется озон, вызывающий коррозию металлов и разрушение твердых диэлектриков.

Азот и элегаз применяются для изоляции конденсаторов, трансформаторов, кабелей и герметизированных распределительных устройств.

Твердая изоляция

Газовая изоляция

Элегаз является не только хорошей изолирующей, но и хорошей дугогасящей средой. Ток отключения в элегазе примерно в 10 раз больше, чем в воздухе. Если же учесть, что в элегазе скорость восстановления электрической прочности после погасания дуги почти на порядок выше, чем в воздухе, то из этого следует, что мощность отключения в элегазе может быть почти в 100 раз больше, чем в воздухе. По этой причине элегазовые выключатели успешно конкурируют с воздушными.

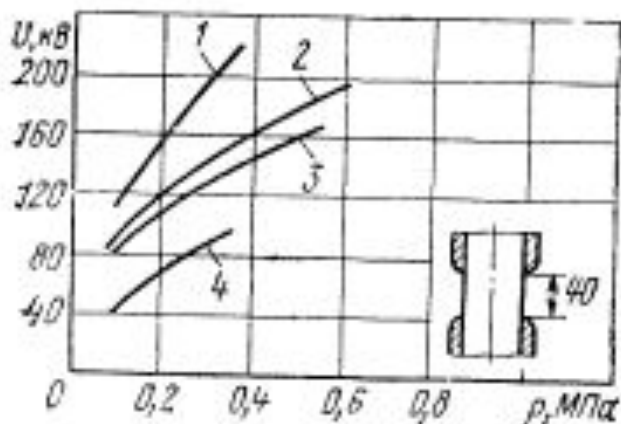


Зависимость пробивного напряжения промежутков с резконеоднородным полем от давления:

1 — элегаз; 2 — воздух

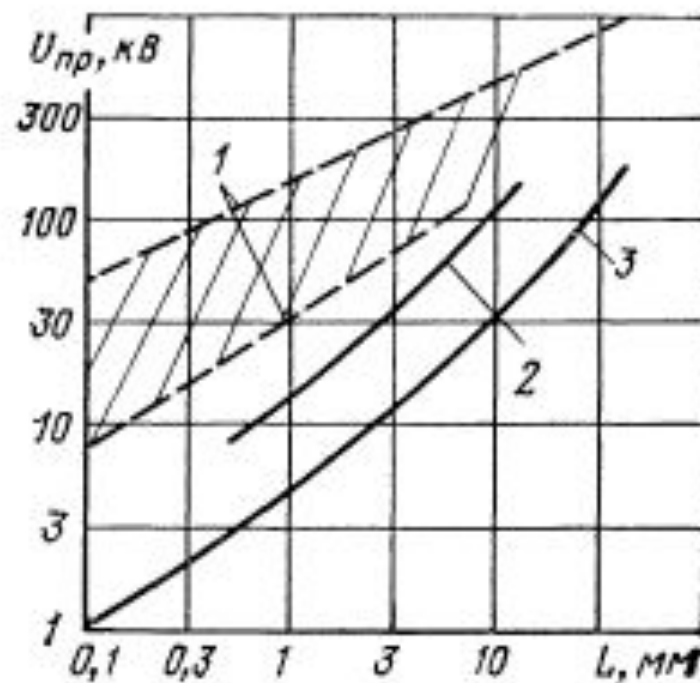
Твердая изоляция

Газовая изоляция



Разрядные напряжения вдоль поверхности различных изоляционных материалов в элегазе в зависимости от давления:

1 — чисто газовый промежуток; 2 — фторопласт-4; 3 — эпоксидный компаунд; 4 — стеклотекстолит



Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами:

1 — технический вакуум; 2 — элегаз; $p=0,1$ МПа; 3 — воздух, $p=0,1$ МПа

Твердая изоляция

Вакуумная изоляция

Промежутки, для которых произведение давления газа на межэлектродное расстояние лежит в пределах 0,01—0,2 кПа·см, считаются вакуумными. Возникновение разряда в них определяется практически только процессами на электродах.

В ряде случаев электрическая прочность вакуумной изоляции может быть выше, чем газовой.

Различают три вида нарушения электрической прочности вакуумной изоляции. Во-первых, появление более или менее стабильных токов плотностью 10^{-4} — 10^{-3} А/см², резко зависящих от приложенного к электродам напряжения. Эти токи называются темповыми или предпробойными. Во-вторых, возникновение периодически повторяющихся самогасящихся маломощных, импульсов тока 10^{-4} — 10^{-3} А/см² и длительностью 10^{-4} — 10^{-3} с с частотой повторения от долей до десятков и сотен герц. В-третьих, возникновение пробоя всего изоляционного промежутка. Пробой характеризуется резким спадом межэлектродного напряжения и образованием дуги.

Твердая изоляция

Вакуумная изоляция

Под нарушением электрической прочности вакуумной изоляции понимают те явления, которые ограничивают подъем напряжения на электродах в данной конкретной установке. В одном случае это пробой при быстром подъеме напряжения, в других — возникновение редких импульсов тока при длительном приложении напряжения или появления темновых токов. Таким образом, в зависимости от требований, предъявляемых к вакуумной изоляции, в понятие электрической прочности может вкладываться разный смысл.

Отличительной чертой вакуумной изоляции являются очень большие разбросы пробивных напряжений и напряжений появления темновых и импульсных токов (измеренные значения могут отличаться друг от друга в 1,5—3 раза), что объясняется особенностью микроструктуры поверхности электродов и их чистотой (адсорбционные и окисные пленки). Характеристики поверхности зависят от материала и чистоты обработки электродов и могут изменяться при воздействии разрядов.

Твердая изоляция

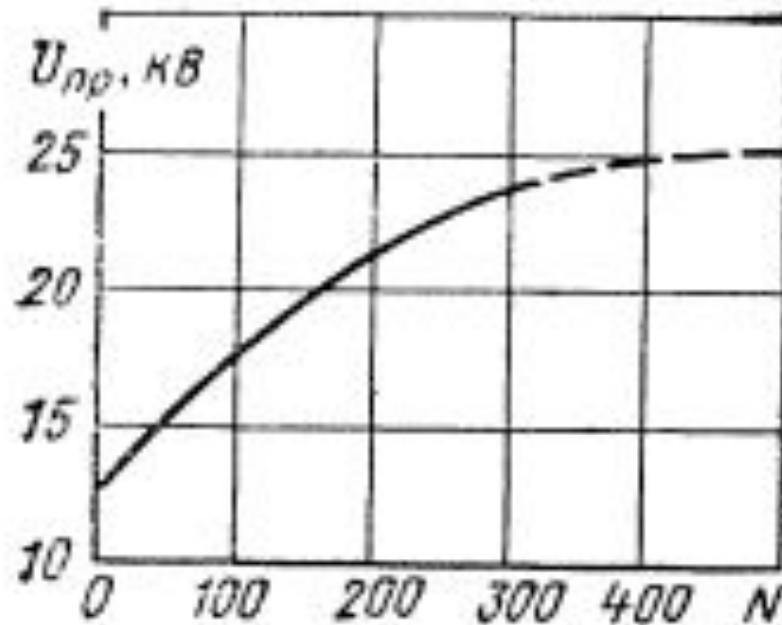
Вакуумная изоляция

Уменьшить разброс пробивных напряжений удастся с помощью тренировки электродов, представляющей собой серию пробоев вакуумного промежутка до установления стабильного напряжения. При пробоях вакуумного промежутка происходит нагрев электродов и испарение материала с их поверхности. В результате этого поверхность электродов становится более гладкой и очищается от посторонних веществ, что и приводит к повышению и стабилизации пробивного напряжения.

В установках с вакуумной изоляцией, так же как и с газовой, электрическая прочность промежутка, очень часто определяется разрядным напряжением по поверхности твердых изоляторов, которые применяются для крепления различных узлов установки. Для повышения и стабилизации разрядного напряжения по поверхности твердого диэлектрика также проводят тренировку, т.е. выдерживают промежуток под напряжением.

Твердая изоляция

Вакуумная изоляция



Зависимость пробивного напряжения вакуумного промежутка от числа тренировочных пробоев

Твердая изоляция

Вакуумная изоляция

Вакуумная изоляция используется в установках и приборах, где вакуум является рабочей средой. Это—ускорители, космические двигатели, электростатические сепараторы, электровакуумные приборы. Вакуумная изоляция применяется также в конденсаторах на 20—50 кВ, в выключателях высокого напряжения, вакуумных разрядниках и реле. Использование вакуумной изоляции в выключателях представляет интерес благодаря быстрому восстановлению электрической прочности промежутка после пробоя (10^{-3} — 10^{-4} с); применение вакуумной изоляции в искровых реле позволяет получать хорошие временные характеристики реле: нестабильность времени срабатывания меньше 10 нс.

Недостатками вакуумной изоляции являются конструктивные сложности получения высокого вакуума и сложная технологическая обработка токоведущих частей.

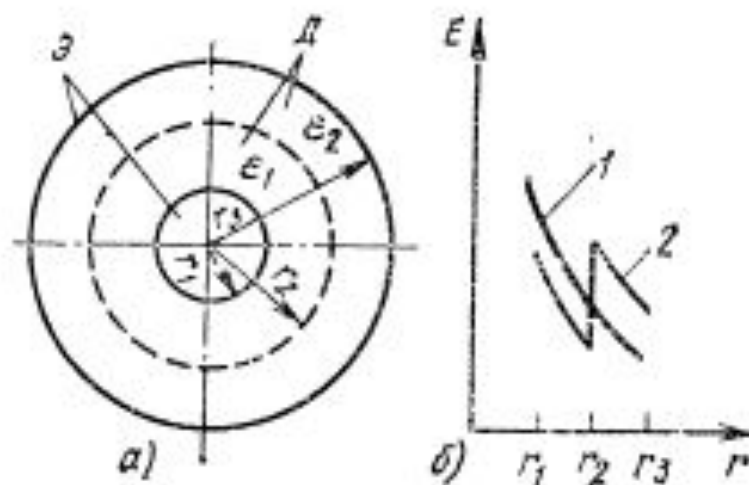
РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВО ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

ГРАДИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

Одним из способов регулирования электрического поля в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией является градирование изоляции, которое осуществляется посредством комбинации материалов с различными диэлектрическими проницаемостями. Этот способ широко применяется в кабельной изоляции.

Регулирование электрического поля с помощью градирования изоляции:

a — схема изоляции; $\mathcal{E}$ — электрод, D — диэлектрик; b — распределение напряженности в радиальном направлении: 1 — в неградуированной изоляции; 2 — в градуированной изоляции



РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВО ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРНЫХ ОБКЛАДОК

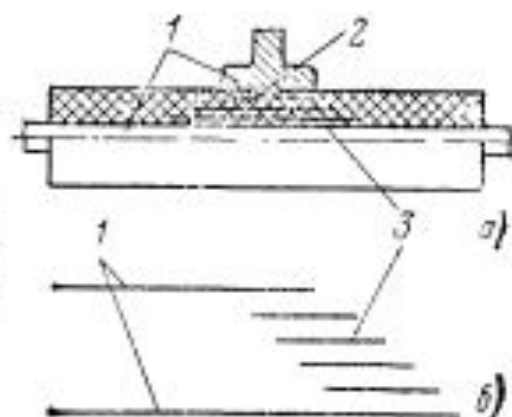
Регулирование электрического поля в конструкциях с бумажно-масляной изоляцией может осуществляться с помощью так называемых конденсаторных обкладок, представляющих собой дополнительные электроды из металлической фольги, которые располагаются в толще изоляции между главными электродами. В результате образуется цепочка последовательно включенных конденсаторов, емкости которых при переменном напряжении (или сопротивлении изоляции между обкладками при постоянном напряжении) определяют распределение напряженностей в изоляции.

Путем изменения размеров, числа и взаимного расположения конденсаторных обкладок можно изменять емкости последовательно включенных конденсаторов, регулируя тем самым характер распределения напряженностей.

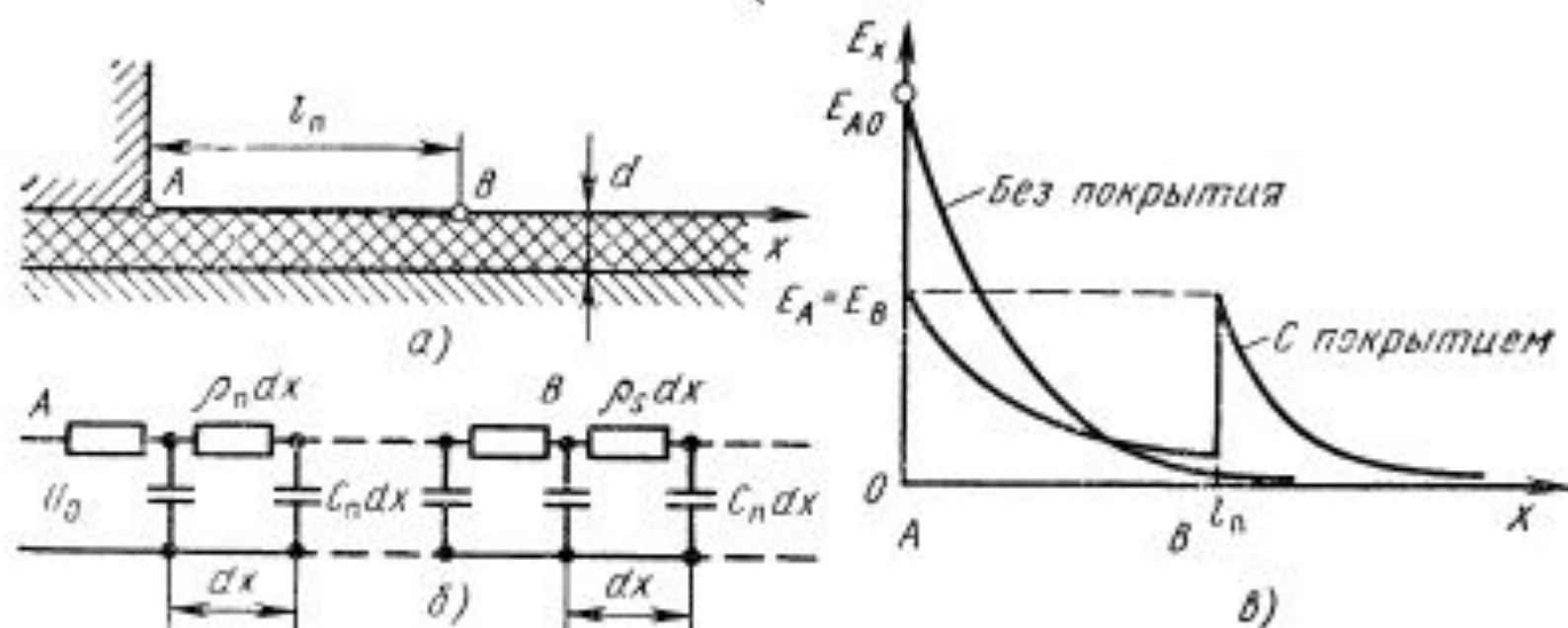
РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВО ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Варианты расположения конденсаторных обкладок в изоляции:

а — между электродами для регулирования в области основной изоляции; *б* — между дополнительными электродами для регулирования поля между их краями; 1 — электроды; 2 — диэлектрик; 3 — конденсаторные обкладки



ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОКРЫТИЙ



Регулирование электрического поля с помощью полупроводящего покрытия:

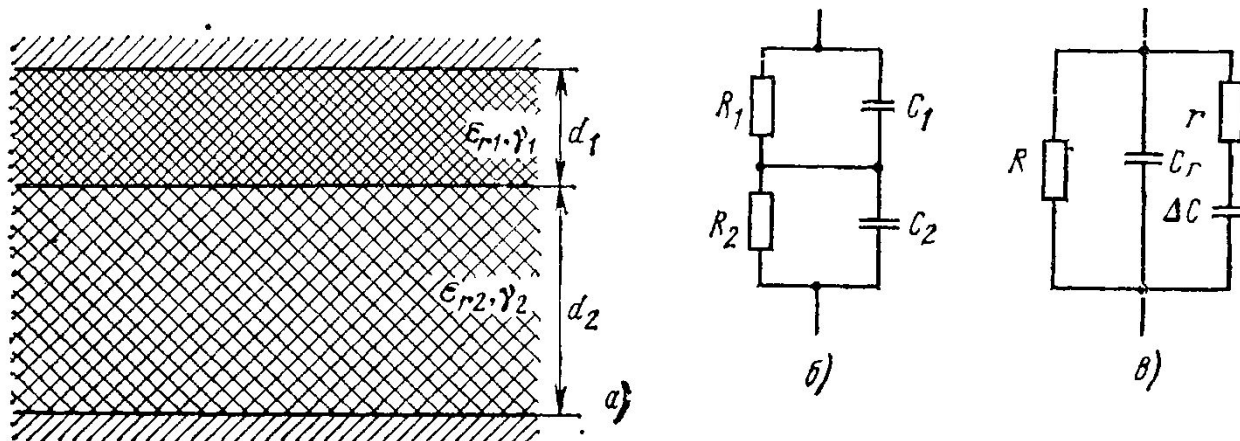
a — устройство изоляции (на участке АВ — покрытие); *б* — схема замещения; *в* — изменение напряженности E_x вдоль поверхности твердой изоляции

Методы профилактического контроля внутренней изоляции

К одной из групп профилактических методов контроля относятся так называемые неразрушающие испытания, при которых используются малые напряжения и различные косвенные способы оценки характеристик изоляции (измерения сопротивления, $\tan \delta$, емкости и др.). Другую группу составляют испытания с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте. Поэтому их часто называют разрушающими. Существенный недостаток таких испытаний состоит в том, что приложение повышенного напряжения не исключает появления дефекта, что может привести к пробое изоляции при рабочем напряжении во время эксплуатации.

Основной задачей профилактических испытаний является выявление развивающихся дефектов, с тем чтобы своевременно заменить электрооборудование с дефектной изоляцией. Периодичность и нормы испытаний устанавливаются соответствующими ГОСТ и ведомственными инструкциями для каждого вида электрооборудования.

Использование абсорбционных явлений для контроля ИЗОЛЯЦИИ



$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{\gamma_1} \frac{d_1}{S} ; & C_1 &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} S}{d_1} ; \\ R_2 &= \frac{1}{\gamma_2} \frac{d_2}{S} ; & C_2 &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} S}{d_2} , \end{aligned} \right\}$$

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2)(C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}$$

$$\Delta C = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)}$$

$$q_1 = U_1 C_1 = U_0 \frac{R_1 C_1}{R_1 + R_2} ; \quad q_2 = U_2 C_2 = U_0 \frac{R_2 C_2}{R_1 + R_2}$$

$$|q_{ac}| = |q_1 - q_2| = U_0 \frac{|R_1 C_1 - R_2 C_2|}{R_1 + R_2}$$

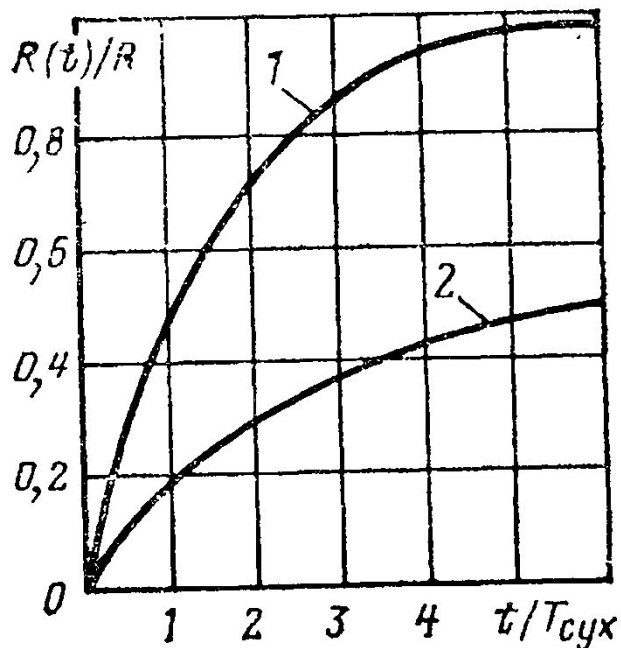
$$R_1 C_1 = R_2 C_2$$

$$\Delta C = 0$$

$$q = 0$$

$$i = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-t/T} \quad T = r \Delta C.$$

$$R(t) = \frac{U}{i(t)} = \frac{R}{1 + \frac{R}{r} e^{-t/T}}$$



$$K_{\text{абс}} = R_{60}/R_{15}$$

$$K_{\text{абс}} > 1,3$$

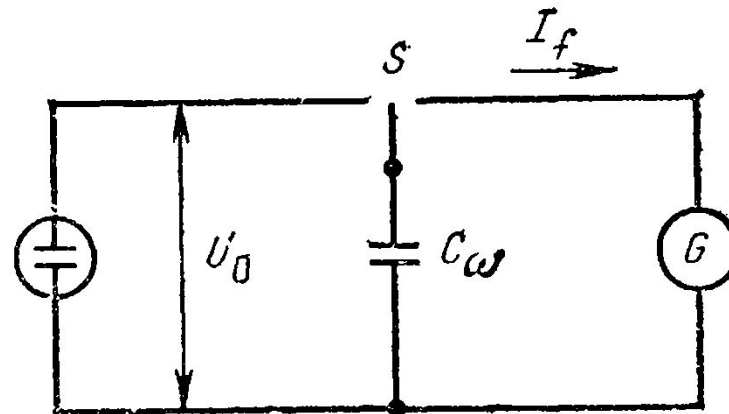
допустимое увлажнение

$$K_{\text{абс}} > 1,3$$

недопустимое увлажнение

$$K_{\text{абс}} < 1,3$$

При переменном напряжении контроль качества изоляции осуществляется с помощью измерений емкости.



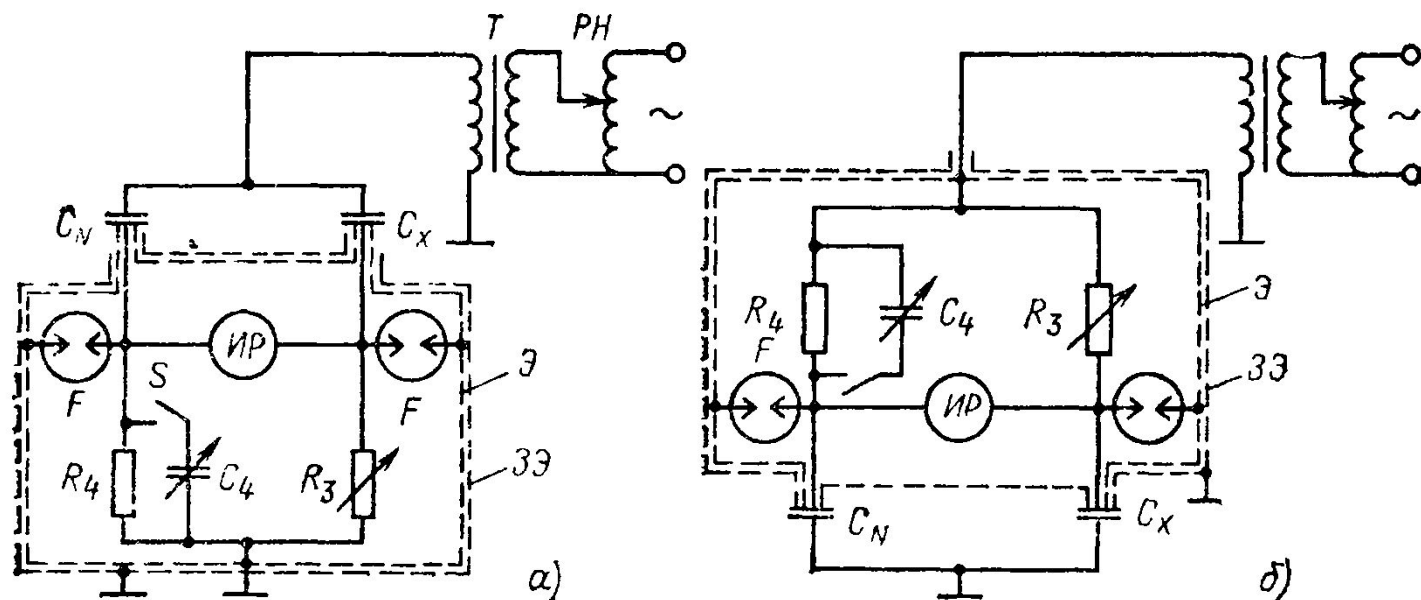
$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50 I_2}{2 I_{50}}$$

Недопустимое увлажнение

$$\frac{C_2}{C_{50}} > 1,3$$

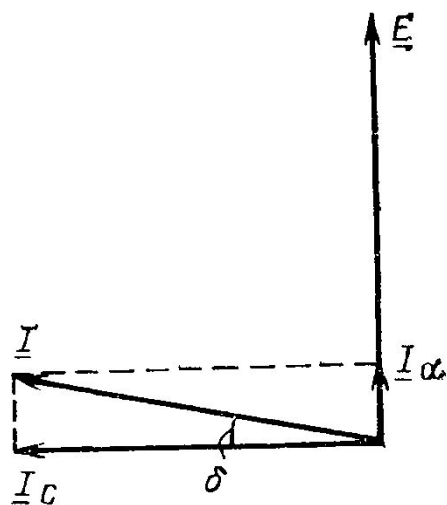
Контроль качества изоляции по тангенсу угла диэлектрических потерь

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$) является одним из основных и наиболее распространенных методов контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения, поскольку распределенные дефекты (увлажнение, ионизация газовых включений) в первую очередь вызывают увеличение диэлектрических потерь. Измеренное значение $\operatorname{tg}\delta$ дает представление о качестве изоляции, а характер изменения $\operatorname{tg}\delta$ при периодических измерениях позволяет судить об ухудшении свойств изоляции. В некоторых случаях, например для изоляции электрических машин, снимают зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от значения приложенного напряжения в интервале $0,5\text{—}1,5 U_{\text{ном}}$. Если при повышении напряжения $\operatorname{tg}\delta$ растет, то это свидетельствует о частичных разрядах в изоляции.

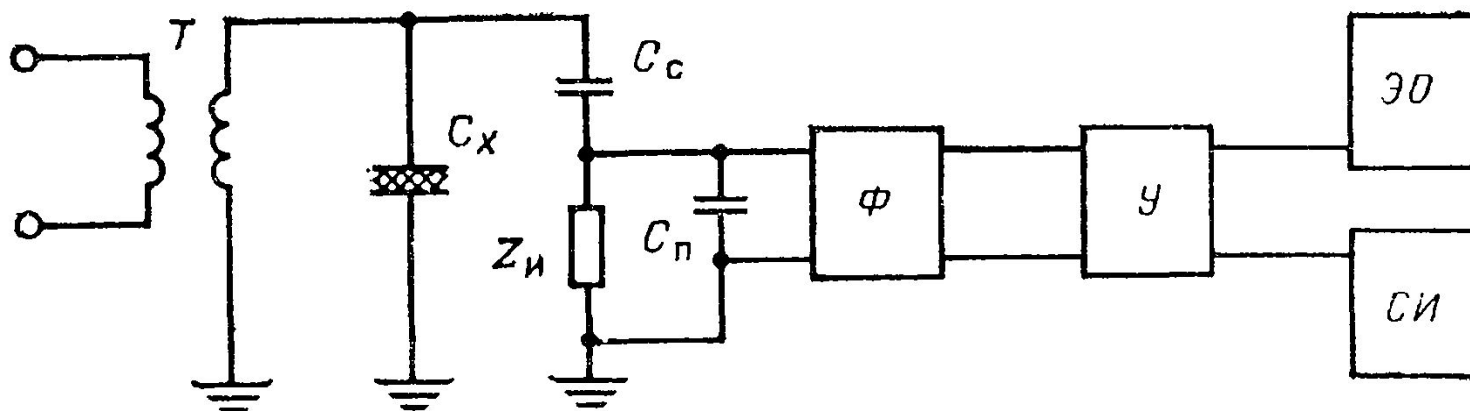


Измерение $\operatorname{tg} \delta$ производится переносными мостами. Используется нормальная (оба электрода испытываемого объекта изолированы) или «перевернутая» (один из электродов объекта заземлен) схема (рис. 19.4). Напряжение питания моста не превышает 10 кВ независимо от номинального напряжения испытываемого оборудования. В схеме моста содержатся эталонный конденсатор C_N , безындукционный переменный резистор R_3 , постоянный резистор R_4 и переменный конденсатор C_4 . Испытываемый объект обозначен как C_x . Равновесие моста устанавливается индикатором $ИР$ (вибрационный гальванометр).

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4.$$



Контроль изоляции по интенсивности частичных разрядов



Чтобы пояснить физический смысл используемых мер интенсивности ЧР, рассмотрим кратко основы электрического метода измерения характеристик ЧР. В этом методе используется одно из внешних проявлений ЧР — снижение при каждом ЧР напряжения на испытуемой изоляции скачком (точнее, за время 10^{-7} — 10^{-8} с) на величину Δu_x .

Импульс напряжения с элемента Z_n через фильтр Φ поступает на усилитель $У$, а затем на осциллограф $ЭО$ для измерения его амплитуды и на счетчик импульсов $СИ$ для измерения числа импульсов, т. е. числа ЧР, в единицу времени. В этой схеме фильтр Φ используется для того, чтобы на вход усилителя $У$ не попадали мешающие измерениям напряжения промышленной частоты и его гармоники, обусловленные падением напряжения на Z_n от протекающих через C_c емкостных токов.

В установках с широкополосными усилителями импульсы напряжения от ЧР получаются очень короткими, поэтому сигналы от следующих друг за другом разрядов не налагаются один на другой, их можно четко различить и подсчитать с помощью счетчика импульсов. Однако в этом случае из-за широкой полосы пропускания усилителя на регистрирующие приборы проходят значительные шумы, мешающие измерениям.

В установках с узкополосными усилителями уровень шумов при прочих равных условиях значительно ниже; чувствительность таких установок существенно выше. Однако сигналы от отдельных ЧР получаются достаточно длительными, налагаются друг на друга, поэтому точное измерение числа разрядов в единицу времени невозможно. Установки с узкополосными усилителями используют при высоком уровне внешних шумов и, как правило, только для обнаружения или измерения напряжения появления ЧР.

Контроль изоляции повышенным напряжением

Испытания изоляции повышенным напряжением позволяют выявить многие дефекты, особенно сосредоточенные, не обнаруживаемые иными методами. При этом дефектная изоляция пробивается. Вместе с тем приложение чрезмерно высокого напряжения или излишне большая его выдержка может вызвать появление повреждений даже в исправной изоляции. Поэтому, во-первых, профилактические и после-ремонтные испытания изоляции повышенным напряжением производятся после контроля ее состояния неразрушающими методами, рассмотренными выше, и, во-вторых, значение испытательного напряжения берется на 10—15 % ниже значения испытательного напряжения по ГОСТ 1516.1—76* для изоляции нового выпускаемого заводом электрооборудования.

Изоляция считается выдержавшей испытание, если не наблюдалось пробоя или частичных повреждений изоляции, обнаруживаемых по выделению газа, дыма, по звуку и другим признакам.

Испытания проводятся в течение времени, за которое в дефектной изоляции успевают развиваться частичные разряды или даже полный пробой. Практикой установлено, что для этого достаточно 1 мин, и это время указано в нормах на профилактические испытания.

В некоторых случаях для испытаний применяется напряжение повышенной частоты (обычно 100 или 250 Гц). С увеличением частоты испытательного напряжения количество частичных разрядов в секунду увеличивается (см. § 18.3), возрастают также диэлектрические потери в изоляции. Это приводит к более быстрому развитию электрического или теплового пробоя. Поэтому при частоте f , превышающей 100 Гц, время t , с, на которое прикладывается испытательное напряжение, должно быть уменьшено в соответствии с формулой

$$t = 60 \frac{100}{f}$$

Существенным недостатком испытаний переменным напряжением является необходимость применения мощной испытательной аппаратуры, если емкость объекта велика.

Испытания повышенным постоянным напряжением применяются в основном для испытания объектов большой емкости (кабелей, конденсаторов). Проходящий при этом через изоляцию ток мал и практически равен току утечки. Поэтому потери мощности в изоляции малы и развитие теплового пробоя затруднено. Кроме того, при постоянном напряжении мала интенсивность частичных разрядов. По этим причинам для пробоя дефектной изоляции требуется более высокое постоянное напряжение, чем амплитуда переменного напряжения.

Значение испытательного выпрямленного напряжения для электрических машин составляет $(2,2 \div 2,5) U_{\text{ном}}$. Изоляция кабелей номинальным напряжением до 10 кВ испытывается постоянным напряжением $(5 \div 6) U_{\text{ном}}$, а кабелей 10—35 кВ — напряжением $(4 \div 5) U_{\text{ном}}$. Длительность испытаний составляет 10—15 мин.

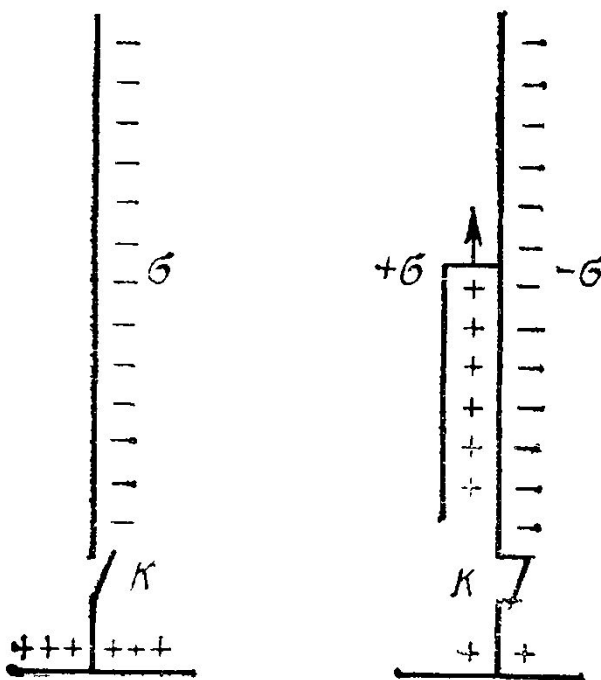
Грозовые перенапряжения

Молния представляет собой электрический разряд между облаком и землей или между облаками. Молнии предшествует процесс разделения и накопления электрических зарядов в грозовых облаках, происходящий в результате возникновения в облаках мощных восходящих воздушных потоков и интенсивной конденсации в них водяных паров.

В средних широтах землю поражают 30—40 % общего числа молний, остальные 60—70 % составляют разряды между облаками или между разноименно заряженными частями облаков.

Стадии грозового разряда

- 1. Лидерная – слабо светящийся канал со скоростью 150000 м/с
- 2. Главный разряд – происходит нейтрализация зарядов, скорость от 0,05 до 0,5 скорости света, сильное свечение, большие токи, температура канала до 30000 градусов



При нагревании канал разряда быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ударной волны, имеющей на своем фронте высокое давление и воспринимаемой как гром. Во время главного разряда происходит нейтрализация зарядов лидера. Нарастание тока главного разряда (фронт импульса тока) соответствует нейтрализации зарядов в лидерном канале, а спад тока — нейтрализации зарядов в зоне ионизации лидера.

В завершающей (финальной) стадии молнии по каналу в течение десятков миллисекунд проходит ток порядка десятков и сотен ампер. В это время нейтрализуются заряды облака. Часто на ток финальной стадии накладываются импульсы тока повторных разрядов, во время которых разряжаются на землю скопления зарядов, расположенные в разных местах по высоте грозового облака. Лидер повторных разрядов — так называемый стреловидный лидер — движется со скоростью, превосходящей скорость лидера первого разряда и имеющей порядок 10^6 м/с, поскольку он развивается по уже образованному каналу. Скорости нарастания тока главного разряда в повторных разрядах выше, чем в первом, а амплитуды ниже. Яркие вспышки канала при повторных разрядах воспринимаются как мерцание молнии.

Параметры грозовых импульсов

Молния – источник тока

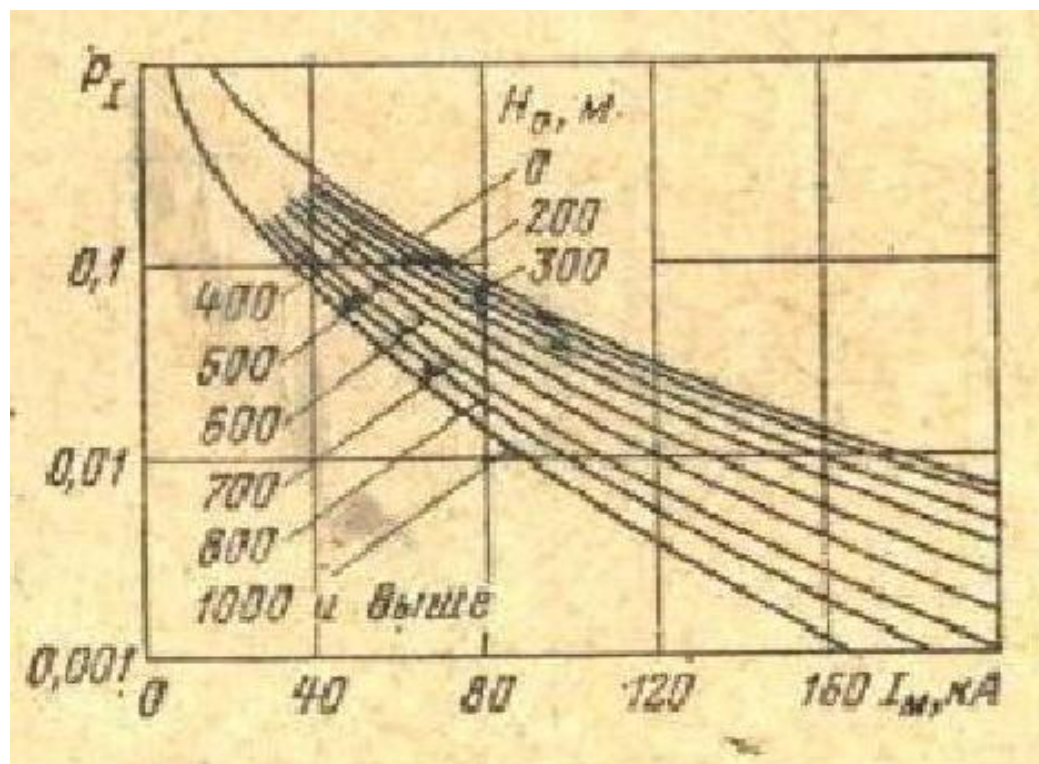
$$I_M = \sigma v$$

$$I_M = \sigma v \frac{Z}{Z + R}$$

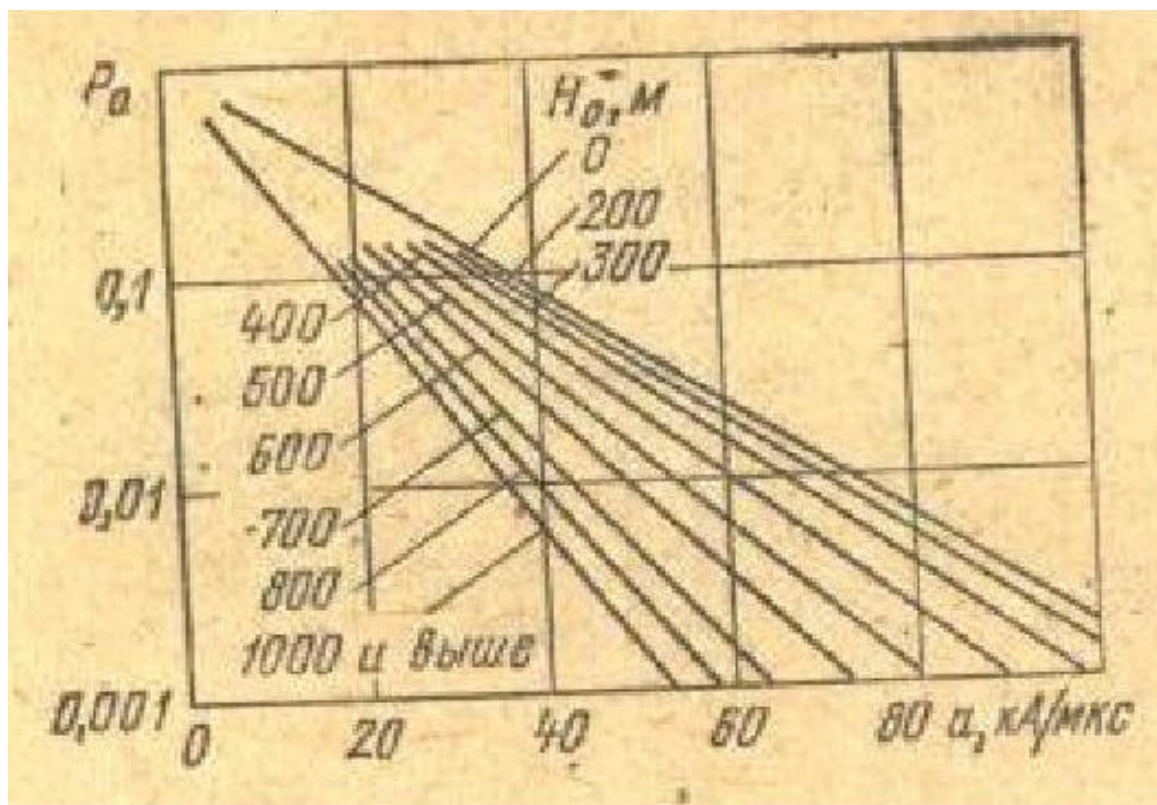
Крутизна фронта тока молнии

$$a = \frac{di_M}{dt}$$

Кривые вероятностей амплитуд токов молнии



Кривые вероятностей крутизн фронтов токов молнии



Характеристики грозовой деятельности

1. Среднее число часов грозовой деятельности
2. Среднее число ударов молнии в 1 кв. км за 100 грозовых часов

$$\hat{n}_{\text{уд}} = 6,7 \text{ 1/км}^2$$

$$n_{\text{уд}} = 6,7 (A + 7H) (B + 7H) \cdot 10^{-6}$$

$$n_{\text{уд}} = 6,7 \cdot 100 \cdot 6h_{\text{ср}} \cdot 10^{-3} \approx 4h_{\text{ср}},$$

$$n_{\text{год}} = n_{\text{уд}} \frac{l}{100} \frac{D_{\text{г}}}{100}$$

Район	Среднее число грозовых часов в году
Мурманск, Нарьян-Мар, Сахалин, Камчатка	Менее 10
Архангельск, Салехард, Игарка, Якутск, Влади-	10—20
восток, Ашхабад, Самарканд	
Рига, Ленинград, Киров, Красноярск, Иркутск,	20—40
Хабаровск, Актюбинск, Талды-Курган	
Минск, Москва, Горький, Куйбышев, Свердловск,	40—60
Новосибирск, Чита, Благовещенск, Ростов-на-Дону,	
Душанбе, Алма-Ата	
Брест, Киев, Харьков, Воронеж, Кишинев, Крас-	60—80
нодар, Орджоникидзе, Кокчетав, Горно-Алтайск	
Мукачево, Винница, Белгород, Донецк, Вороши-	80—100
ловград, Батуми, Тбилиси	
Красная Поляна, Сочи, Ленинакан, Алаверди,	Более 100
Ахалцихе	

Шаровая молния



Шаровая молния — явление уникальное и своеобразное. За историю человечества скопилось более 10 тысяч свидетельств о встречах с «разумными шарами». Однако до сих пор ученые не могут похвалиться большими достижениями в сфере исследования этих объектов. Существует масса разрозненных теорий о происхождении и «жизни» шаровых молний. Время от времени в лабораторных условиях получается создать объекты, по виду и свойствам похожие на шаровые молнии — плазмойды. Тем не менее, стройной картины и логичного объяснения этому явлению никто предоставить так и не смог.

Наиболее известной и разработанной раньше остальных является теория академика П. Л. Капицы, которая объясняет появление шаровой молнии и ее некоторые особенности возникновением коротковолновых электромагнитных колебаний в пространстве между грозовыми тучами и земной поверхностью. Однако Капице так и не удалось объяснить природу тех самых коротковолновых колебаний. К тому же, как было замечено выше, что шаровые молнии не обязательно сопровождают обычные молнии и могут появляться в ясную погоду. Тем не менее, большинство других теорий основаны на выводах академика Капицы.

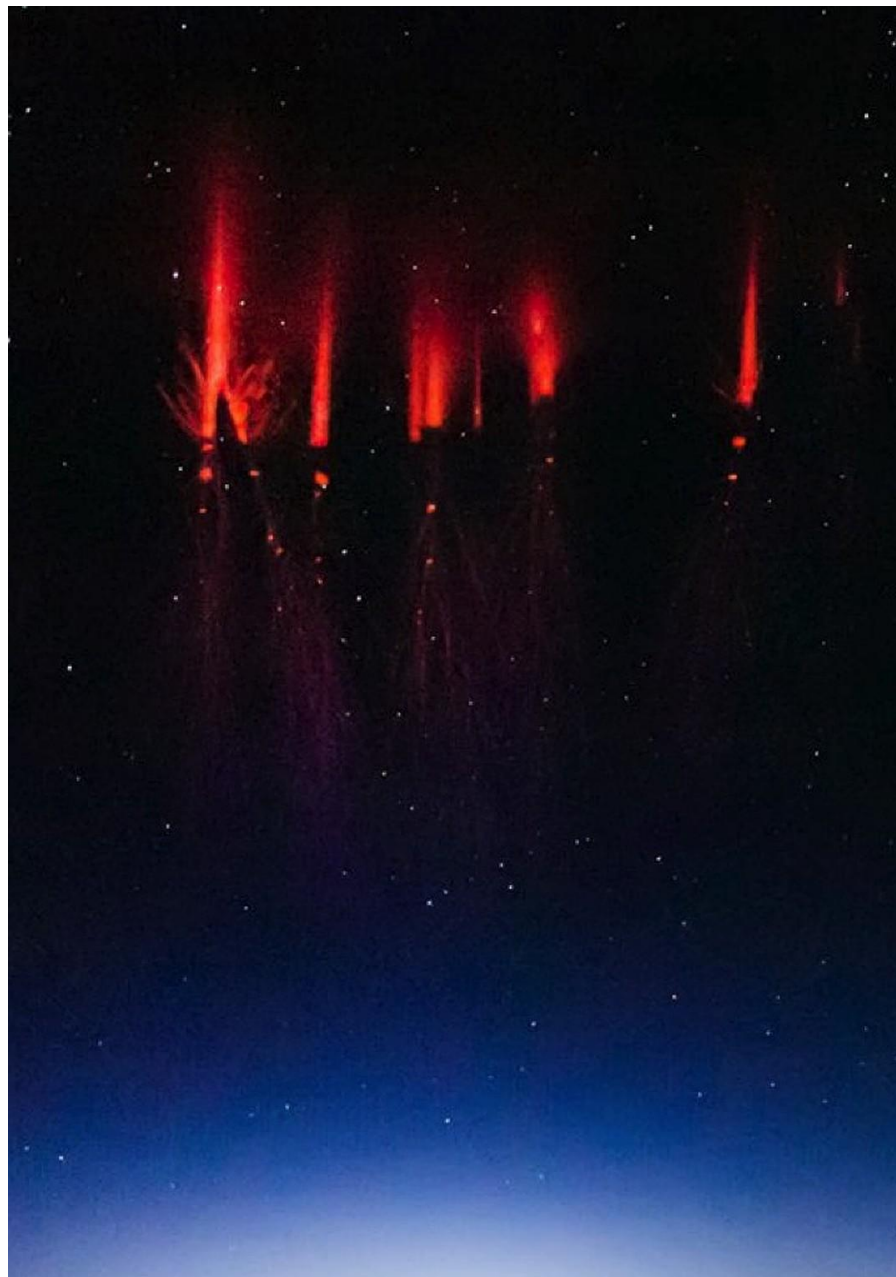
Отличные от теории Капицы гипотеза была создана Б. М. Смирновым, утверждающим, что ядро шаровой молнии — это ячеистая структура, обладающая прочным каркасом при малом весе, причем каркас создан из плазменных нитей.

Д. Тернер объясняет природу шаровых молний термохимическими эффектами, протекающими в насыщенном водяном паре при наличии достаточно сильного электрического поля.

Однако самой интересной считается теория новозеландских химиков Д. Абрахамсона и Д. Динниса. Они выяснили, что при ударе молнии в почву, содержащую силикаты и органический углерод, образуется клубок волокон кремния и карбида кремния. Эти волокна постепенно окисляются и начинают светиться. Так рождается «огненный» шар, разогретый до 1200—1400 °С, который медленно тает. Но если температура молнии зашкаливает, то она взрывается. Тем не менее, и эта стройная теория не подтверждает все случаи возникновения молний.

Для официальной науки шаровая молния по-прежнему продолжает оставаться загадкой. Может поэтому вокруг нее появляется столько околонаучных теорий и еще большее количество вымыслов.

Спрайты



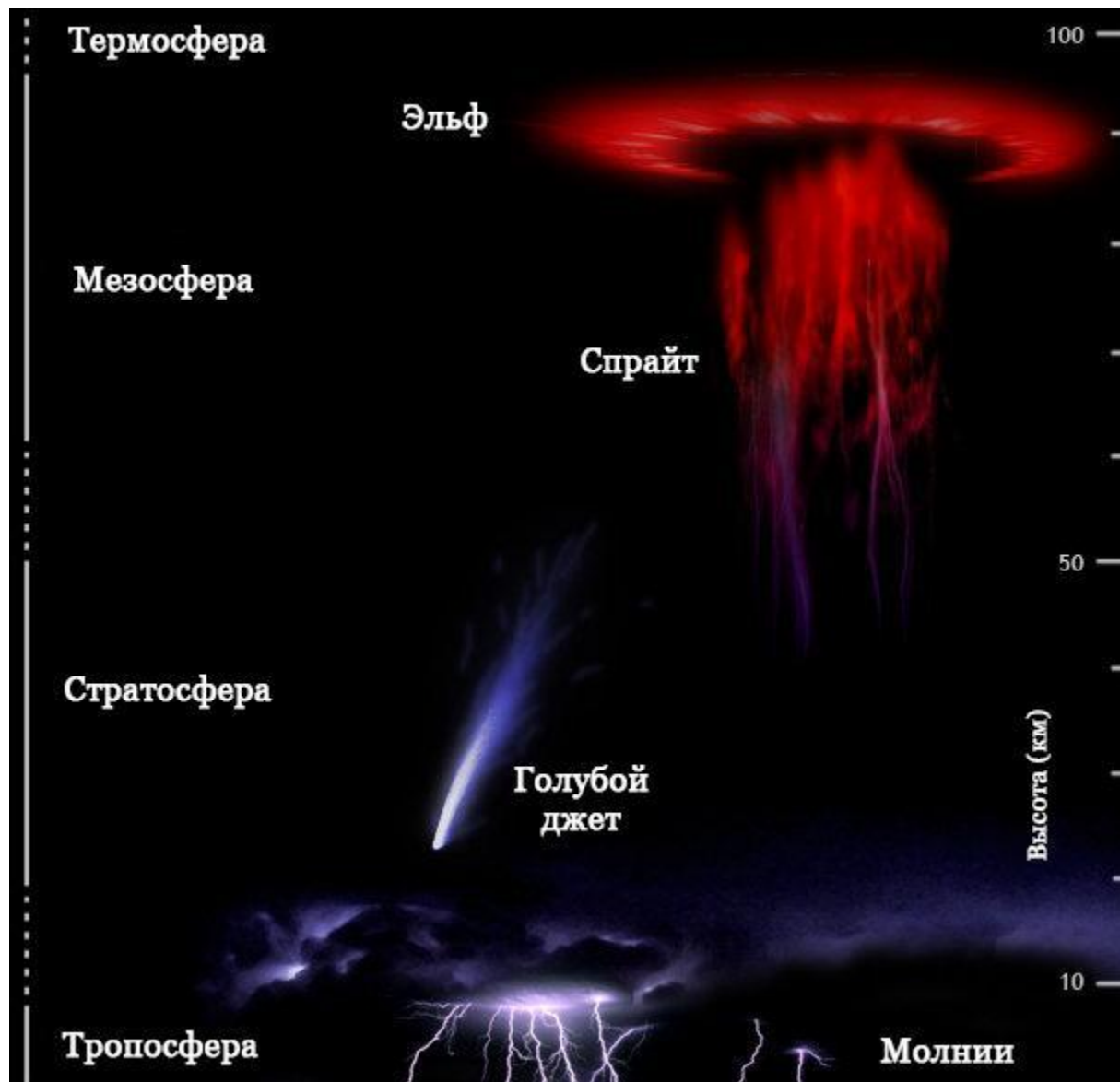




ILAN Science Team ©

12/09/06 00:40:34 0741.9

2006/09/12 02:40:00-078(LT) 0122 00001 V340071225



Защита от прямых ударов молнии (ПУМ)

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю. Молниеотвод состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего на себя удар молнии, токоотвода и заземлителя.

Защитное действие молниеотводов основано на том, что во время лидерной стадии на вершине молниеотвода скапливаются заряды и наибольшие напряженности электрического поля создаются на пути между развивающимся лидером и вершиной молниеотводов. Возникновение и развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженности поля на этом пути, что окончательно предопределяет удар в молниеотвод. Защищаемый объект, более низкий, чем молниеотвод, будучи расположен поблизости от него, оказывается заэкранированным молниеотводом и встречным лидером и поэтому практически не может быть поражен молнией.

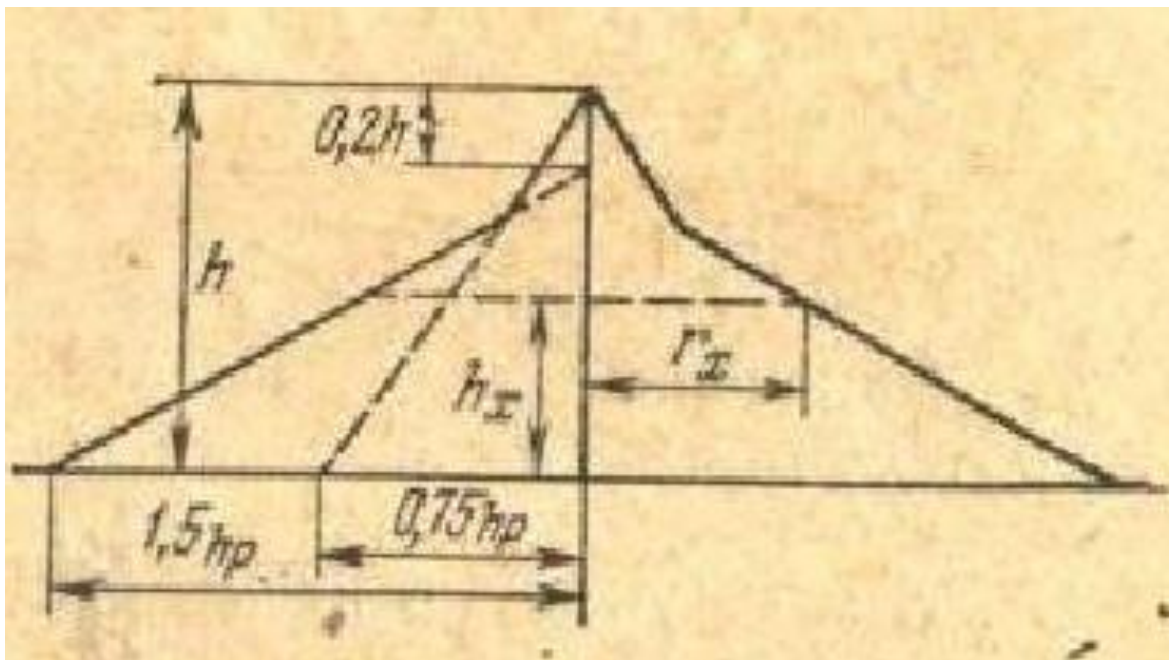
Защитное действие молниеотвода характеризуется его зоной защиты, т. е. пространством вблизи молниеотвода, вероятность попадания молнии в которое не превышает определенного достаточно малого значения.

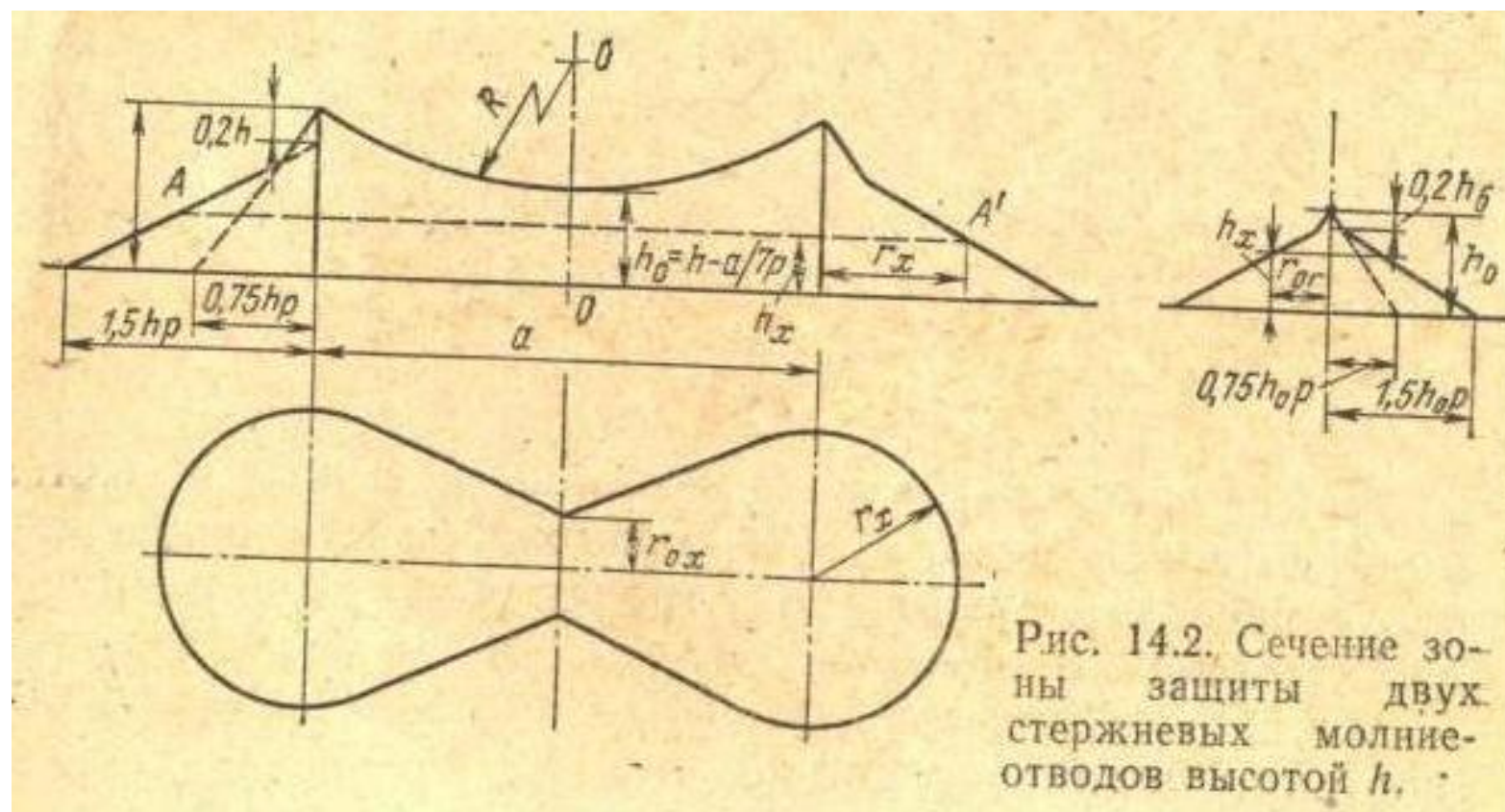
Типы молниеотводов

Стержневые

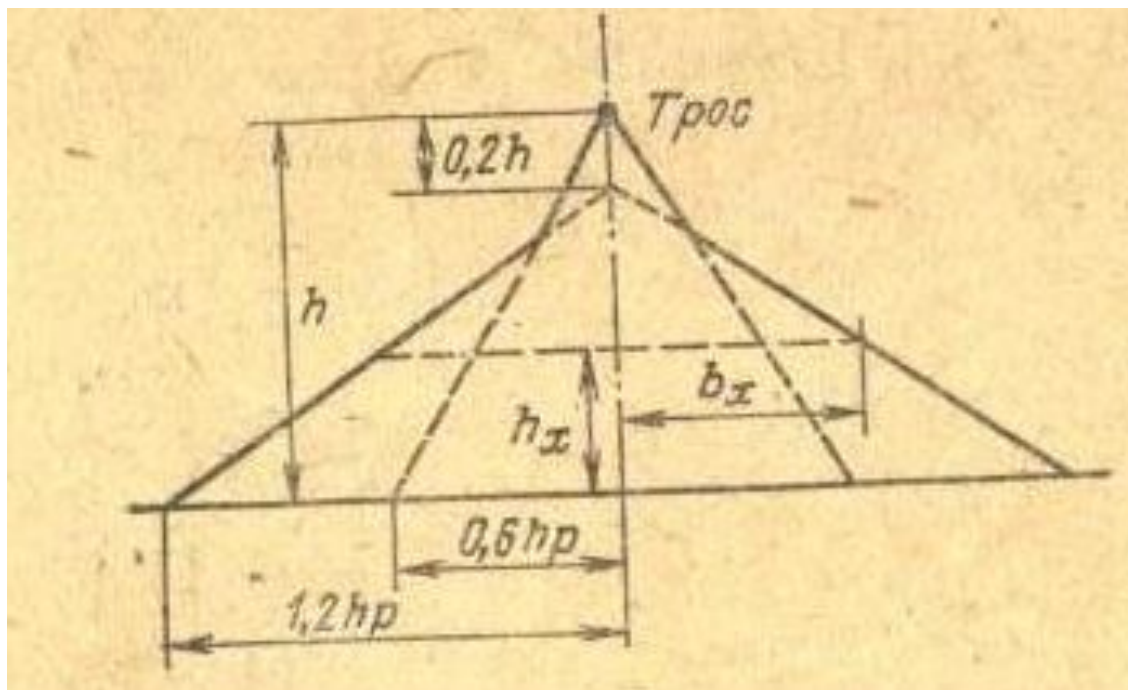
Тросовые

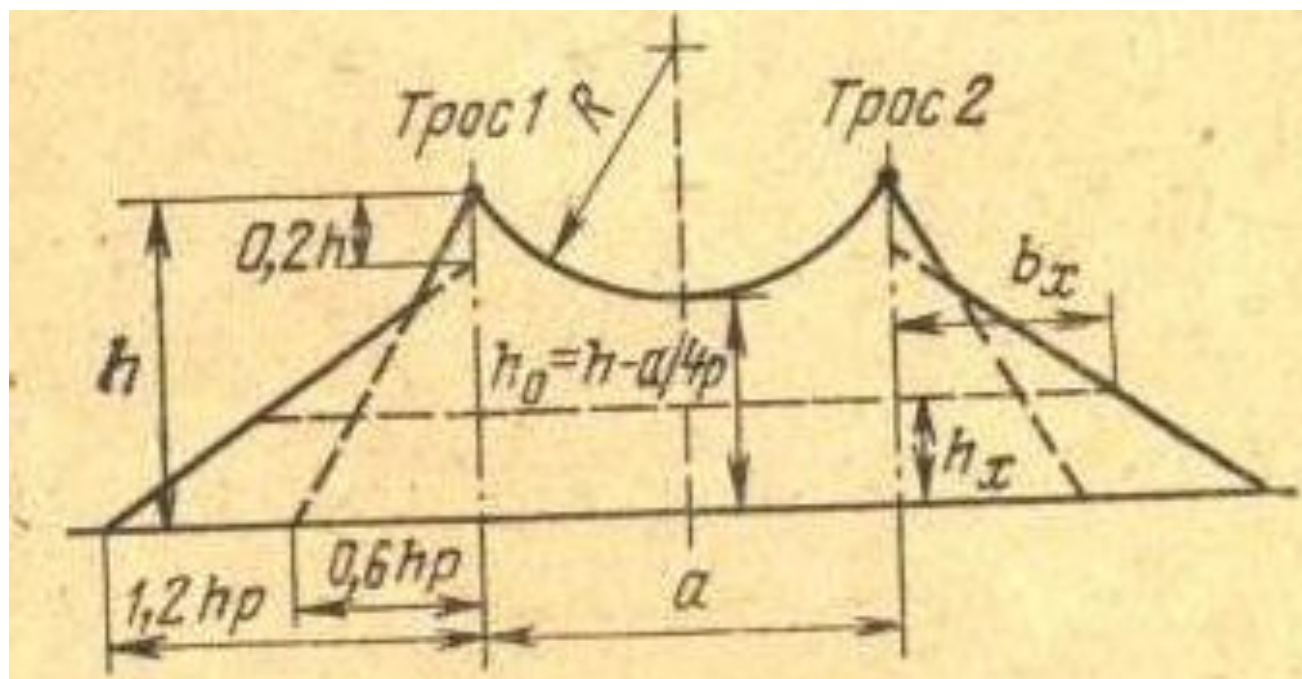
Зоны защиты стержневых молниеотводов





Зоны защиты тросовых молниеотводов





Заземление молниеотводов

Для устройства заземлений применяются вертикальные и горизонтальные электроды (заземлители). Для горизонтальных заземлителей используется полосовая сталь шириной 20—40 мм и толщиной не менее 4 мм, а также сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм. В качестве вертикальных заземлителей применяются стальные трубы, стержни и профильная сталь. На подстанциях заземлитель представляет собой сложную систему, состоящую обычно из горизонтальных полос, объединяющих вертикальные электроды и образующих сетку на площади, занимаемой подстанцией. На линиях электропередачи в качестве заземлителя опор могут использоваться их железобетонные фундаменты.

Заземлитель характеризуется значением сопротивления, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта ρ , в котором он находится.

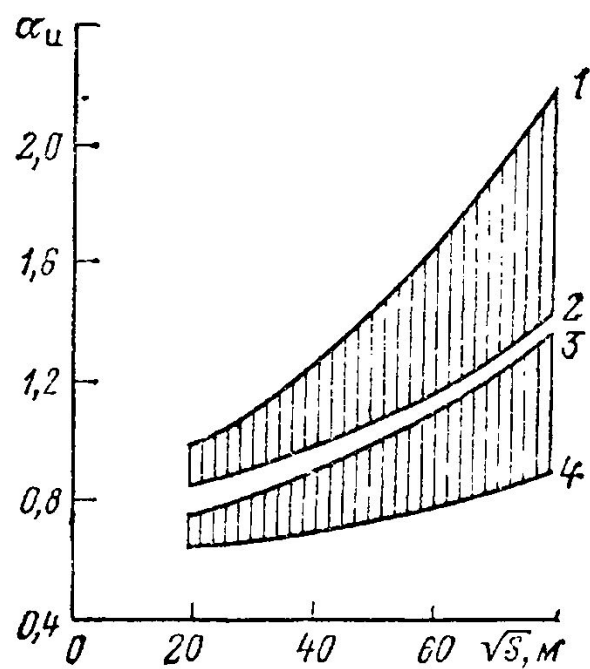
$$R = \rho \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + nl} \right)$$

$l/\sqrt{S}$	0	0,05	0,1	0,2	0,5
A	0,44	0,40	0,37	0,33	0,26

$$\rho = K \rho_{\text{изм}};$$

где K — сезонный коэффициент; $\rho_{\text{изм}}$ — измеренное значение удельного сопротивления грунта. Если измерение проводилось при средней влажности грунта, то $K=1,4$. При повышенной влажности земли перед измерением берется $K=2,6$.

$$\alpha_{\text{H}} = R_{\text{H}}/R$$



Условия безопасного прохождения тока молнии по молниеотводу

$$U_l = I_M R_{\text{и}} + a L_0 l$$

где L_0 — индуктивность единицы длины токоотвода. Для металлических молниеотводов решетчатой конструкции, а также для отдельно проложенных токоотводящих спусков $L_0 \approx 1,7$ мкГн/м.

Учитывая достаточно малое число ударов молнии в такие объекты, как, например, подстанции (20.6), в данном случае в качестве расчетных значений принимают $I_M = 60$ кА и $a = 30$ кА/мкс.

Расстояние по воздуху $l_{\text{в}}$ при расчетных параметрах тока молнии и допустимой напряженности электрического поля в воздухе $E_{\text{в}}=500$ кВ/м определяется по формуле

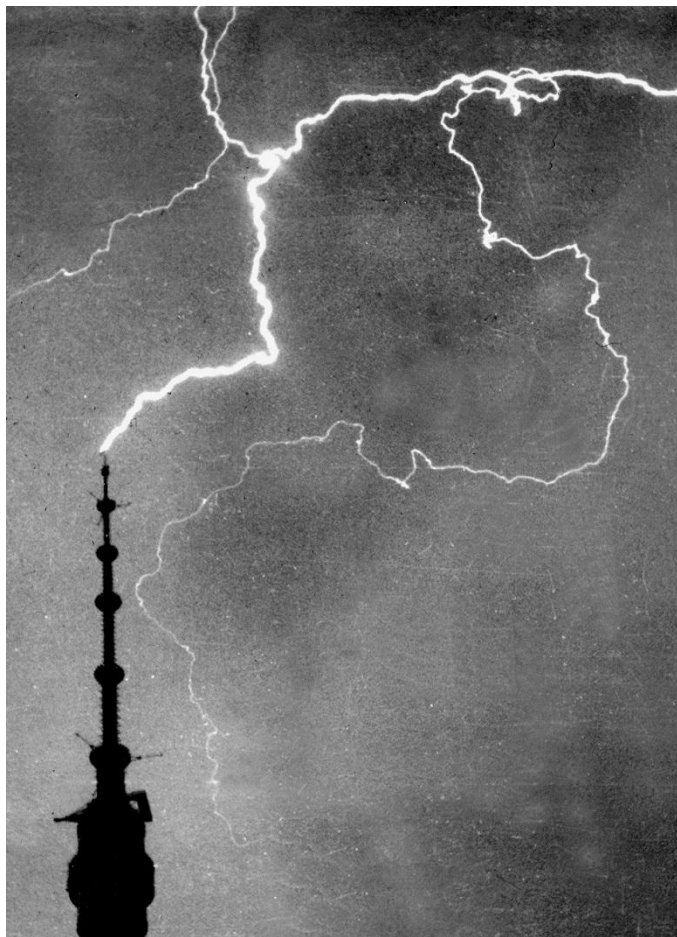
$$l_{\text{в}} \geq \frac{60R_{\text{и}} + 30 \cdot 1,7l}{500} \approx 0,12R_{\text{и}} + 0,1l$$

Расстояние в земле $l_{\text{з}}$ между заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и ближайшей к нему точкой защищаемого устройства в земле при допустимой напряженности поля в земле $E_{\text{з}}=300$ кВ/м рассчитывается как

$$l_{\text{з}} = \frac{60R_{\text{и}}}{300} = 0,2R_{\text{и}}$$

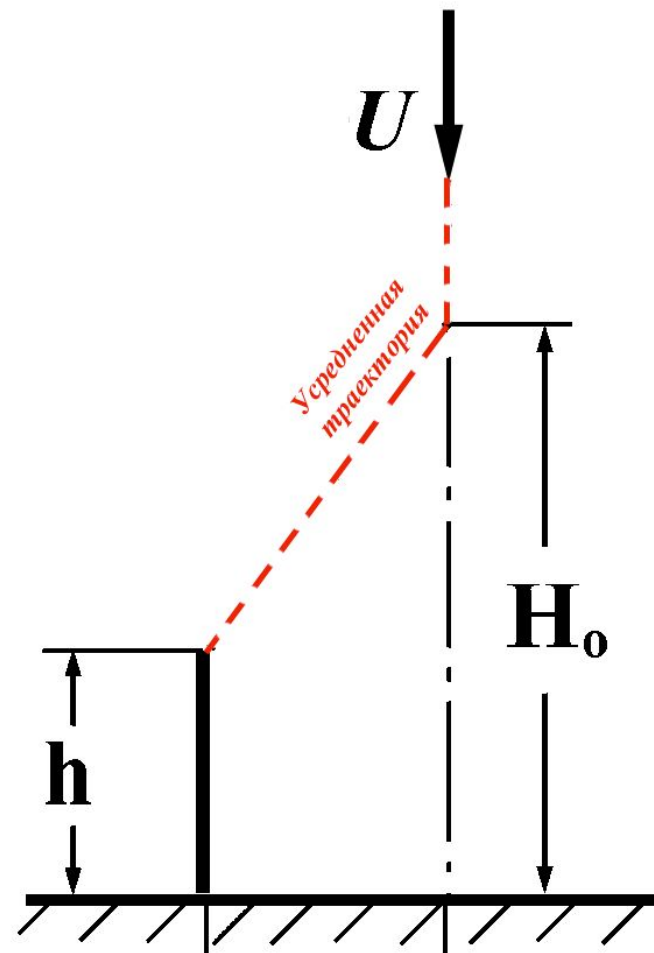
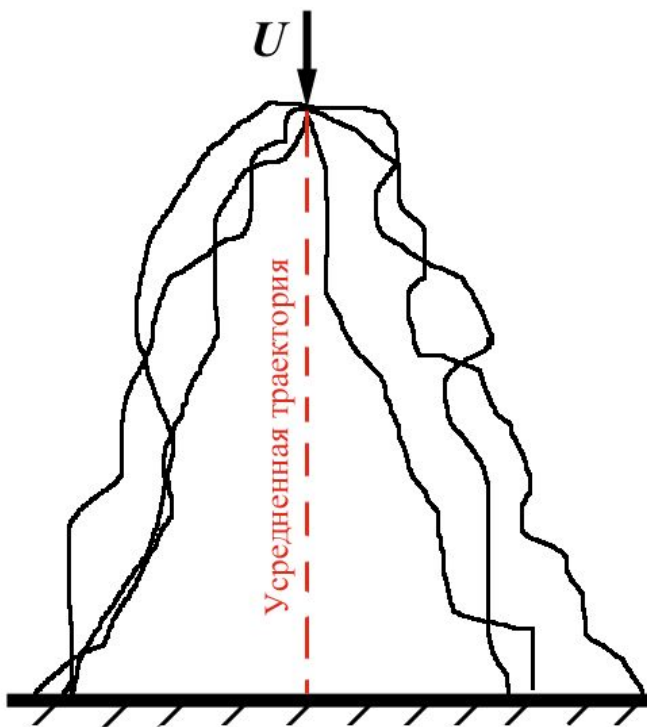
При этом $l_{\text{в}}$ должно быть не менее 5 м, а $l_{\text{з}}$ — не менее 3 м.

Активные молниеотводы

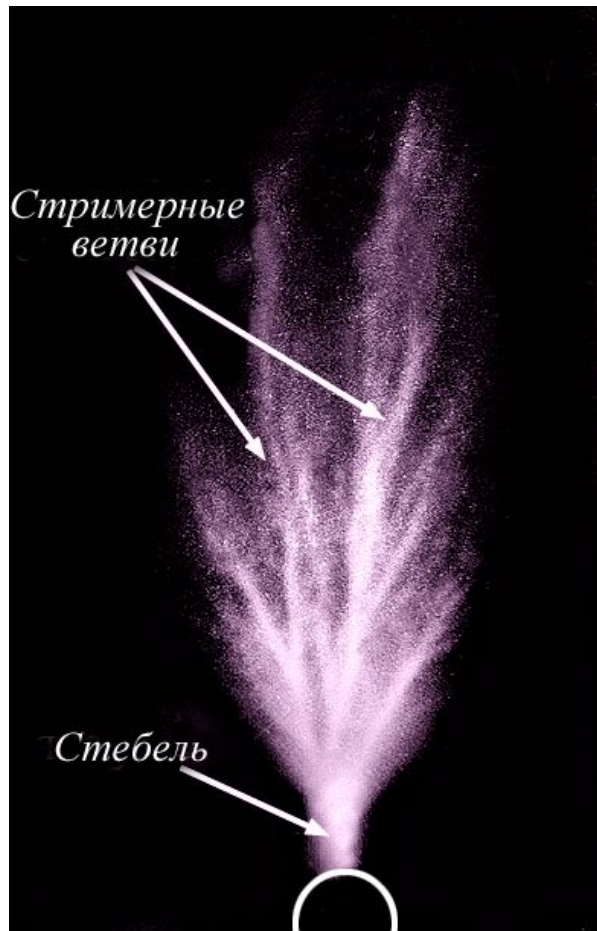


- Лидер нисходящей молнии, рожденной в грозовом облаке на высоте в несколько километров над поверхностью земли, в начале пути движется по непрогнозируемой траектории, претерпевая многочисленные отклонения от вектора напряженности внешнего электрического поля атмосферы. Это происходит потому, что поле в окрестности лидерной головки, где ионизируется воздух и рождается новый участок плазменного канала, по крайней мере на 2 порядка больше внешнего. Оно создается собственным зарядом лидера, который размещен на поверхности канала и в чехле, сформированном стримерной зоной перед головкой. Неоднократно наблюдались участки, где лидер продвигался поперек внешнего поля и даже в обратном направлении

Активные молниеотводы



Активные молниеотводы



Не вызывает сомнения, что любая форма электрического разряда в газе изменяет свои характеристики в зависимости от напряжения на промежутке, структуры электрического поля, температуры и состава газовой среды, а потому все они доступны для управляющих воздействий. В этом отношении встречный лидер исключением не является. Вопрос здесь не в принципе, а в материальных затратах на создание систем активного управления. Система обязательно должна быть надежной, дешевой и эффективной – только тогда она будет реально внедрена в молниезащиту. Дешевизна же непосредственно связана с требуемым уровнем управляющих воздействий, которые должны быть возможно более слабыми. Это значит, что точкой приложения сил должен стать только что зарождающийся встречный лидер, пока он не сформировал собственное сильное электрическое поле, с которым трудно конкурировать.

ESE – молниеотводы

Под таким названием выпускаются современные активные молниеотводы. Аббревиатура образована английскими словами “ранняя стримерная эмиссия”. Предполагается, что конструкция молниеотвода обеспечивает исключительно раннее развитие встречного разряда, от чего, якобы, вырастает длинный встречный лидер, перехватывающий молнию на в 5 - 6 раз более далеком расстоянии. Молниеотвод отличается обоюдоострой конической вершиной, на которую подается импульс высокого напряжения от встроенного источника. Источник – “known-how” фирмы. Вероятно, его накопитель энергии заряжается от тока короны в электрическом поле грозового облака. Изолирующая прокладка между вершиной молниеотвода и его основанием толщиной в несколько миллиметров позволяет оценить предельную величину напряжения, которое может быть подана на вершину. Ни при каких обстоятельствах оно не выше 20 – 30 кВ.



<http://mgc.prom.ua>

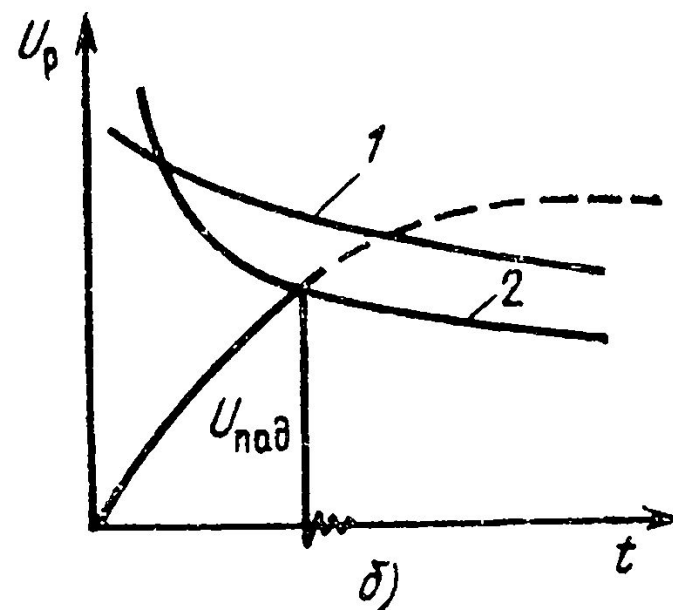
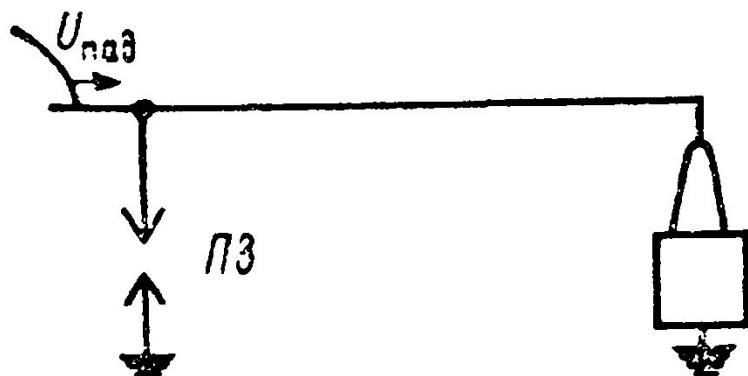
Для успешной работы молниеотвода важна не стримерная вспышка, а активно растущий встречный лидер. К сожалению, в диапазоне малых (< 1 см) радиусов вершины влияние этого параметра на возникновение активно растущего встречного лидера пренебрежимо слабое.

Научная сессия IEEE в 2003 г в Торонто подвела итог дискуссии по активным молниеотводам. Аргументов в их пользу специалисты не увидели.

Защитные аппараты и устройства

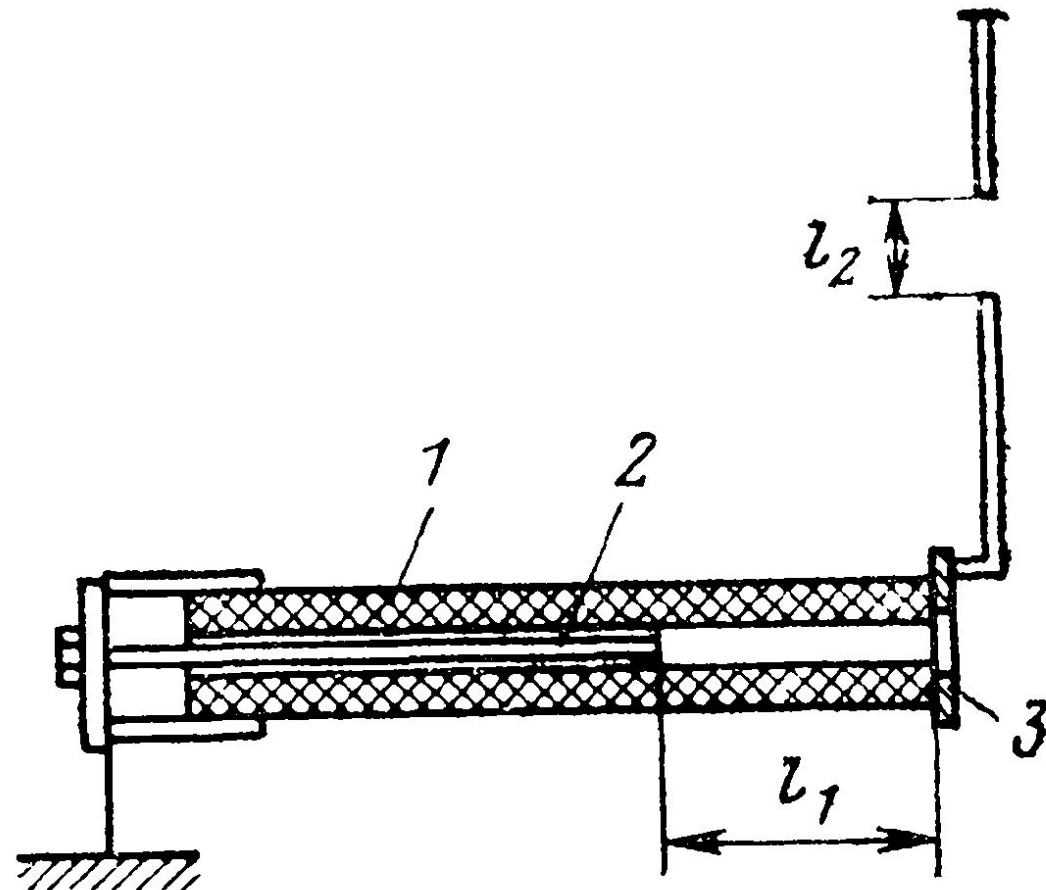
- 1 Защитные искровые промежутки
- 2 Трубчатые разрядники
- 3 Вентильные разрядники
- 4 Ограничители перенапряжений нелинейные - ОПН

Защитные промежутки

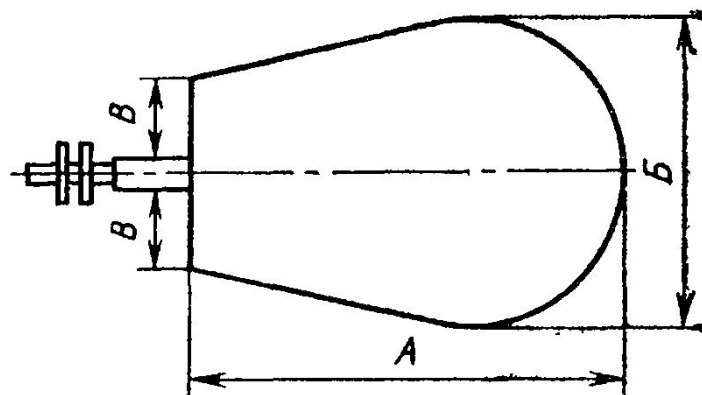


Параметры	Номинальное напряжение, кВ									
	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500
Длина защитного промежутка, мм	20	40	60	140	250	650	930	1350	1500	1500
Длина дополнительного промежутка, мм	5	10	15	20	30	—	—	—	—	—
Разрядное напряжение при 50 Гц, действующее значение, кВ	20	34	45	70	105	252	348	495	560	750
Импульсное разрядное напряжение, кВ:										
положительной полярности	33	51	66	121	195	466	618	735	945	1065
отрицательной полярности	34	53	68	134	220	510	698	817	1070	1190

Трубчатые разрядники



Тип разрядника	Внешний искровой промежу- ток, мм	Разрядные напряже- ния при импульсах 1,2/50 мкс, кВ		Разрядные напря- жения при 50 Гц (действующие зна- чения), кВ	
		50 %-ные	при 2 мкс	в сухом состоянии	под дож- дем
РТФ 3/0,2-1,5 РТФ 3/1,5-7	5—10	35/40	40/45	10	7
РТВ 6-10/0,5-4 РТВ 6-10/2-12	10 15	60/60 65/65	65/65 68/68	33 42	32 40



Номинальное напряжение разрядника, кВ	Размеры, м, не более		
	A	B	B
3—10	1,5	1,0	0,2
35	2,5	1,5	0,5
110	3,0	2,0	1,2
220	3,5	2,5	2,0

Вентильные разрядники

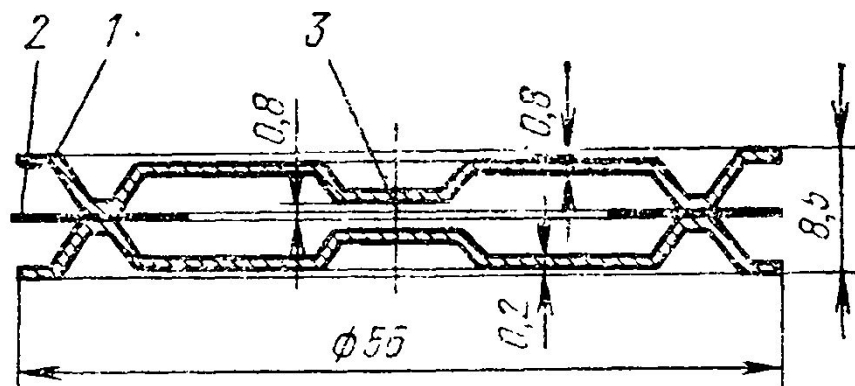
 elec.ru



Устройство и принцип действия РВ

Вентильный разрядник состоит из многократного искрового промежутка и нелинейного резистора, заключенных в герметичный корпус с помощью специальной арматуры.

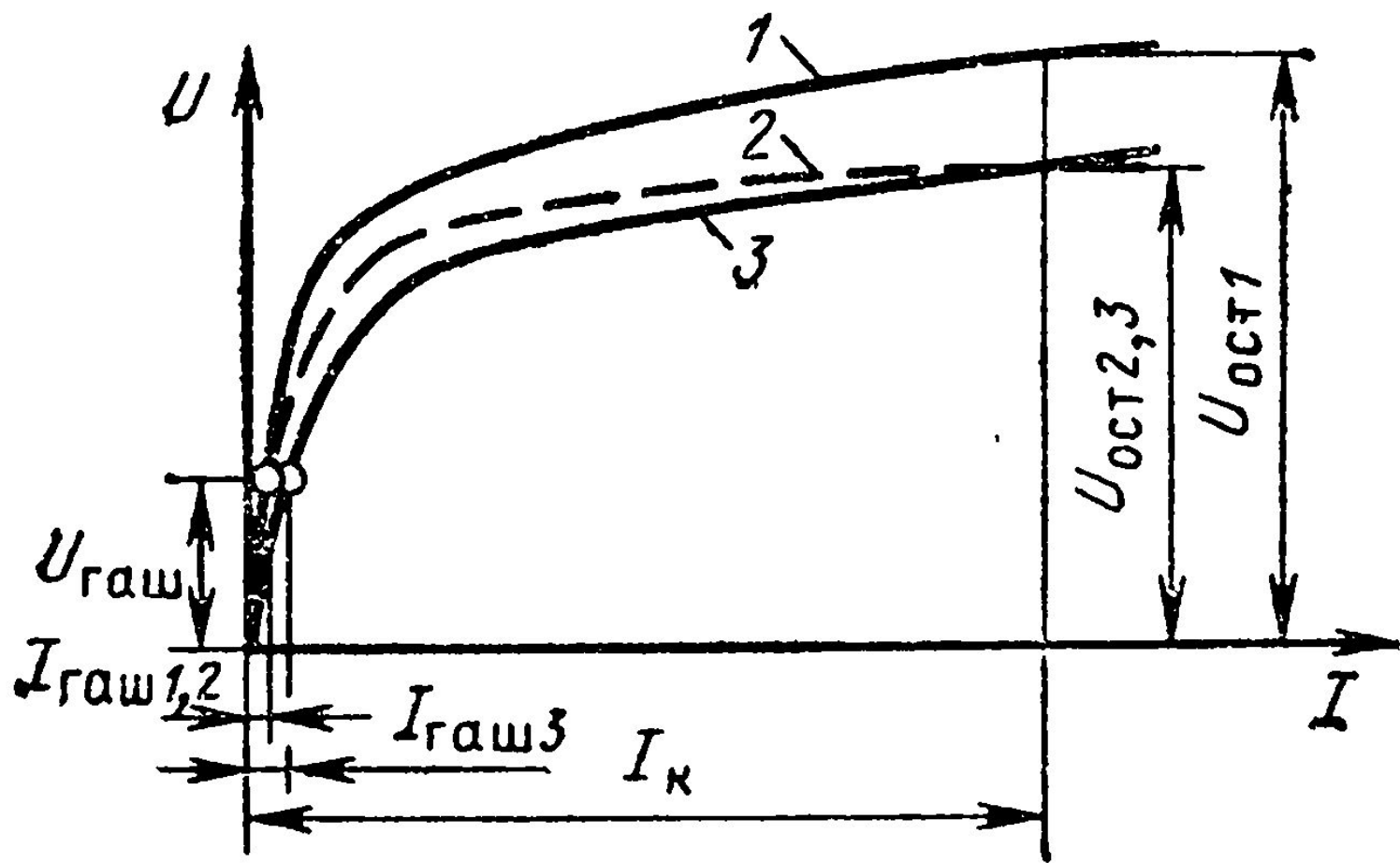
Искровые промежутки предназначены для подключения при перенапряжениях и отключения при сопровождающем токе нелинейных резисторов



Основу нелинейного резистора разрядника составляет порошок электротехнического карборунда SiC. На поверхности карборунда имеется запорный слой толщиной порядка 100 мкм из окиси кремния SiO₂, сопротивление которого нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых напряженностях поля (при небольших напряжениях на резисторе) удельное сопротивление слоя составляет 10⁴—10⁶ Ом·м, и практически все напряжение ложится на него, так как удельное сопротивление самого карборунда значительно меньше — около 10⁻² Ом·м. При повышении напряженности поля сопротивление запорного слоя резко падает и значение сопротивления нелинейного резистора начинает определяться собственно карборундом. Свойство материала резко менять свое сопротивление в зависимости от напряжения, обеспечивая пропускание очень больших токов при высоких напряжениях и весьма

малых при пониженных, называют «вентильным». Отсюда и название аппарата: вентильный разрядник.

Нелинейные резисторы РВ выполняются в виде дисков, состоящих из карборундового порошка и связующего материала. В зависимости от технологии изготовления получают диски из вилита или тервита. В качестве связки используется жидкое стекло. Вилитовые диски спекаются при сравнительно низкой температуре (около 300°C). Тервитовые диски при изготовлении обжигаются при температуре выше 1000°C , и часть запорных слоев из окиси кремния разрушается. При этом возрастает пропускная способность (до 1500 А вместо 300 А для вилита), однако уменьшается степень нелинейности материала.



1 и 2 — разные нелинейности резистора
 1 и 3 — разные токи гашения

Одной из основных характеристик РВ является остающееся напряжение $U_{ост}$, представляющее собой падение напряжения на сопротивлении резистора при определенном импульсном токе (5—14 кА в зависимости от типа РВ), который называется током координации.

Остающееся напряжение и близкое к нему по значению импульсное пробивное напряжение искрового промежутка РВ $U_{пр}$ должны быть на 20—25 % ниже разрядного или пробивного напряжения защищаемой изоляции (координационный интервал).

Вслед за импульсным током через РВ проходит сопровождающий ток промышленной частоты. Сопротивление нелинейного резистора при рабочем напряжении резко возрастает, сопровождающий ток существенно ограничивается, и при переходе его через нулевое значение дуга в искровом промежутке гаснет.

Наибольшее напряжение промышленной частоты на РВ, при котором надежно обрывается сопровождающий ток, называется напряжением гашения $U_{гаш}$, а соответствующий сопровождающий ток — током гашения $I_{гаш}$.

Гашение сопровождающего тока может осуществляться в условиях однофазного замыкания на землю, поэтому в качестве напряжения гашения принимается напряжение на здоровых фазах при однофазном замыкании на землю:

$$U_{\text{гаш}} = K_3 U_{\text{ном}},$$

где K_3 — коэффициент, зависящий от способа заземления нейтрали; $U_{\text{ном}}$ — номинальное линейное напряжение.

Коэффициент K_3 для установок с заземленной нейтралью равен 0,8, а для установок с изолированной нейтралью

Дугогасящее действие искрового промежутка РВ характеризуется коэффициентом гашения

$$K_{\text{гаш}} = U_{\text{пр}} / U_{\text{гаш}},$$

где $U_{\text{пр}}$ — пробивное напряжение искровых промежутков при частоте 50 Гц, а защитное действие нелинейного резистора — коэффициентом защиты (защитным отношением)

$$K_{\text{защ}} = U_{\text{ост}} / (\sqrt{2} U_{\text{гаш}})$$

Очевидно, что увеличение нелинейности сопротивления резистора приводит к уменьшению остающегося напряжения и снижению $K_{\text{защ}}$ (рис. 22.5). С другой стороны, чем больший ток $I_{\text{гаш}}$ допустим для разрядника, тем меньше $U_{\text{ост}}$ при неизменной вольт-амперной характеристике сопротивления. Таким образом, значение $K_{\text{защ}}$ определяется не только свойствами нелинейного резистора, но и конструкцией искрового промежутка, от которой зависит ток гашения.

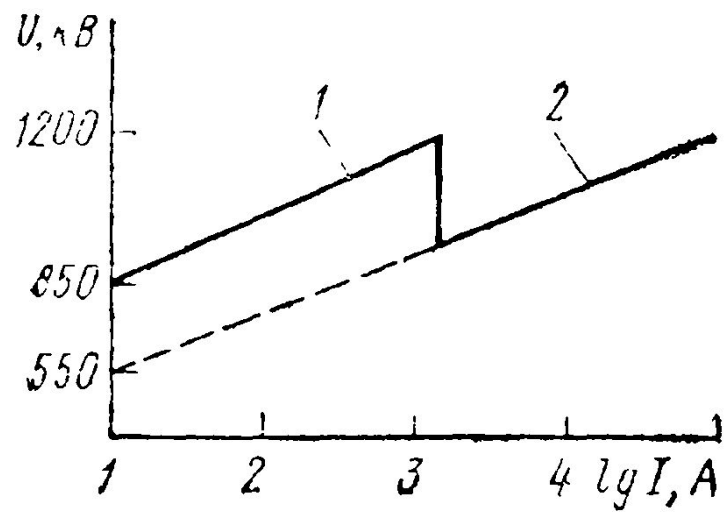
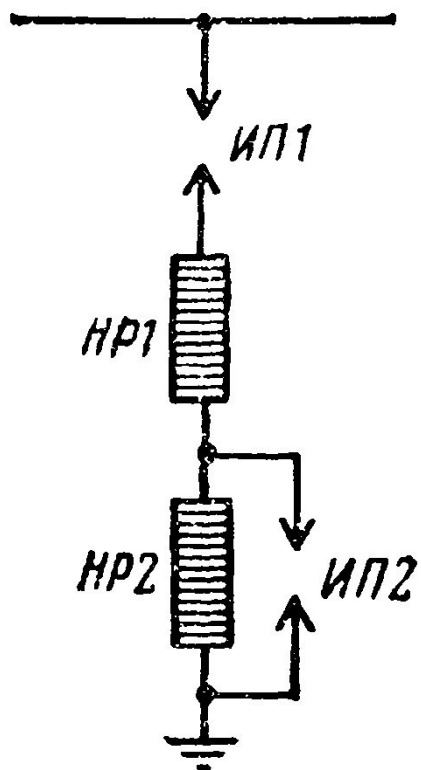
Для надежной защиты подстанционной изоляции вольт-секундная характеристика многократного искрового промежутка РВ должна быть пологой. При импульсах распределение напряжения по единичным промежуткам определяется в основном их собственными емкостями и емкостями по отношению к земле. Схема замещения многократного искрового промежутка представляет собой емкостную цепочку, подобную схеме замещения гирлянды изоляторов. Импульсное напряжение по такой цепочке распределяется очень неравномерно, что обеспечивает быстрый каскадный пробой всех единичных промежутков. Таким образом, сочетание неравномерного распределения напряжения по промежуткам с предварительной ионизацией (активизацией) единичных промежутков с однородным полем обеспечивает низкие коэффициенты импульса и пологий характер вольт-секундной характеристики вентильного разрядника.

Номинальное напряжение разрядника, кВ	Группа разрядника по ГОСТ	Тип разрядника	Напряжение, кВ					
			наибольшее допустимое	пробивное	импульсное пробивное при временах 1,5—20 мкс	остающееся при импульсном токе с длительностью фронта 8 мкс и амплитудой, кА		
						3	5	10
						Действующее значение		Максимальное значение, не более
3	I II IV	РВТ, РВРД РВМ РВП, РВО	3,8	7,5—9 7,5—9 9—11	7 8 20	7 9 13	8 9,5 14	9 11 —
6	I II IV	РВТ, РВРД РВМ РВП, РВО	7,6	15—18 15—18 16—19	14 15,5 32	14 17 25	16 18 27	18 20 —
10	I II IV	РВТ РВМ РВП, РВО	12,7	25—30 25—30 26—30,5	23,5 25,5 48	23,5 28 43	26,5 30 45	30,5 33 —
15	I II III	РВМ РВС	19	31—36 35—43 38—48	50 57 67	38 47 57	41 51 61	46 57 67
20	I II III	РВМ РВС	25	42—48 47—56 49—60,5	66 74 80	50 62 75	54 67 80	60 74 88
35	I II III	РВМ РВС	40,5	73—84 75—90 78—98	108 116 125	80 97 122	87 105 130	98 116 143
110	I II III	РВТ РВМГ РВС	100	150—170 170—195 200—250	230 260 285	195 245 315	215 265 335	240 295 367

Прохождение больших импульсных токов вызывает остаточные явления в материале нелинейного резистора, по-

этому РВ имеет определенную пропускную способность, характеризующуюся гарантированным числом импульсов тока с заданными параметрами, которое может выдержать резистор. Энергия импульса тока зависит от его амплитуды и длительности. Для грозовых напряжений характерны очень большие токи малой длительности. При внутренних перенапряжениях, наоборот, наблюдаются большие длительности (2 мс и более) и относительно небольшие амплитуды тока. Поэтому пропускную способность разрядников принято характеризовать максимальным значением импульса тока 20/40 мкс и током прямоугольной формы длительностью 2 мс (в некоторых случаях максимальным значением импульса тока 3/8 мс). Эти воздействия разрядники должны выдерживать не менее 20 раз.

Комбинированные разрядники



Тип разрядника	Напряжение, кВ					
	номинальное разрядника	наибольшее допустимое при работе от грозовых перенапряжений	гашения при работе от коммутационных перенапряжений	пробивное	импульсное пробивное при временах 2—20 мкс, не более	переключения в режиме грозовых перенапряжений
	Действующее значение				Максимальное значение	
РВМК-330П	330	290	380	435—500	700	720—820
РВМК-500П	500	420	575	660—760	1070	1130—1260
РВМК-750М	750	600	710	780—950	1500	1420—1550

ОПН

Использование окиси цинка, обладающей более нелинейной ВАХ, позволило создать более совершенные аппараты для ограничения перенапряжений - ОПН

Высоконелинейная вольтамперная характеристика резисторов позволяет длительно находиться под действием рабочего напряжения, обеспечивая при этом глубокий уровень защиты от перенапряжений. Резисторы опрессовываются в оболочку из полимерных материалов, которая обеспечивает заданную механическую прочность и изоляционные характеристики. Полимерный корпус обеспечивает надежную защиту от всех внешних воздействий на протяжении всего срока службы.

В нормальном рабочем режиме ток через ограничитель носит емкостной характер и составляет десятые доли миллиампера. При возникновении волн перенапряжений резисторы ограничителя переходят в проводящее состояние и ограничивают дальнейшее нарастание напряжения на выводах. Когда перенапряжения снижаются, ограничитель возвращается в непроводящее состояние.

Нелинейные ограничители перенапряжений (в дальнейшем сокращенно ОПН) в отличие от вентильных разрядников не имеют искровых промежутков и непосредственно подключаются к защищаемому объекту. Это достигается благодаря применению в них оксидно-цинковых варисторов, обладающих высоконелинейной вольтамперной характеристикой (коэффициент нелинейности α в зависимости

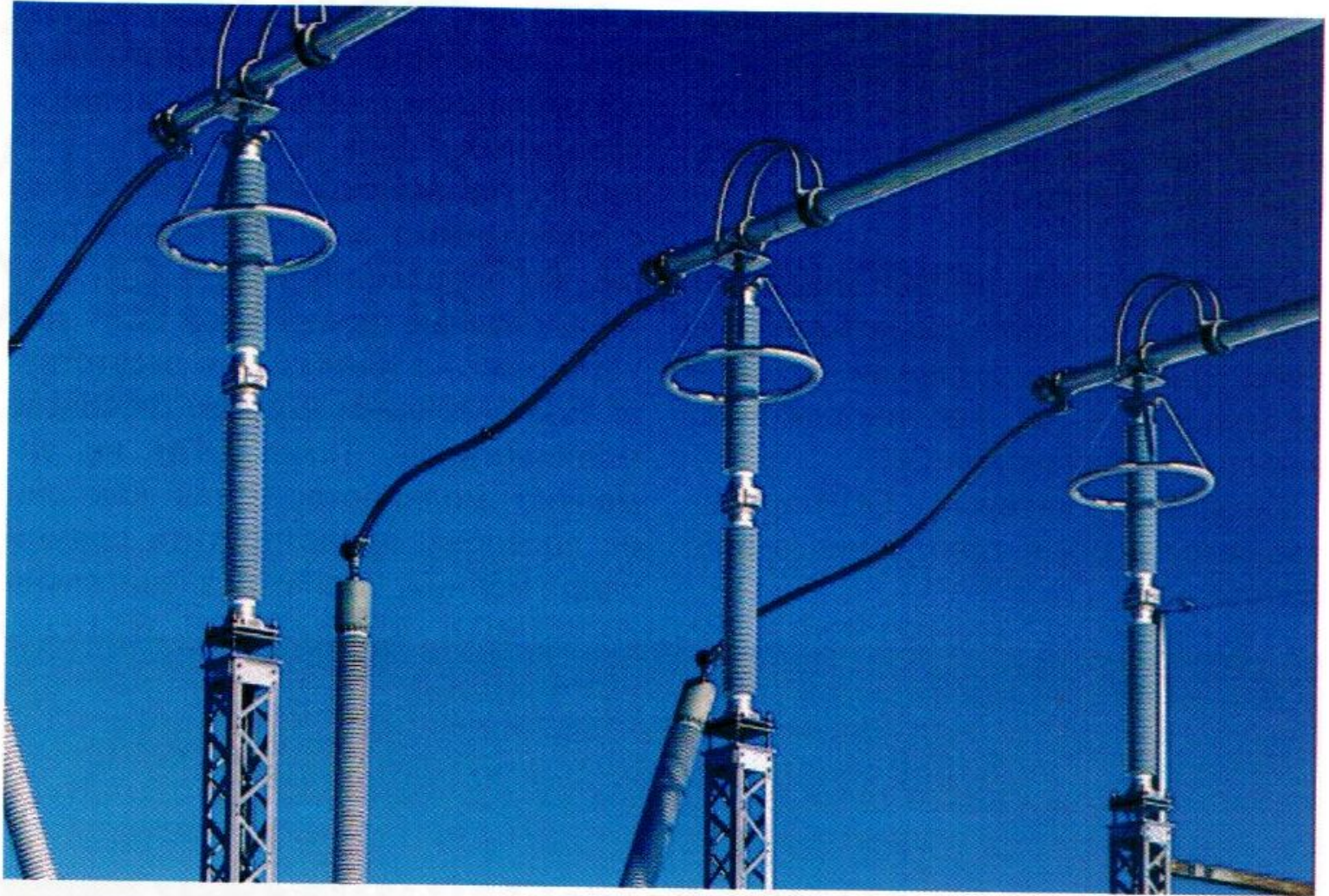
$$U = AI^\alpha$$

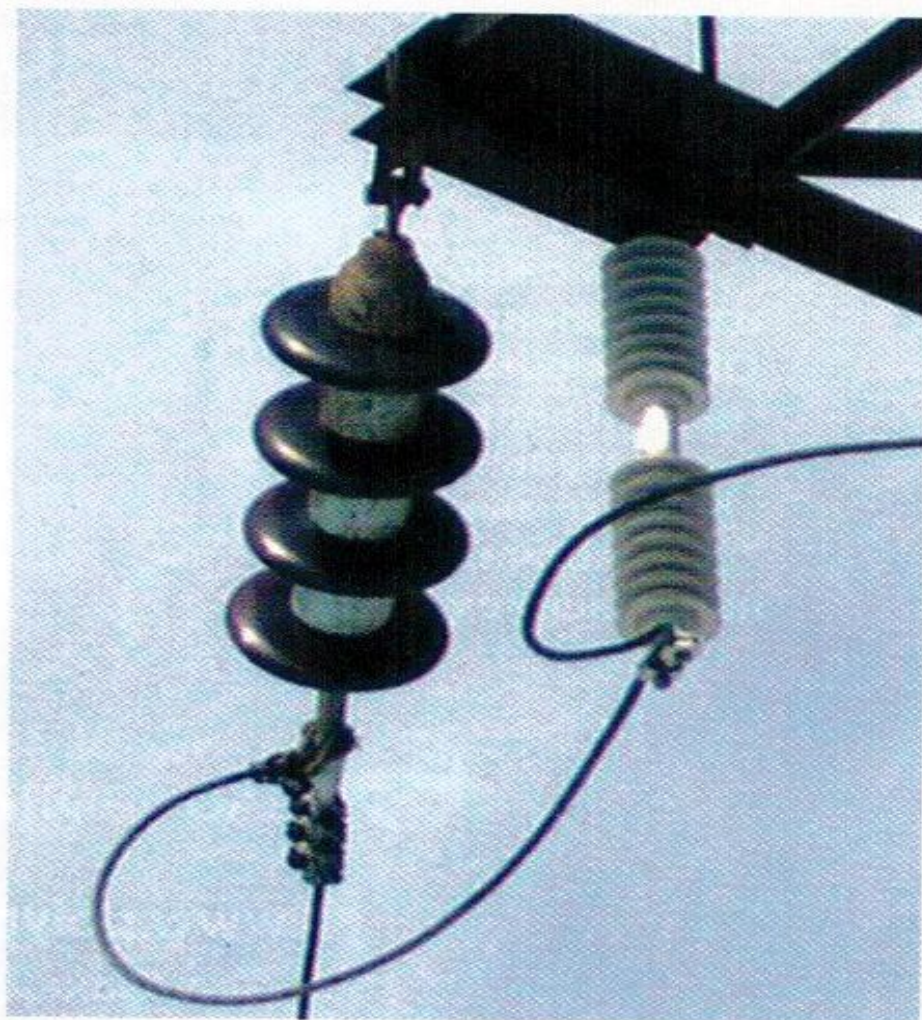
приблизительно равен 0,03-0,04) и достаточно высокой пропускной способностью. По упомянутой причине в ряде стран ОПН называются вентильными разрядниками без искровых промежутков.

В нормальном режиме через ограничитель перенапряжений, находящийся под рабочим напряжением, течет ток от долей миллиампера до нескольких миллиампер в зависимости от номинального напряжения защищаемого объекта, характеристик варисторов и конструкции аппарата. При этом его внутреннее сопротивление находится в пределах от десятков до сотен мегаом. Однако при появлении перенапряжений в течение наносекунд внутреннее сопротивление аппарата снижается на несколько порядков, а ток через ОПН возрастает в 10^6 - 10^7 раз. В итоге аппарат рассеивает электромагнитную энергию переходного процесса в окружающую среду, и ограничители глубоко ограничивают перенапряжения, независимо от природы их возникновения.

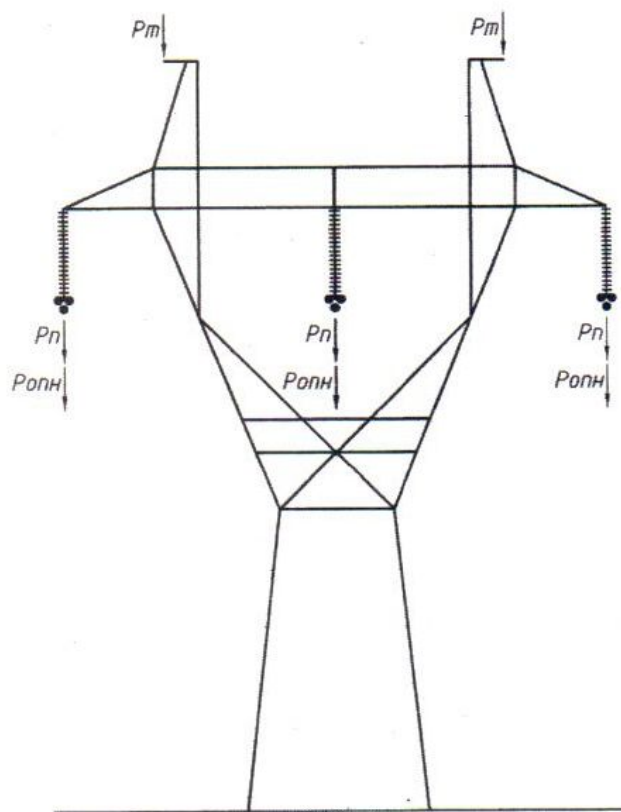


№ п/п	Наименование параметра	Обозначение			
		ОПН- РВ-6	РВО-6	ОПН- РВ-10	РВО-10
1	Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ	7,6	7,5	12,6	12,7
2	Номинальный разрядный ток, кА	5	5	5	5
3	Пропускная способность, А, не менее	150	75	150	75
4	Ток взрывобезопасности, кА	10	нет	10	нет
5	Импульсное пробивное напряжение, кВ	нет	32	нет	48
6	Остающееся напряжение, кВ, при импульсе 5000 А, 8/20 мкс, не более	25,8	27	43	45
7	Максимальная амплитуда импульса тока 4/10 мкс, кА	65	нет	65	нет
8	Длина пути утечки внешней изоляции, мм, не менее	205	180	310	260
9	Высота, мм	100	294	140	411
10	Масса, кг	0,45	3,1	0,75	4,2
11	Гарантийный срок эксплуатации	5 лет	3 года	5 лет	3 года
12	Срок службы	30 лет	20 лет	30 лет	20 лет





Подвесной ОПН 35 кВ с полимерной изоляцией



на ВЛ применены ОПН с полимерной (силиконовой) изоляцией, легкие и удобные при монтаже. Масса одной фазы ОПН 500 кВ составляет всего 144 кг.

Проект установки подвесных ОПН, разработанный для Сочинской энергосистемы в 2007 году, является уникальным: за счет габаритов и расположения ВЛ, протяженности бестростового участка, числа установленных ОПН.











Предназначен для защиты электрического и электронного оборудования от перенапряжений и импульсных токов (грозовых и коммутационных) в электроустановках коттеджей.

Номинальное напряжение: 230 В, 50 Гц.

Максимальное напряжение: 320 В, 50 Гц.

Уровень напряжения защиты: 1,5 кВ.

Максимальный ток разряда: 60 кА.

Номинальный ток разряда: 15 кА.

Кол-во модулей: 1. Габаритные размеры: 17,5×83×66 мм.

Сечение жил подсоединяемого провода: до 25 мм².

Диапазон рабочих температур: от - 10 до + 40°C.

Степень защиты: IP 20.

Способ крепления: на DIN-рейку.

Изготовитель: «Legrand».



Предназначены для защиты при прямом попадании молнии.

Максимальное непрерывное рабочее напряжение: 255 В, 50 Гц.

Импульсный ток через 1 полюс: 25 кА.

Импульсный ток I_{imp} (10/350) через 1 полюс: 25 кА.

Номинальный ток разряда I_{imp} (8/2 0) через 1 полюс: 2,5 кВ.

Сопровождающий ток (после разряда): 50 кА.

Максимальный ток короткого замыкания: 50 кА.

Ограничители перенапряжения с опцией TS имеют встроенные вспомогательные контакты: 1 «з»+ 1 «р».

Сечение жил подсоединяемого провода: 2,5–50 мм².

Степень защиты: IP 20.

Изготовитель: «ABB».



Предназначен для защиты электрического и электронного оборудования от перенапряжений и импульсных токов (грозовых и коммутационных) в электроустановках жилых, общественных, административных зданий.

Используется для защиты при прямом ударе молнии.

Расчётное напряжение разрядника: 255 В, 50 Гц.

Максимальное напряжение: 400 В, 50 Гц.

Максимальный ток разряда: 50 кА.

Уровень напряжения защиты: 2,0 кВ.

Кол-во полюсов: 1Р.

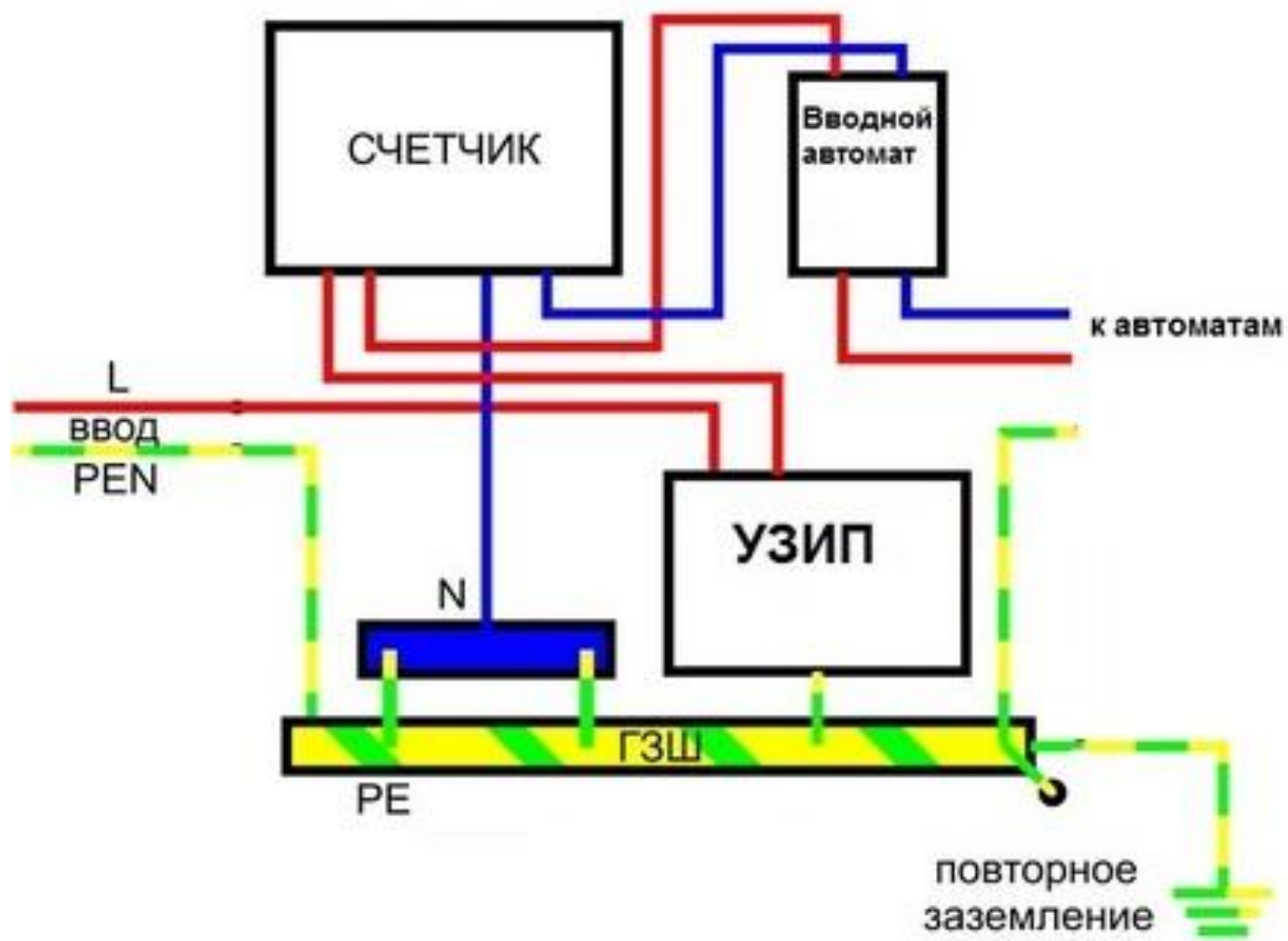
Габаритные размеры: 35,0×100×49,5 мм.

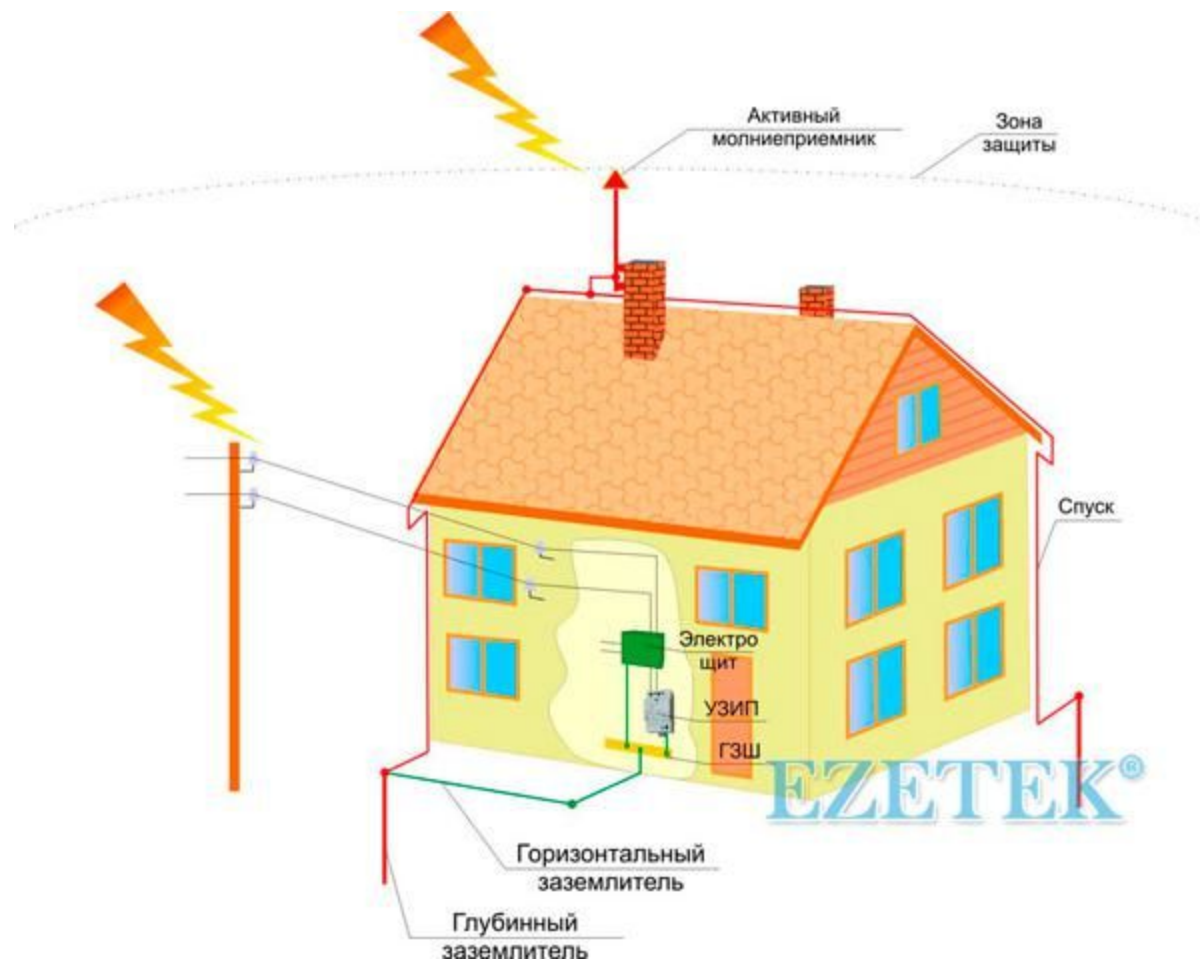
Сечение жил подсоединяемого провода: от 10 до 50 мм².

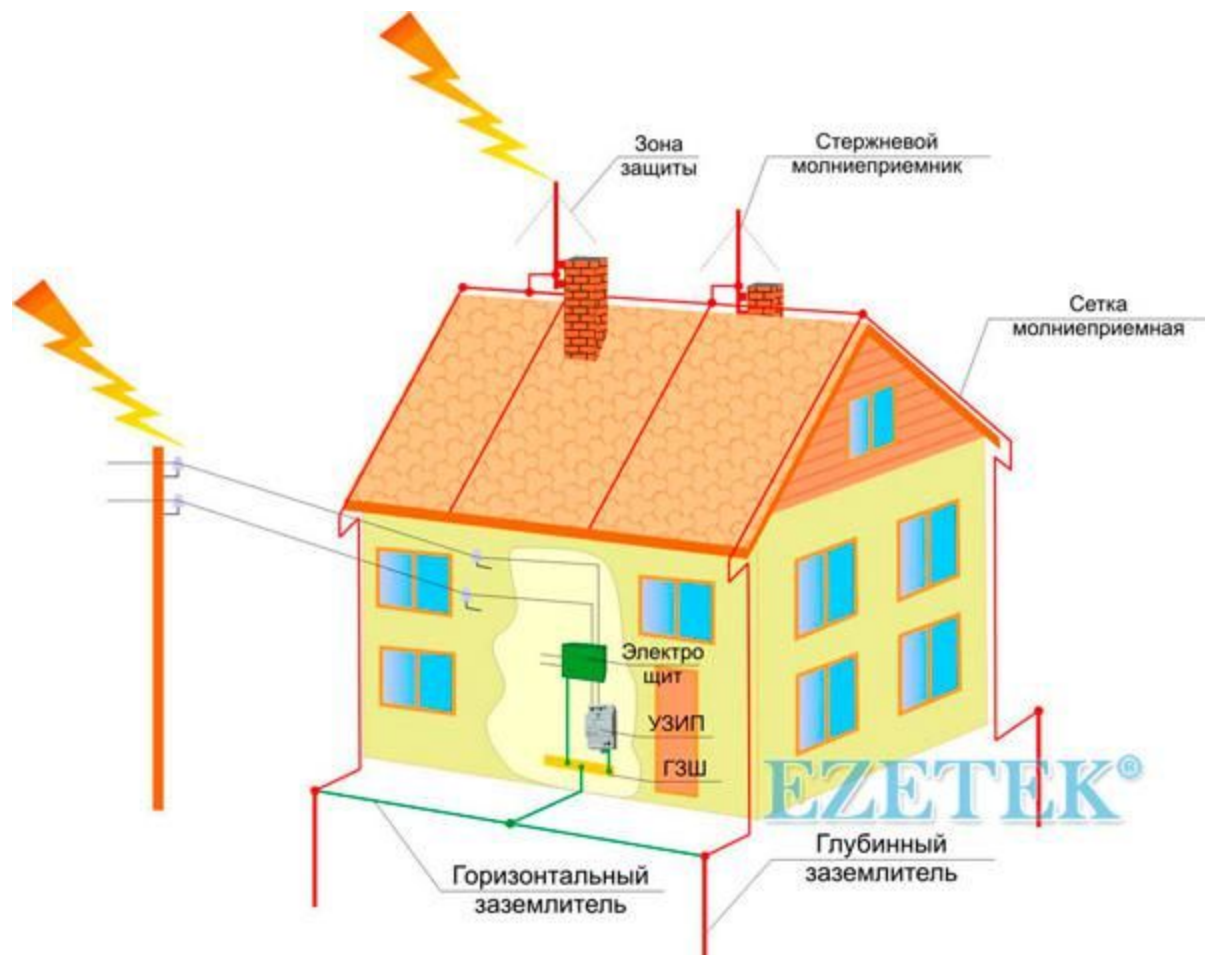
Диапазон рабочих температур: от - 40 до + 85° С.

Степень защиты: IP 20.

Изготовитель: «ОВО Bettermann», Германия.







Внутренние перенапряжения

1. Квазистационарные (установившиеся)
2. Коммутационные — перенапряжения переходных процессов
3. Дуговые при замыканиях на землю

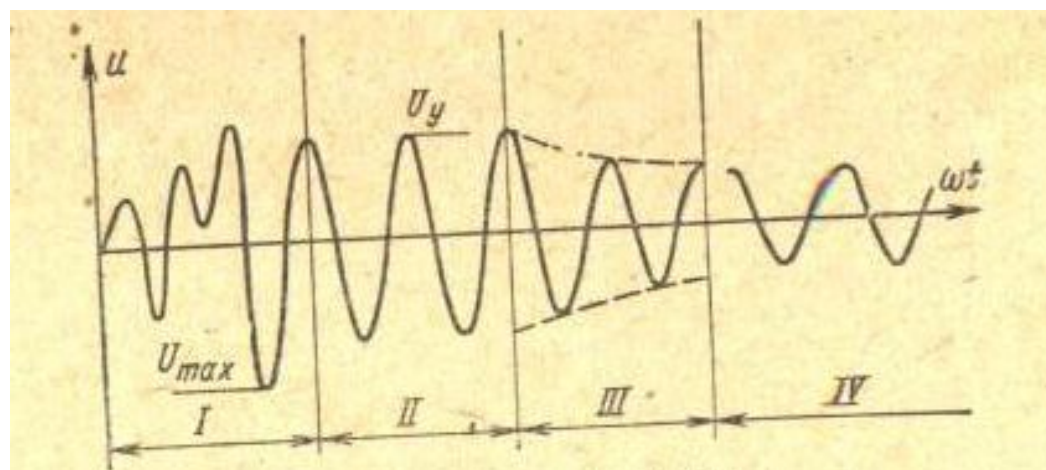
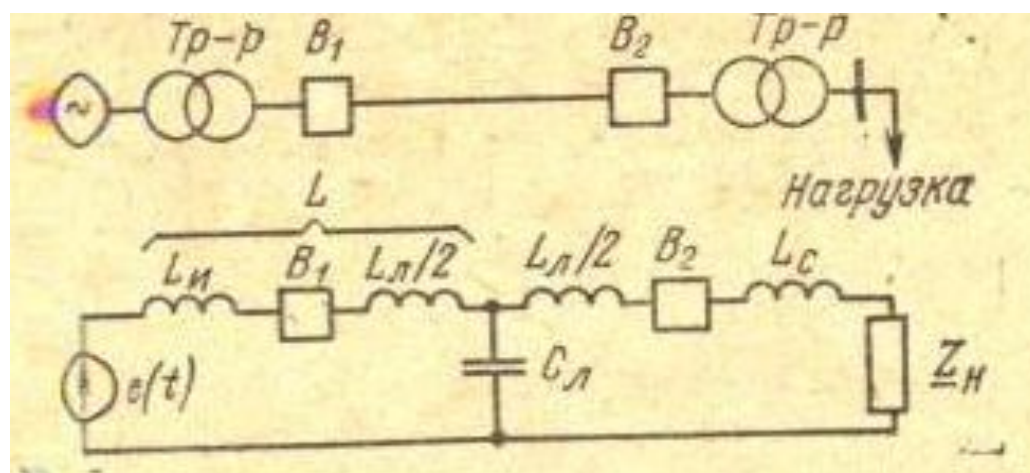


Рис. 18.2. Стадии работы регулятора.
 I — переходный процесс; II — установившийся режим до начала работы регуляторов (вынужденная составляющая переходного процесса); III — работа регуляторов возбуждения; IV — новый установившийся режим.

Перенапряжения установившихся режимов

1. Емкостный эффект в симметричных линейных схемах

Напряжение в конце разомкнутой линии U_2 связано с напряжением в начале линии U_1 следующим соотношением (если пренебречь активными сопротивлениями):

$$U_2 = \frac{U_1}{\cos \beta l}, \quad (18.2)$$

где β — коэффициент фазы, равный 0,06 град. на 1 км линии; l , км, — длина линии.

При $\beta l \rightarrow 90^\circ$ напряжение в конце линии увеличивается до очень больших значений, так как $\cos \beta l \rightarrow 0$. Такое повышение напряжения можно ожидать в дальних линиях электропередачи, когда длина линии превышает 1000 км.

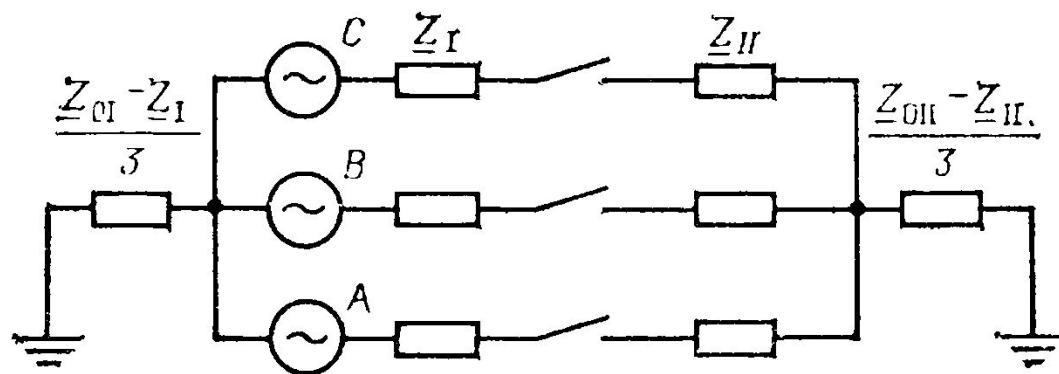
2 . Перенапряжения несимметричных режимов

При несимметричных КЗ на землю повышение напряжения на неповрежденных фазах определяется отношением входных сопротивлений нулевой и прямой последовательности $\underline{Z}_0/\underline{Z}_1$ относительно точки КЗ.

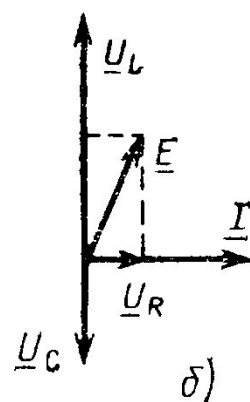
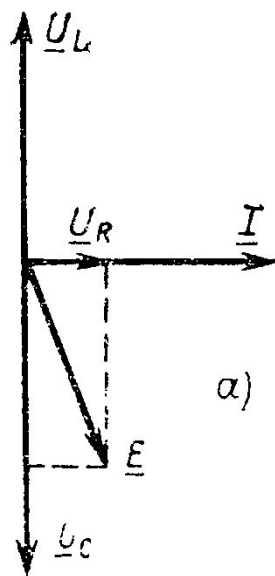
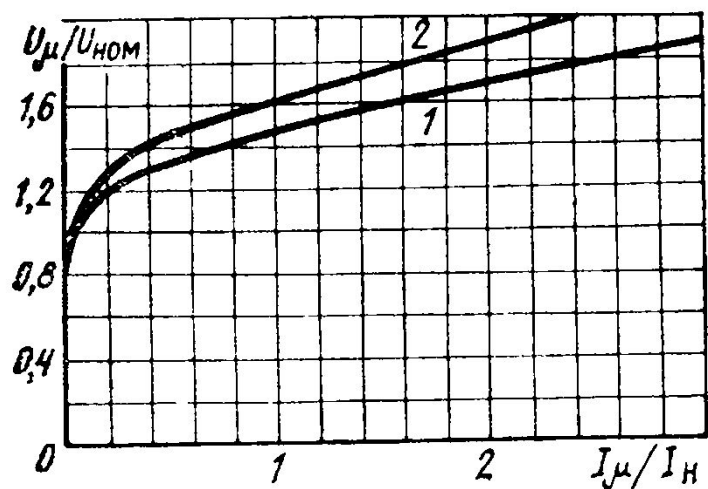
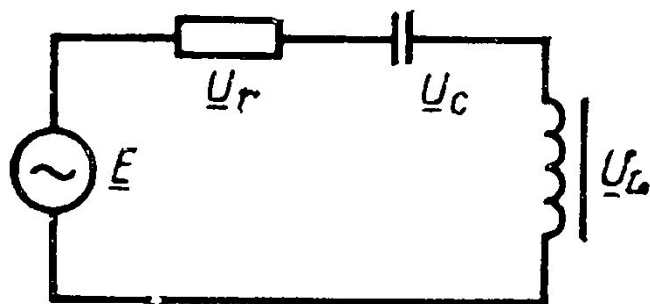
В электропередачах 110—220 кВ с заземленной нейтралью отношение $|\underline{Z}_0/\underline{Z}_1| \leq 3$. При этом при однофазном КЗ на неповрежденной фазе повышение напряжения не превышает $1,25 U_{\text{наиб,раб}}$, что является вполне допустимым.

В электропередачах СВН при одностороннем отключении несимметричного КЗ в удаленных от питающей системы точках отношение $|\underline{Z}_0/\underline{Z}_1|$ может принять любое значение, что может привести в ряде случаев к резкому возрастанию напряжения на неповрежденных фазах.

Перенапряжения при неполнофазных режимах в электрических системах возникают тогда, когда входные сопротивления прямой и нулевой последовательности относительно точки разрыва имеют противоположный характер, т. е. если одно из них индуктивное, а другое емкостное.



3. Феррорезонансные перенапряжения



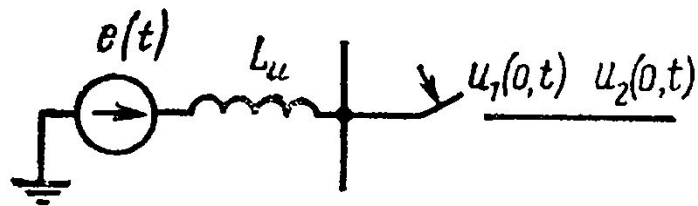
1 — зависимость между амплитудами напряжения и намагничивающего тока;
2 — зависимость между амплитудами тока и напряжения основной частоты

Коммутационные перенапряжения

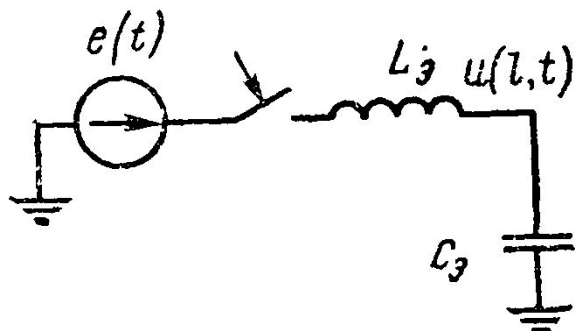
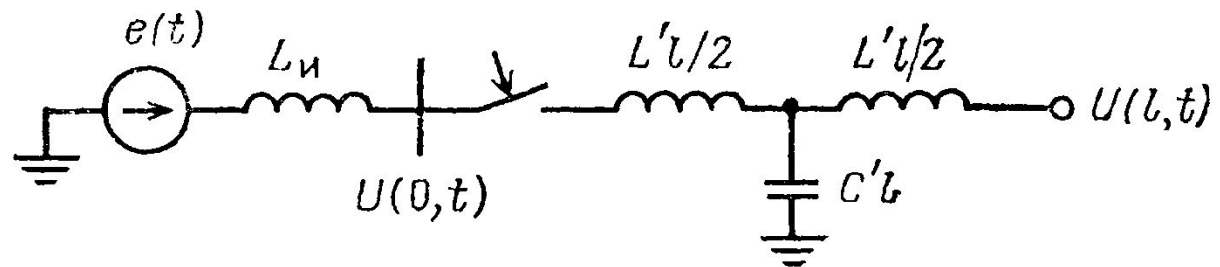
Перенапряжения переходного процесса определяются следующими факторами:

- а) частотами и декрементами затухания свободных колебаний, в первую очередь первой собственной частоты и декрементом затухания этой частоты;
- б) значением установившегося напряжения, зависящего от вида коммутации;
- в) начальными условиями, определяемыми характеристиками выключателя.

Перенапряжения при включении ненагруженной линии

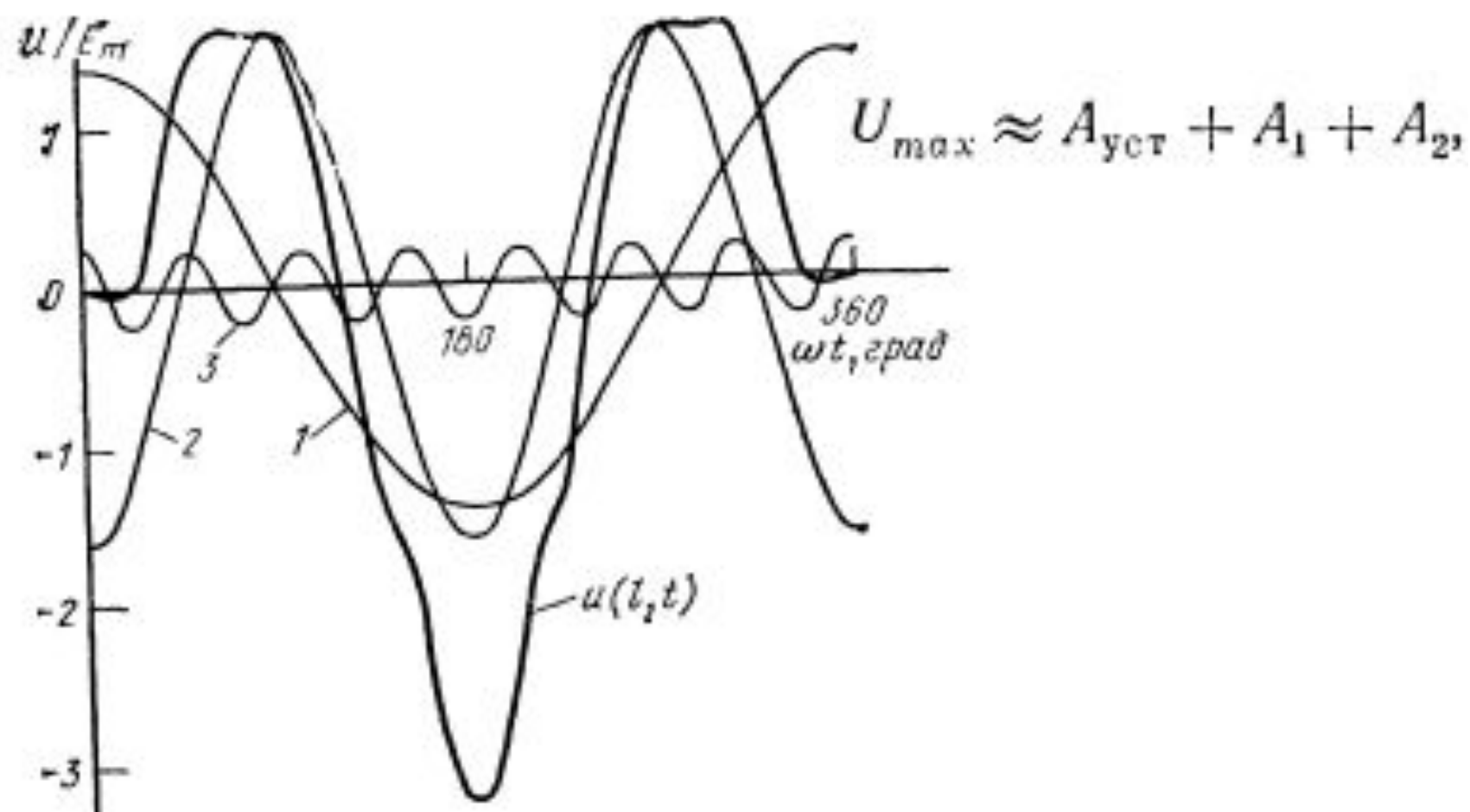


$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$



$$L_3 = L_{II} + L_{II}/2 = L_{II} + L'l/2$$

$$C_3 = C_{II} = C'l,$$



$$K_{\text{уд}} = \frac{U_{\max}}{A_{\text{уст}}} \approx \frac{A_{\text{уст}} + A_1 + A_2}{A_{\text{уст}}} = 1 + \frac{A_1 + A_2}{A_{\text{уст}}} > 2.$$

$$u(l, t) = u_{\text{уст}} + u_{\text{св}} = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left\{ \sin(\omega t + \varphi) - \right. \\ \left. - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right\}, \quad ($$

$$\varphi_1 = \text{arctg} \left(\frac{\omega_1}{\omega} \text{tg} \varphi \right);$$

ω — частота источника

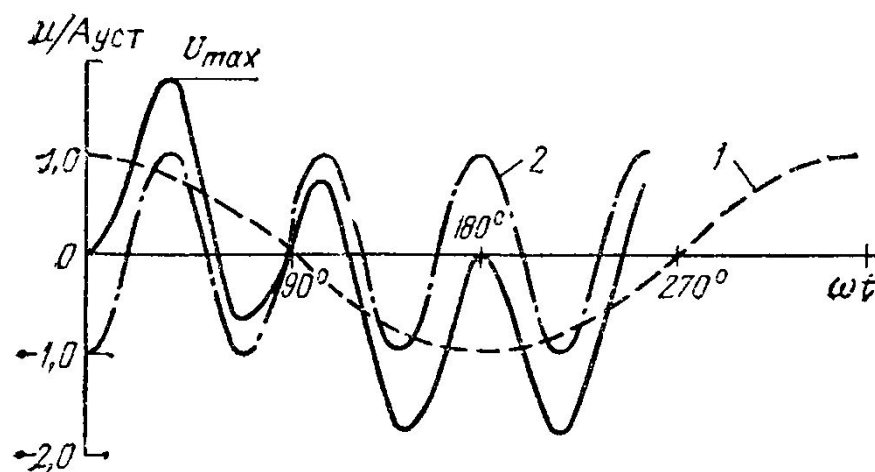
$\omega_1 = 1/\sqrt{L_3 C_3}$ — частота свободных колебаний;

$$\delta = R/2L_3$$

$$A = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2}.$$

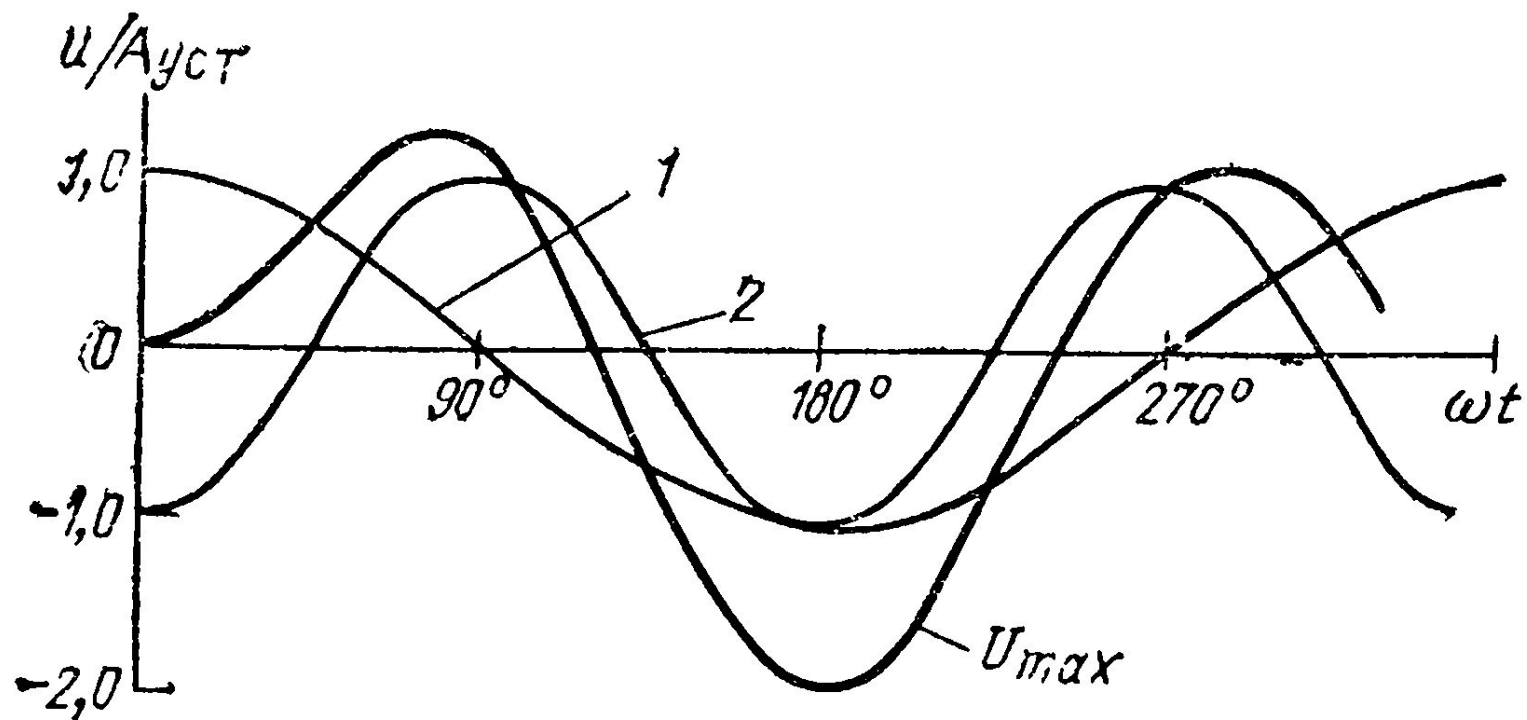
$$\varphi = 90^\circ$$

$$\omega_1/\omega = 5$$

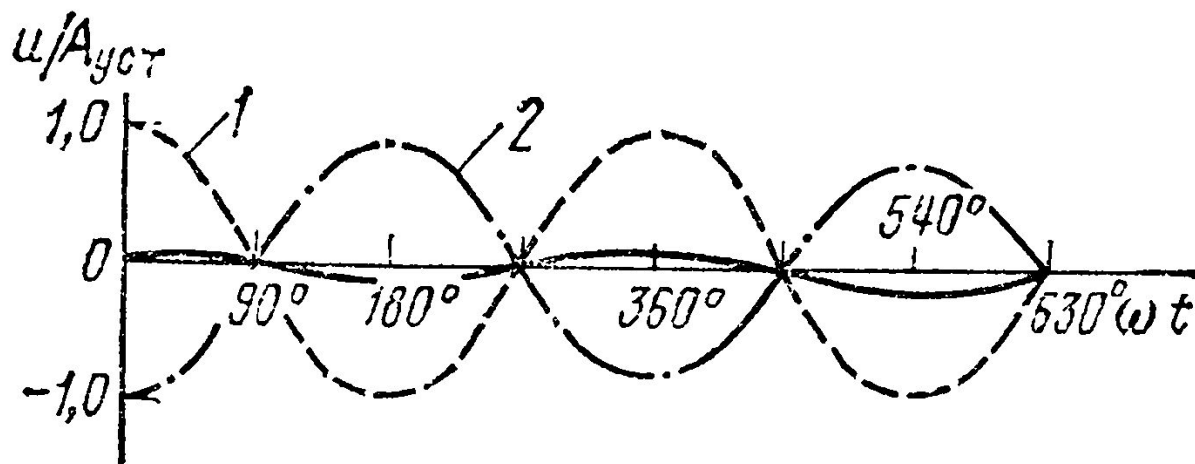


1 — вынужденная составляющая; 2 — свободная составляющая

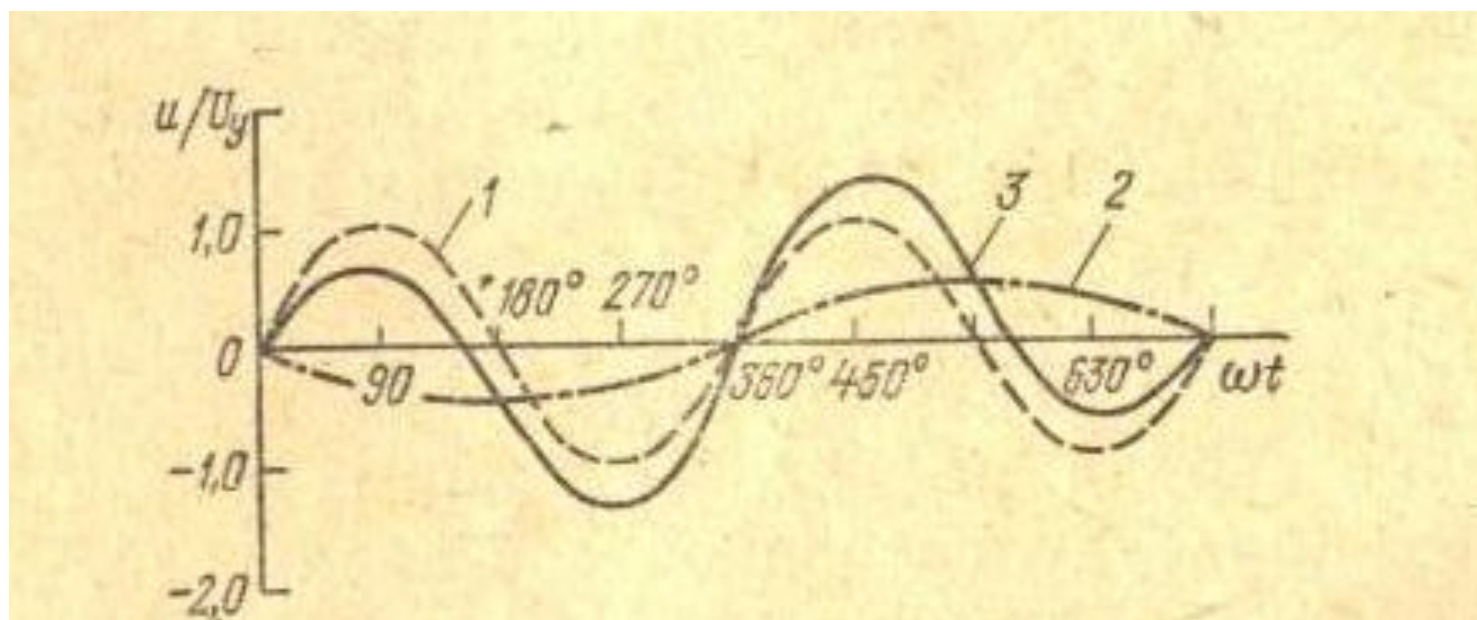
$$[\omega_1/\omega = 2,0]$$



$$\omega_1/\omega = 1$$



$$E_m \frac{\omega L_{\Theta}}{R} = (10 \div 20) E_m.$$

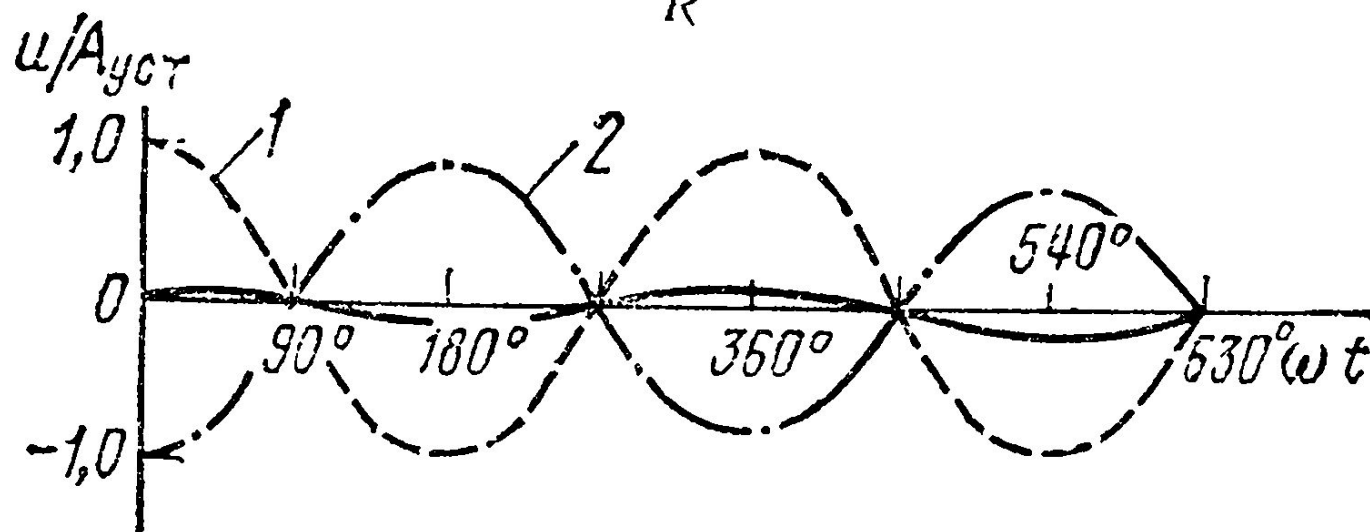


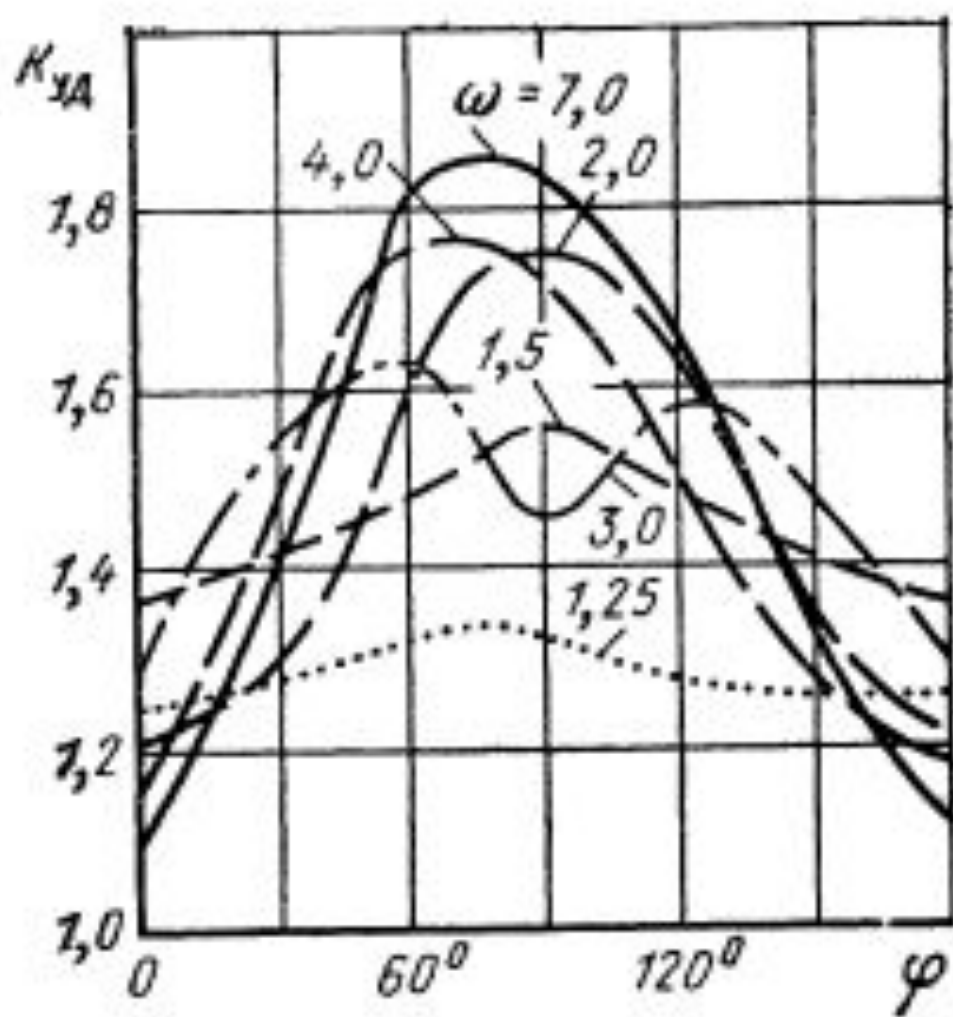
Переходный процесс при включении линии при $\omega_1/\omega = 1/2$.

На практике, хотя и достаточно редко, можно встретить случай $\omega_1 = \omega$. Тогда говорят, что в сети выполняются условия резонанса на промышленной частоте. При этом напряжение в колебательном контуре определяется выражением

$$u(l, t) = E_m \frac{\omega L_{\partial}}{R} (1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega t + \varphi)$$

$$E_m \frac{\omega L_{\partial}}{R} = (10 \div 20) E_m.$$





Перенапряжения при АПВ

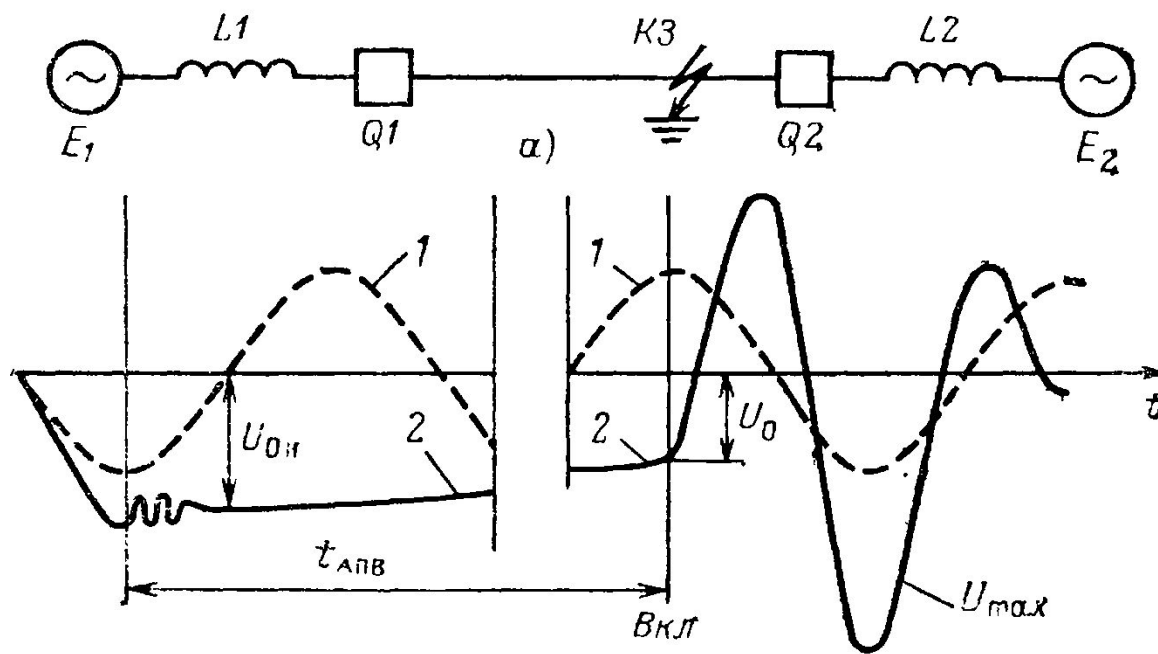
Использование АПВ основано на том, что большинство замыканий носит дуговой характер. Поэтому при отключении участка линии с КЗ с двух сторон дуга может погаснуть и линия может быть снова включена через время $t_{\text{АПВ}}$ (рис. 27.9). Цикл АПВ можно подразделить на следующие этапы:

- отключение линии выключателем $Q2$, ближайшим к месту КЗ, приводящее к кратковременному режиму одностороннего питания линии;

- отключение неповрежденных фаз линии выключателем $Q1$, т. е. обрыв емкостного тока при переходе его через нулевое значение, что соответствует максимуму напряжения на этих фазах;

- повторное включение разомкнутой линии выключателем $Q1$;

- замыкание выключателя $Q2$ и восстановление нормальной схемы электроснабжения.



$$u(l, t) = A_{\text{уст}} \sin(\omega t + \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \times$$

$$\times \sqrt{\left(\sin \varphi + \frac{U_0}{A_k}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi\right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

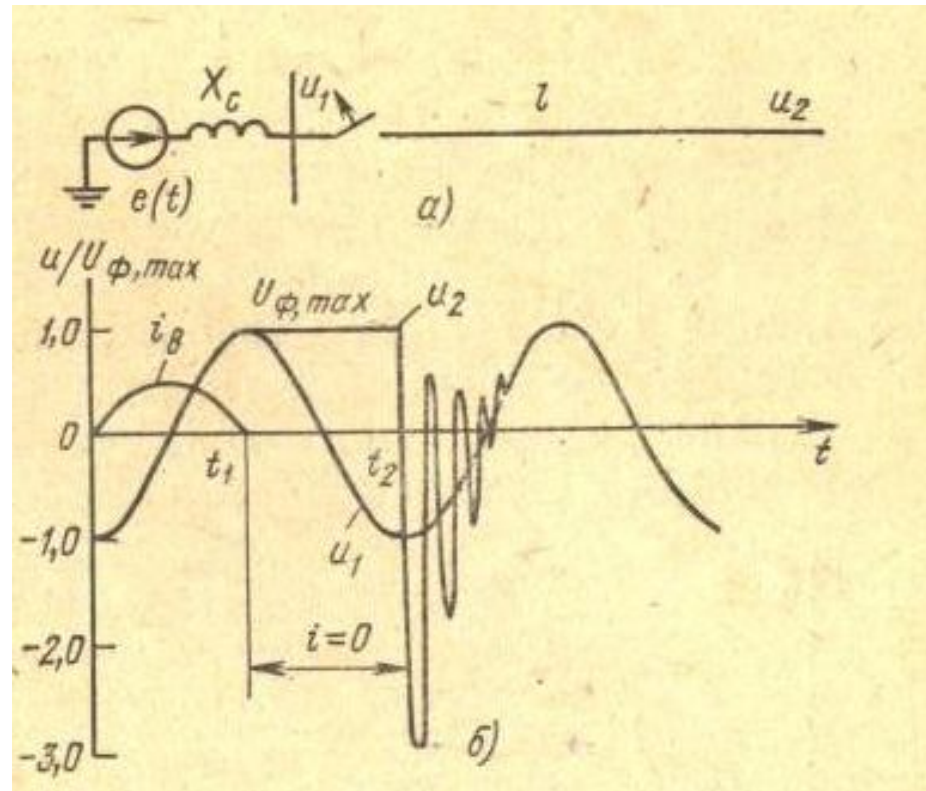
$$\text{где } \varphi_k = \arctg \left[\frac{\omega_k}{\omega} \frac{\sin \varphi + U_0/A_k}{\cos \varphi} \right].$$

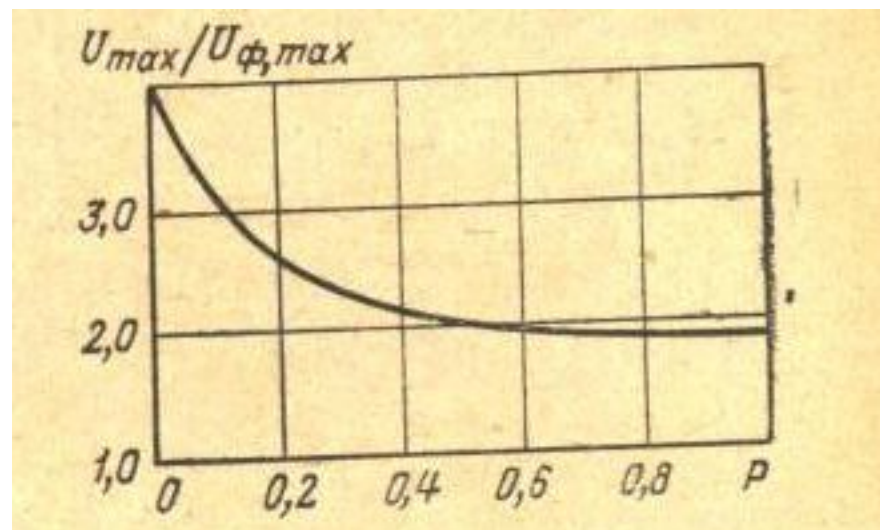
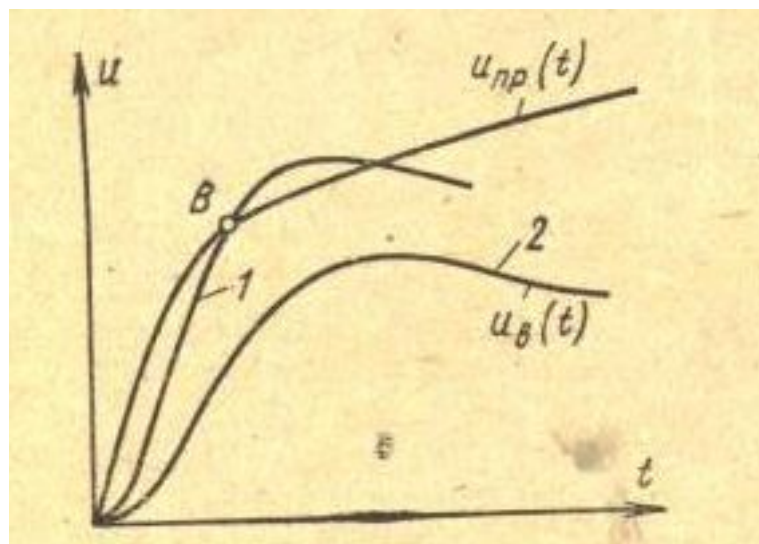
$$u_2 = E_{max} \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left[\sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \cos^2 \varphi} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right] \pm u_0 \cos \omega_1 t e^{-\delta t}.$$

Таблица 19.1. Характерные значения перенапряжений в линиях электропередачи

$U_{ном},$ кВ	Натуральная мощность линии, МВт	Средняя длина участка линии, км	Мощность реакторов, МВ·А	$\frac{U_y}{U_\phi}$	$\frac{\omega_1}{\omega}$	Время на- ступления $U_{max},$ мс	$k_{уд} = \frac{U_{max}}{U_y}$	
							$U_0=0$	$U_0=-U_\phi$
220	120	200	0	1,14	2,07	4	1,61	2,40
330	360	300	0	1,24	2,29	9	1,73	2,36
500	900	450	165	1,18	2,03	10	1,71	2,22
500	900	450	0	1,60	1,66	12	1,58	2,00
750	2200	600	300	1,36	1,73	11	1,65	2,16

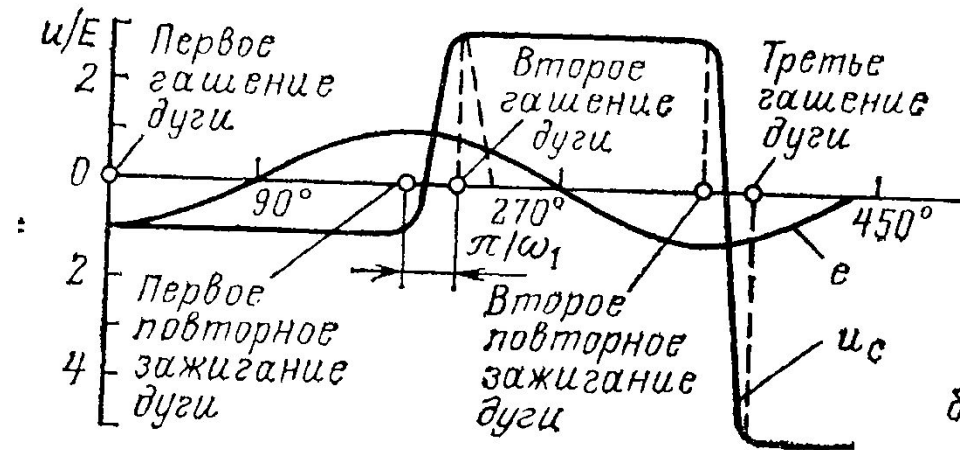
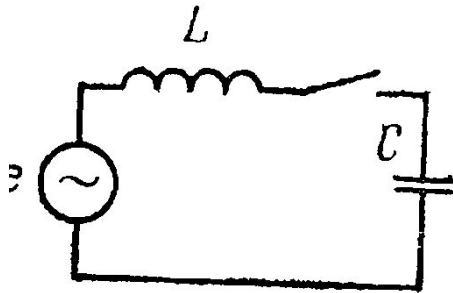
Перенапряжения при отключении ненагруженных линий





Из этой кривой следует, что вероятность перенапряжений, превышающих $3,5 U_{\phi}$, составляет всего 2%. Практика эксплуатации показывает, что в основном следует ориентироваться на возможность перенапряжений около $3,0 U_{\phi}$.

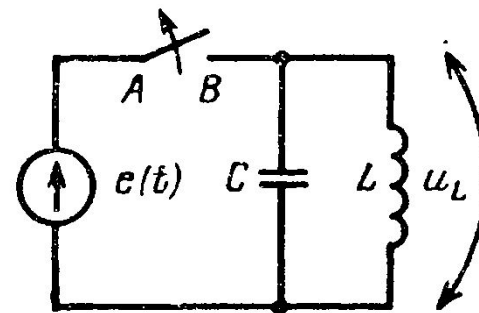
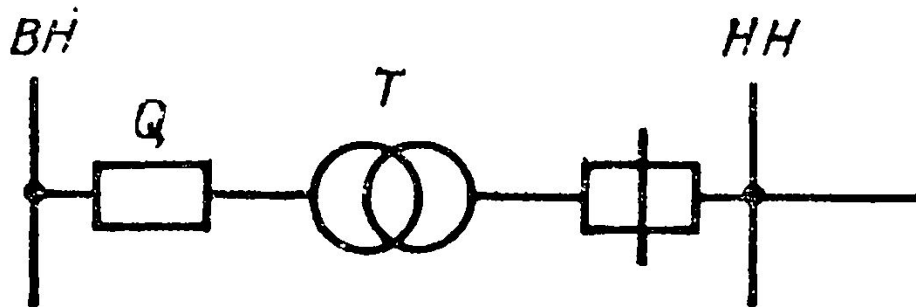
Перенапряжения при отключении конденсаторов



$$u_c(t) = E_m \cos \omega t - 2E_m \cos \omega_1 t.$$

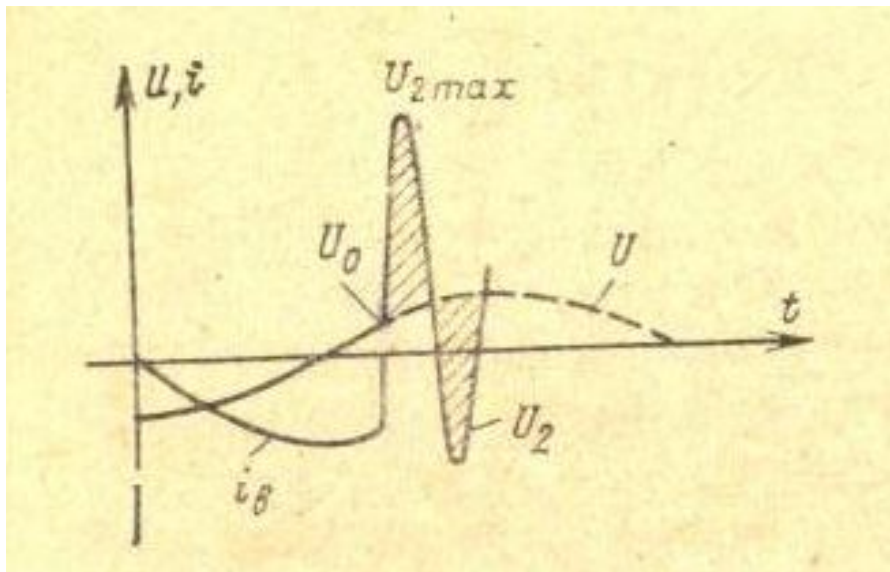
$$U_{max} \approx E_m + 2E_m = 3E_m.$$

Перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов



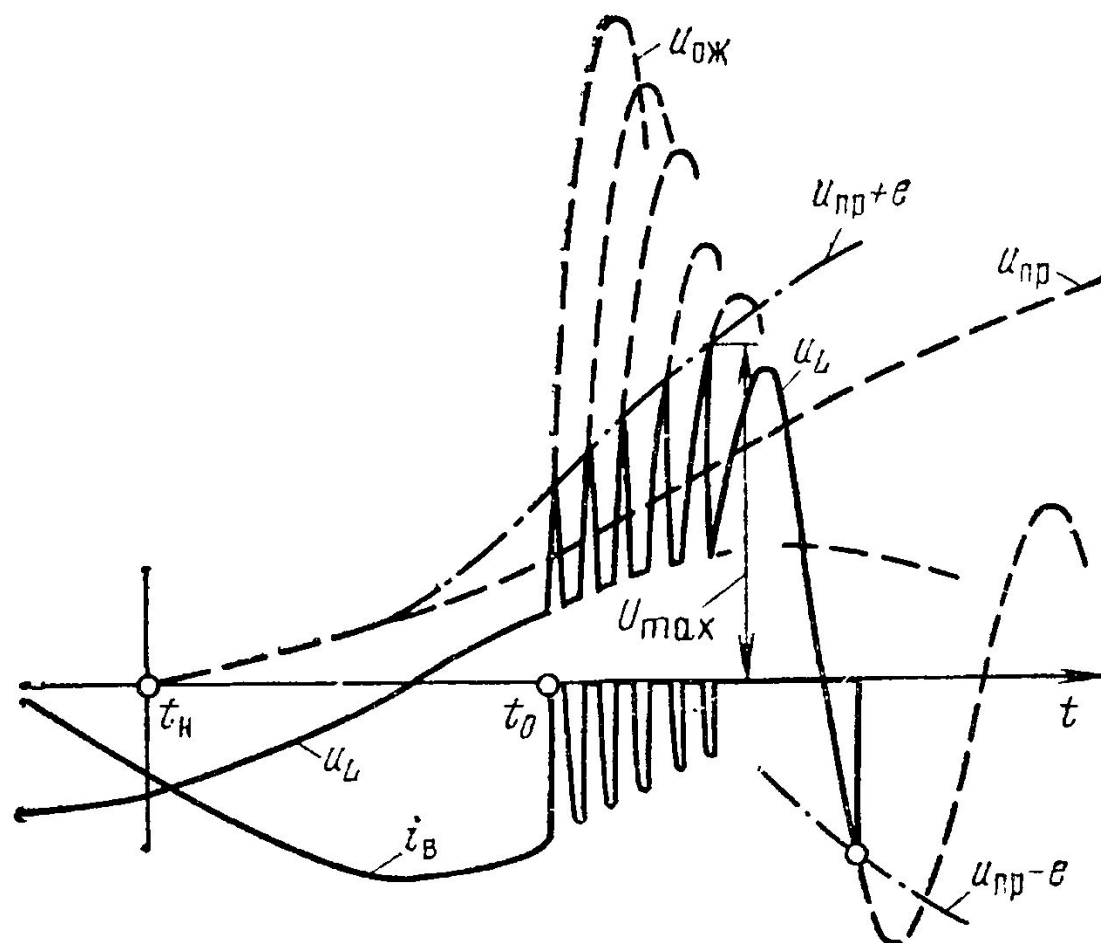
$$u_C(t) = U_0 \cos \omega_1 t + \omega_1 L I_0 \sin \omega_1 t =$$

$$= U_0 \cos \omega_1 t + I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega_1 t,$$



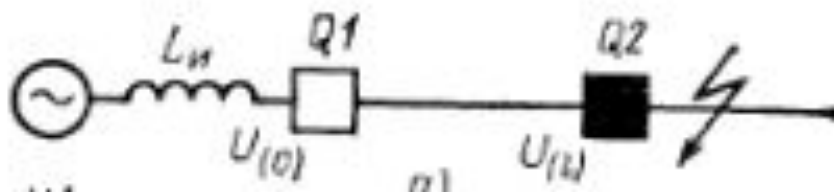
$$\frac{CU_0^2}{2} + \frac{LI_0^2}{2} = \frac{CU_{max}^2}{2}$$

$$U_{max} = \sqrt{U_0^2 + \left(I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}\right)^2}$$

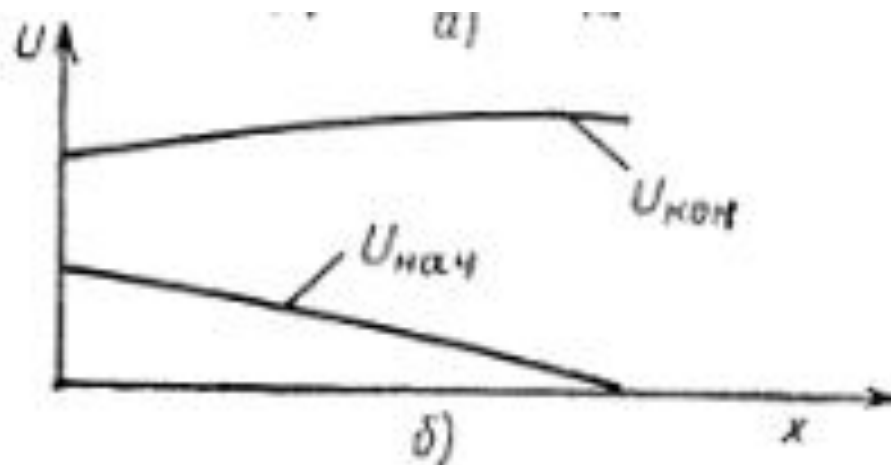


Перенапряжения при отключении больших токов

При КЗ на линии напряжение в месте повреждения обычно близко к нулю



После отключения выключателя $Q2$ напряжение в конце линии возрастает до установившегося



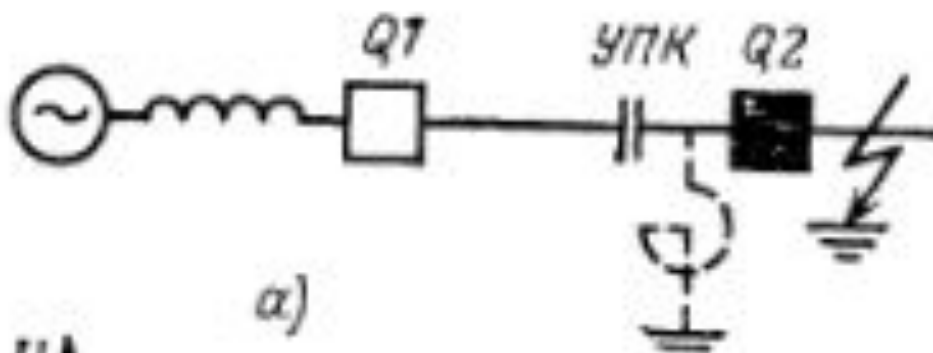
Напряжение в конце линии при обрыве дуги при прохождении тока КЗ через нулевое значение

$$u(l, t) = A_{уст} \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \cos \omega_k t$$

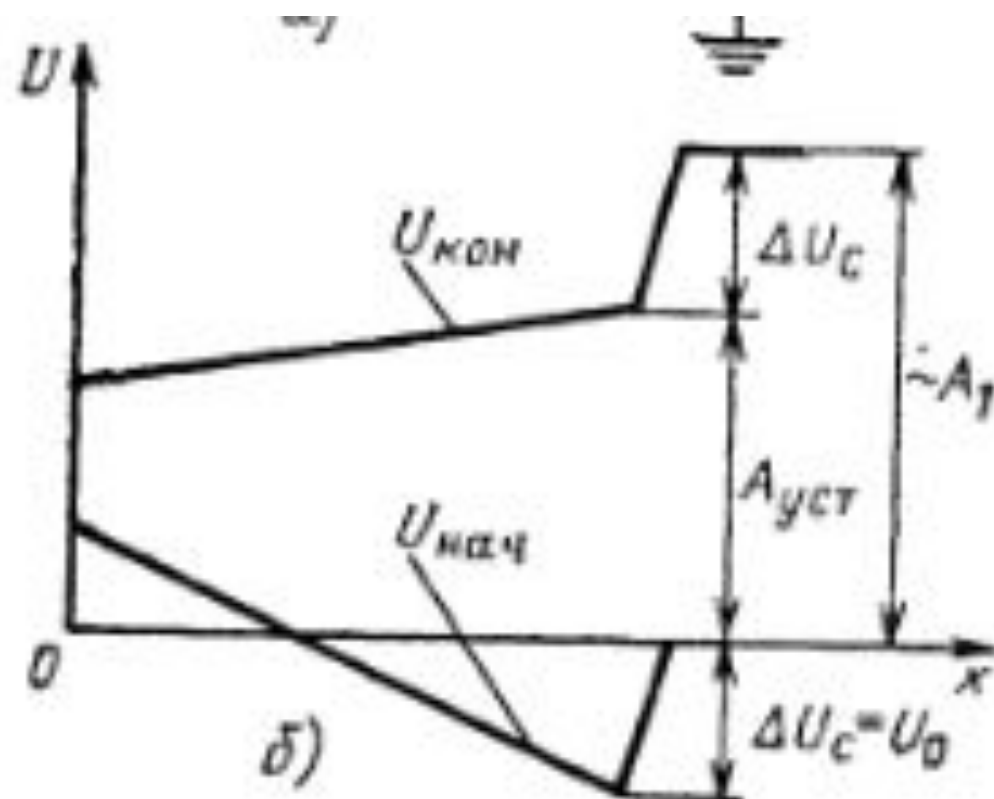
Одностороннее отключение КЗ приводит к той же схеме, что и включение ненагруженной линии, поэтому амплитуды установившегося напряжения и частоты свободных колебаний в обоих случаях будут одинаковы. Различие амплитуд свободных составляющих обусловлено тем, что при отключении КЗ емкость заряжена до некоторого значения.

Так как амплитуда первой свободной составляющей меньше амплитуды вынужденной составляющей, то ударный коэффициент в этом случае не превышает двух.

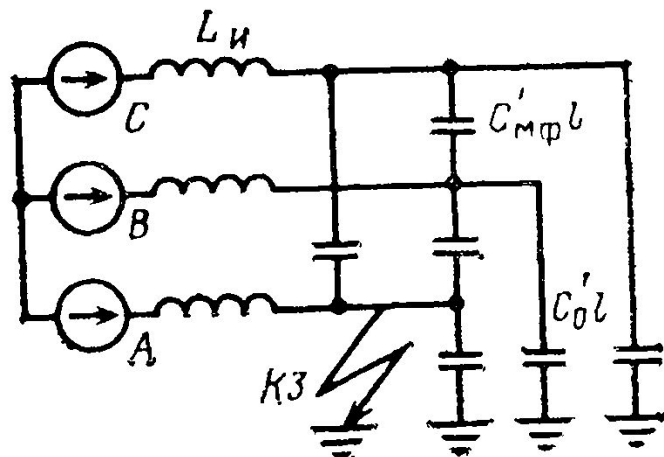
Если на линии имеется установка продольной компенсации (УПК), то прохождение тока КЗ по УПК вызывает значительное падение напряжения на ней, и на конце линии появляется постоянная составляющая напряжения или гармоники с той же амплитудой.



Амплитуду свободной составляющей возрастает за счет заряда на емкости УПК. Поэтому ударный коэффициент может значительно превышать два .

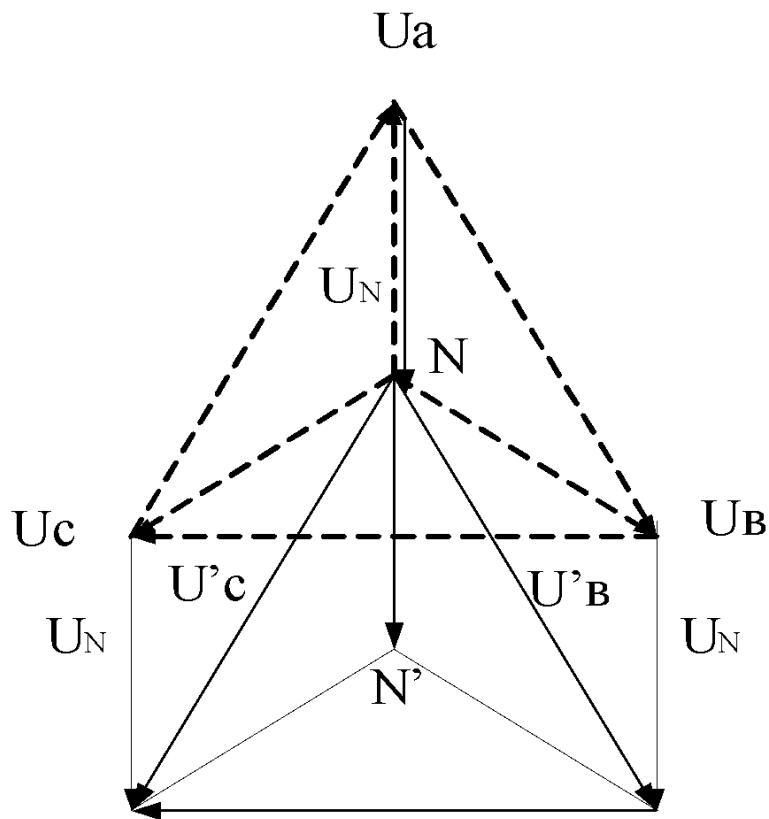


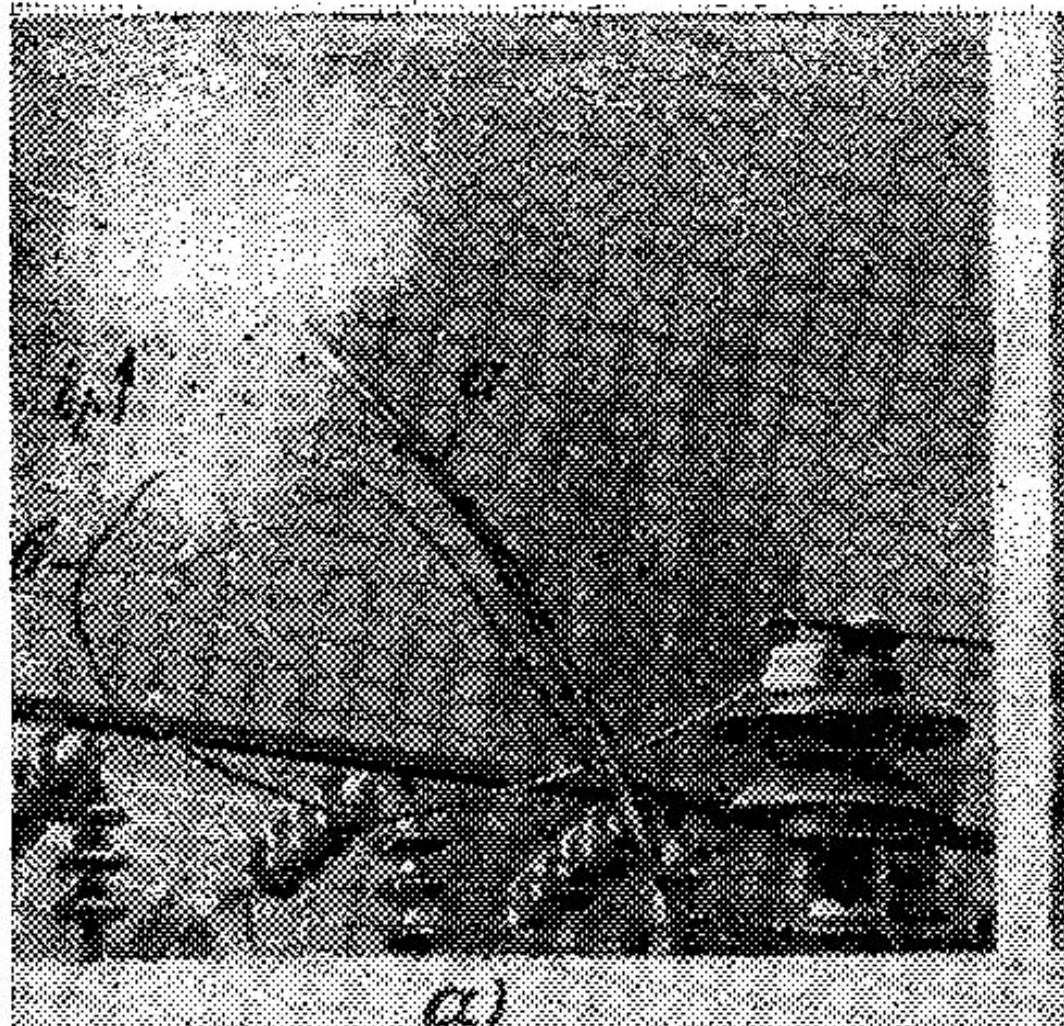
Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю

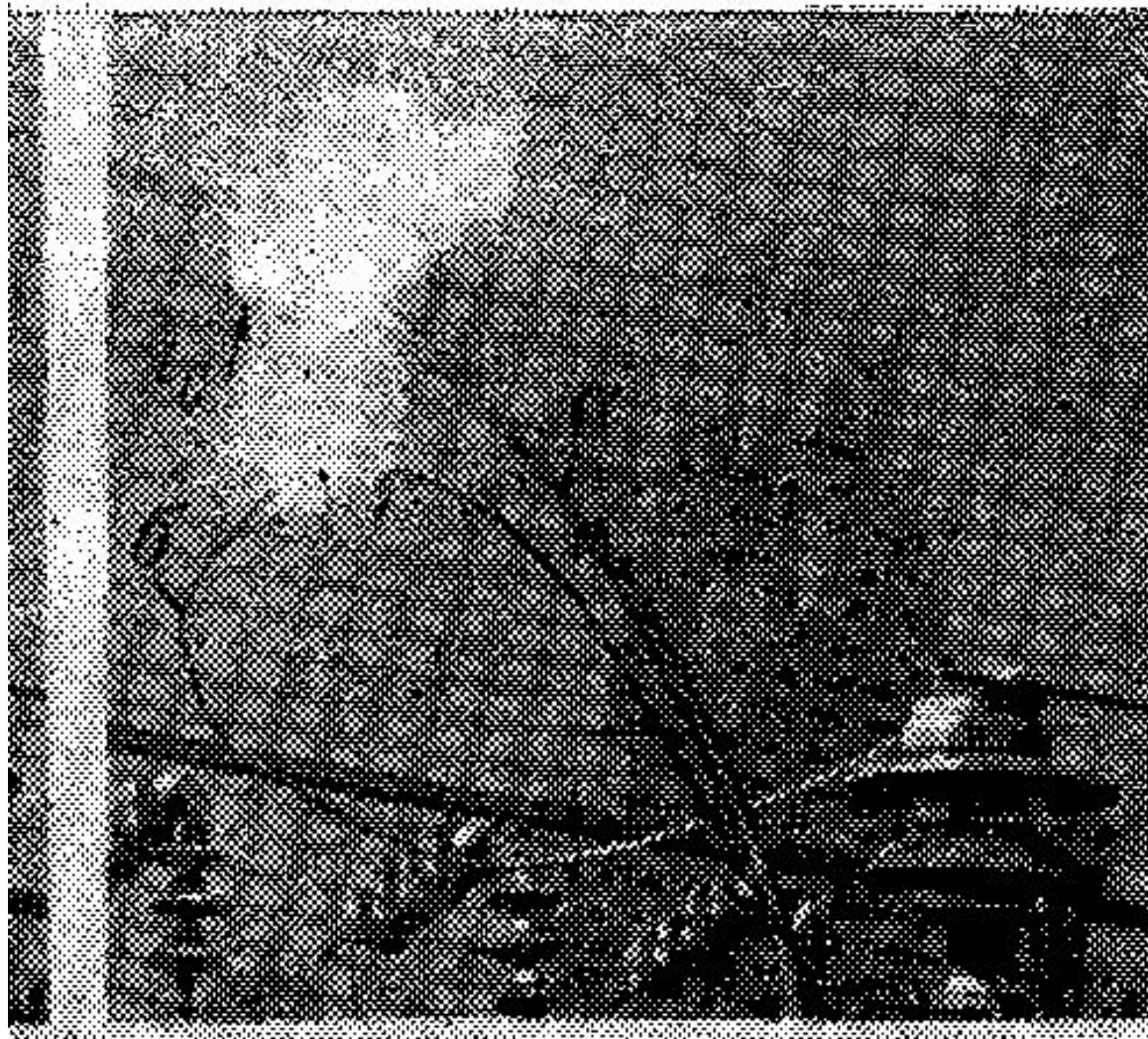


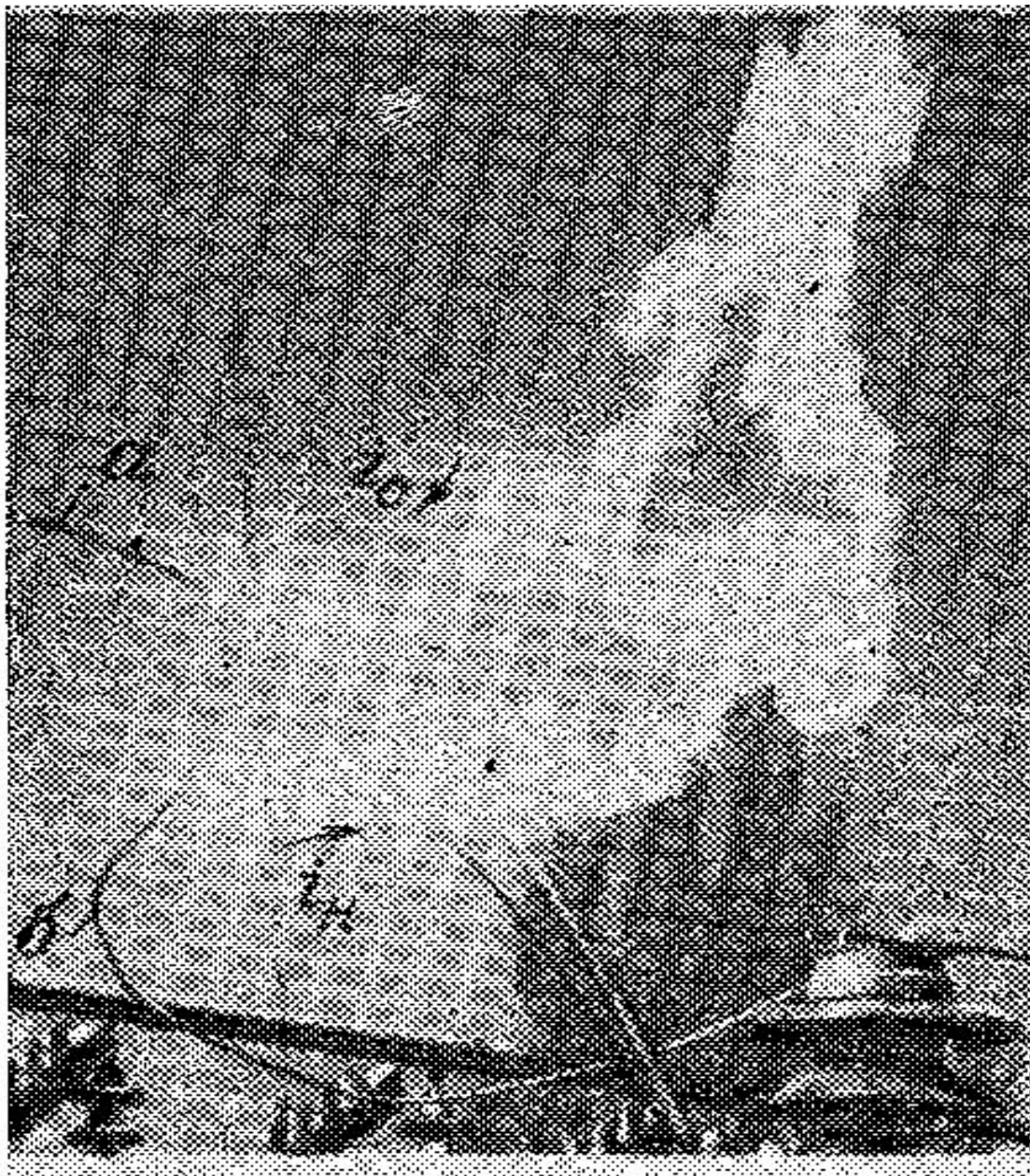
C'_0 — емкость фазы на землю;
 $C'_{\text{мф}}$ — междуфазная емкость;
 $L_{\text{и}}$ — индуктивность источника

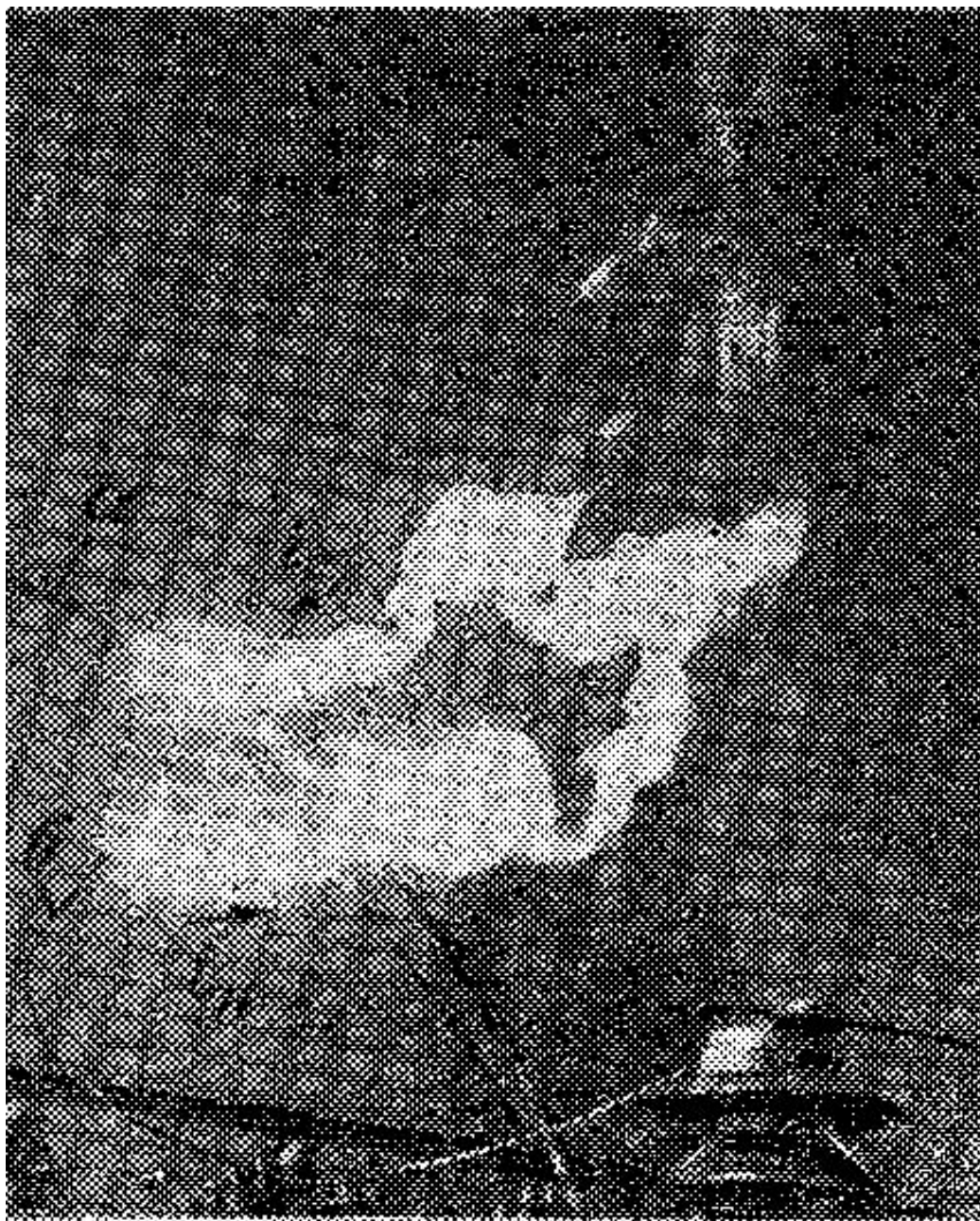
Векторная диаграмма напряжений при однополюсном замыкании в сети с изолированной нейтралью











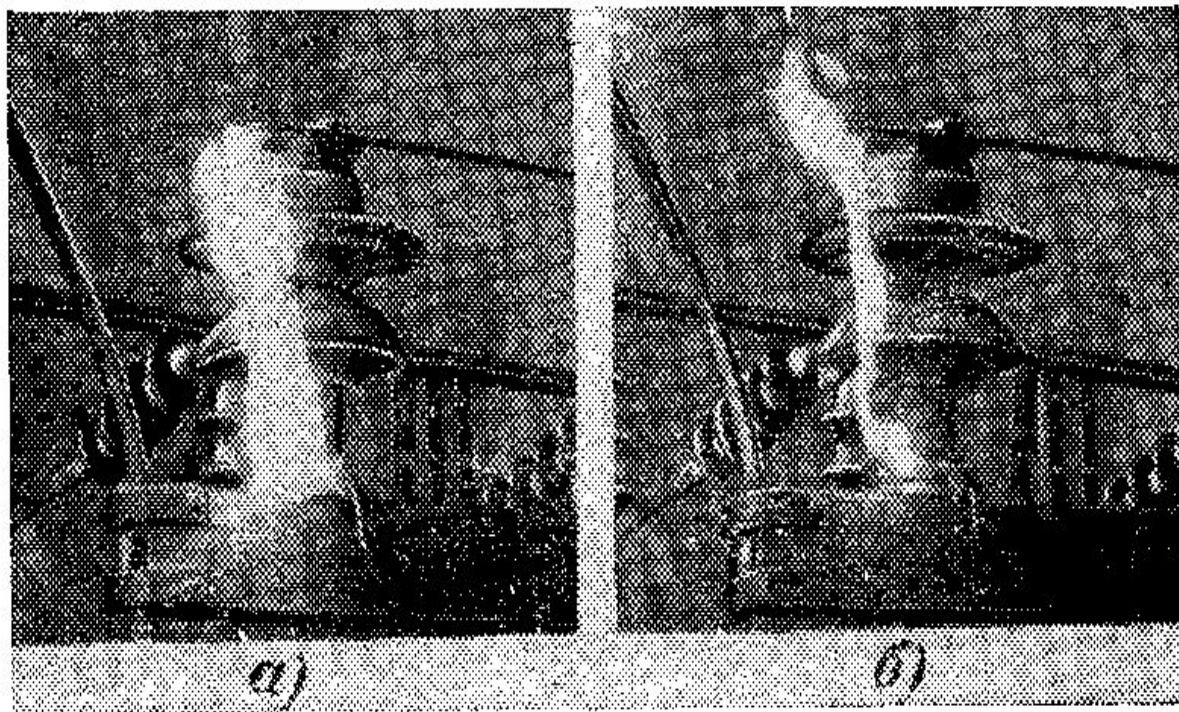
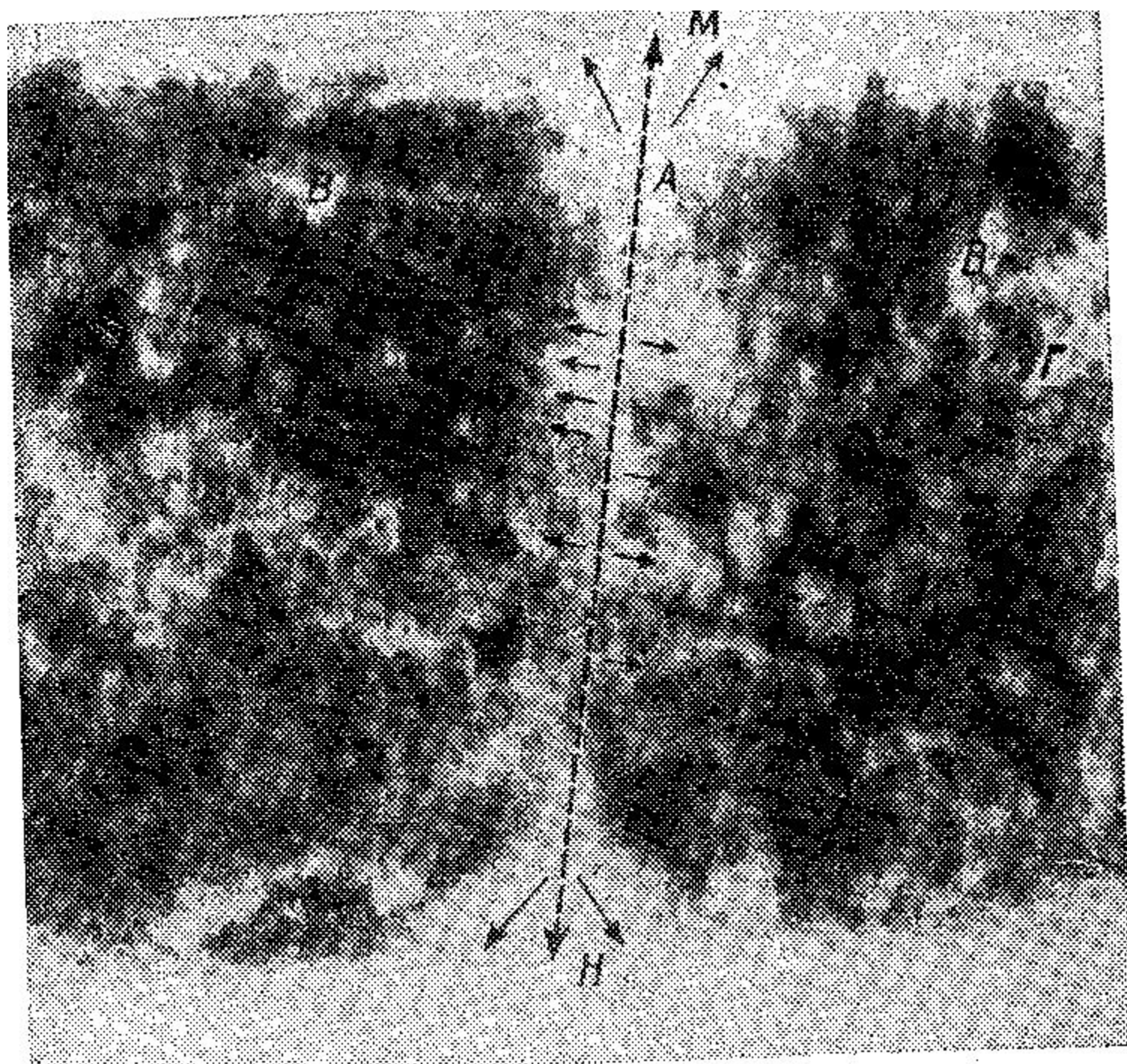
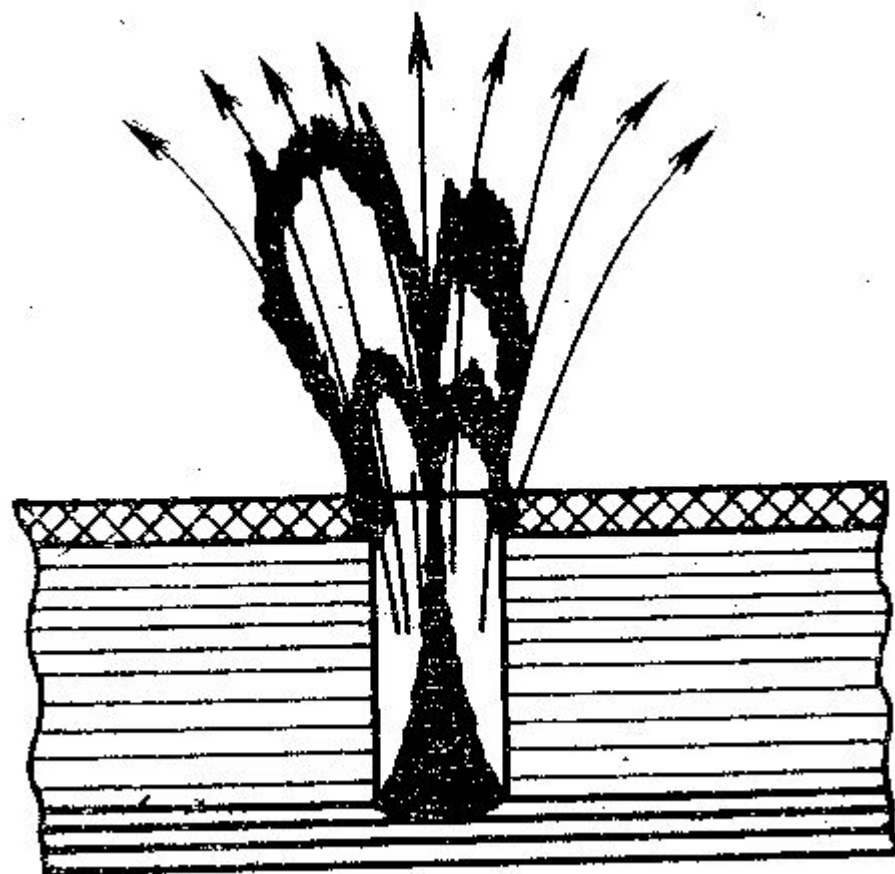


Рис. 21. Заземляющая дуга с током 1,5 а на поверхности изоляторов ШТ-35 в сети 35, работающей с перекомпенсацией на 5,5%.

а — $t=0,08$ сек; *б* — $t=0,2$ сек.

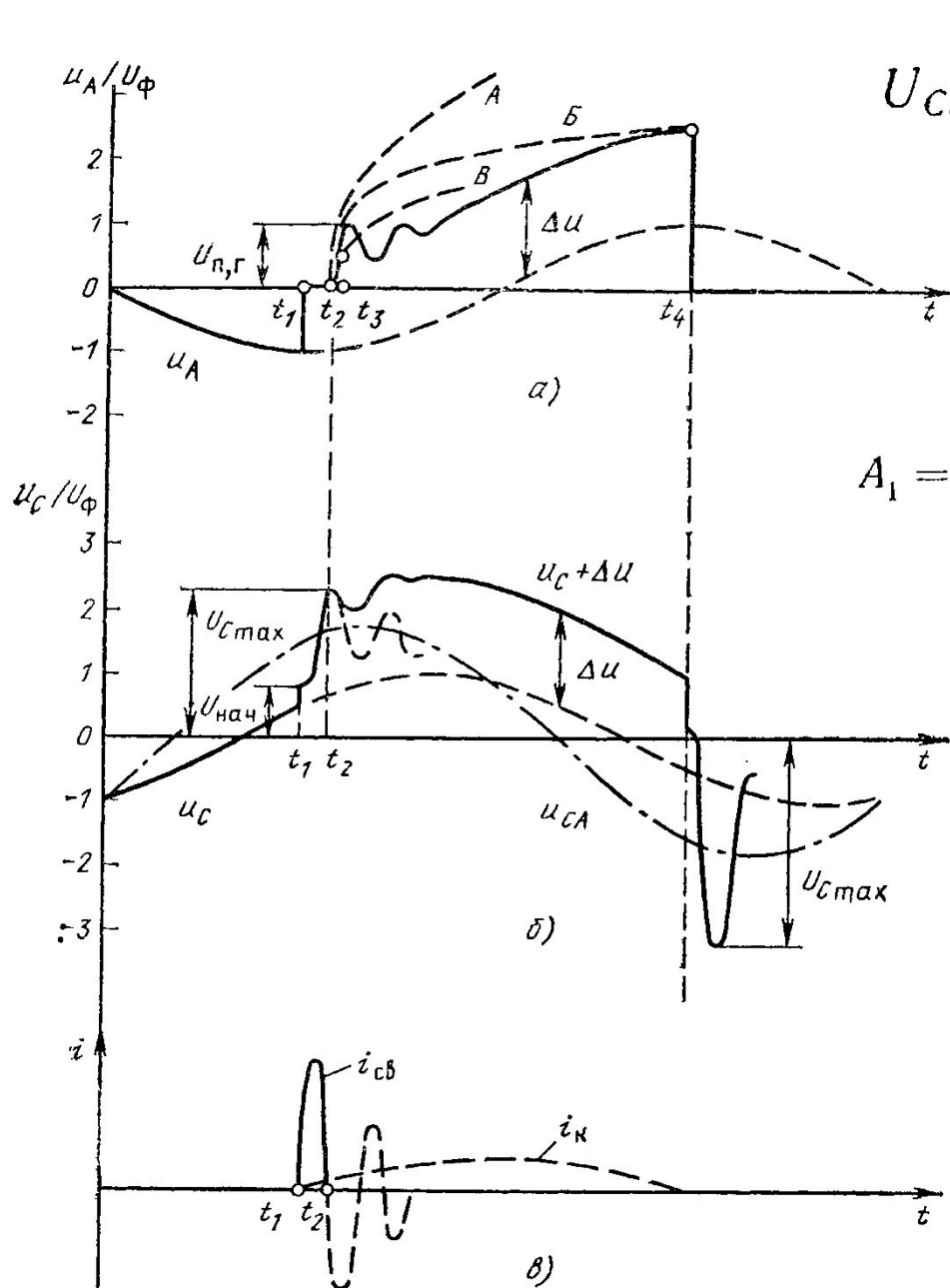
Для закрытых заземляющих дуг характерным является то, что они горят в узких каналах и длина их неизменна. Разложение продуктов горения дуги приводит к возникновению ударных давлений и обдуву дуги с интенсивным ее охлаждением. При этом резко снижается температура дуги, возрастает ее сопротивление и образуется пик гашения, представляющий собой активное падение напряжения при подходе тока дуги к нулю. При горении закрытых заземляющих дуг в объеме, заполненном маслоканифольной мастикой, в закрытых кабельных муфтах, а также в баках, заполненных маслом, происходит интенсивное выделение газов с преобладанием водорода. В зоне ствола дуги происходит взрывообразное разложение мастики или масла и очищение от проводящих элементов (углерода и паров металла). Эта зона приобретает высокую электрическую прочность и дуга обрывается.





Проводящие элементы оседают в области низких температур периферии ствола дуги. После обрыва дуги давление в ее зоне падает и под действием разжиженной мастики или масла газовый пузырь заполняется продуктами горения. Диэлектрическая прочность в месте пробоя резко падает; создаются условия для повторного пробоя, и процесс начинается сначала.

По мере накопления в месте пробоя проводящих элементов электрическая прочность промежутка снижается, интервалы между повторными зажиганиями сокращаются, и дуга переходит к устойчивому горению. Таким образом, процесс горения заземляющей дуги, как в случае открытых, так и в случае закрытых дуг, не является стационарным, а имеет свои закономерности развития.



$$U_{Cmax} = U_{Bmax} = u_{CA}(t_1) + A_1 e^{-\delta \frac{\pi}{\omega_1}}$$

$$A_1 = u_{CA}(t_1) - u_{нач} = u_C(t_1) - u_A(t_1) - [u_C(t_1) - k u_A(t_1)] = u_A(t_1)(1 - k);$$

$$\omega_1 = 1 \sqrt{(L_H + L_H/2) \cdot 2(C'_0 + C'_{мф}) l} = 1/\sqrt{3L_H(C'_0 + C'_{мф}) l}.$$

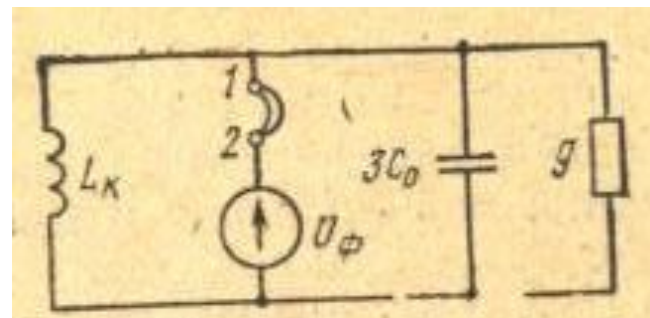
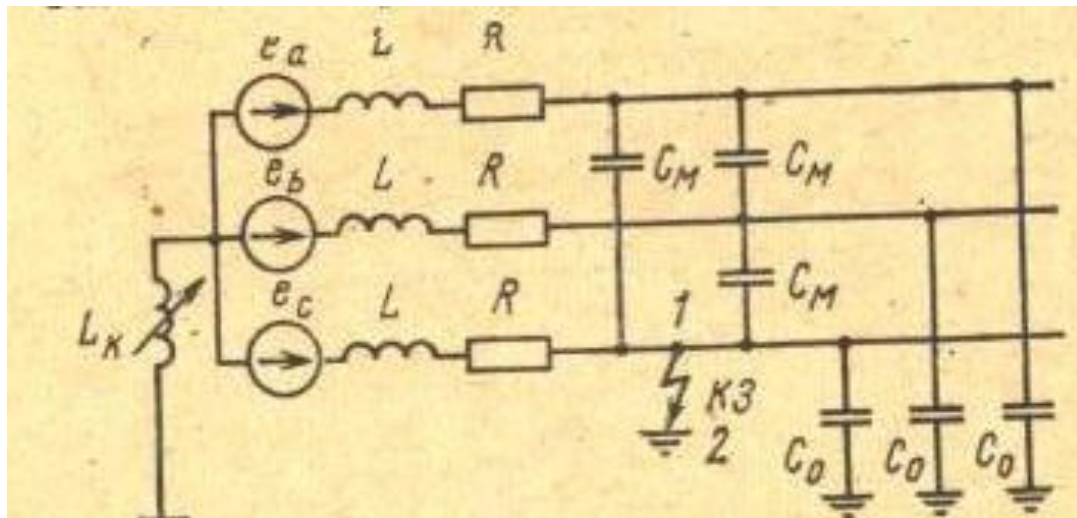
$$\Delta u = C'_0 (U_{Bmax} + U_{Cmax}) / (3C'_0)$$

$$\omega_2 = 1/\sqrt{L_{\text{н}}(C'_0 + 3C'_{\text{м}\phi})l}$$

$$U_{\text{п.г}} \approx 2A_2 = 2 \left[u_A(t_2) + \Delta u \right]$$

$$U_{\text{п.г}} = 2 \left(\Delta u - U_{\phi} \right)$$

Перенапряжения в сети с дугогасящим реактором

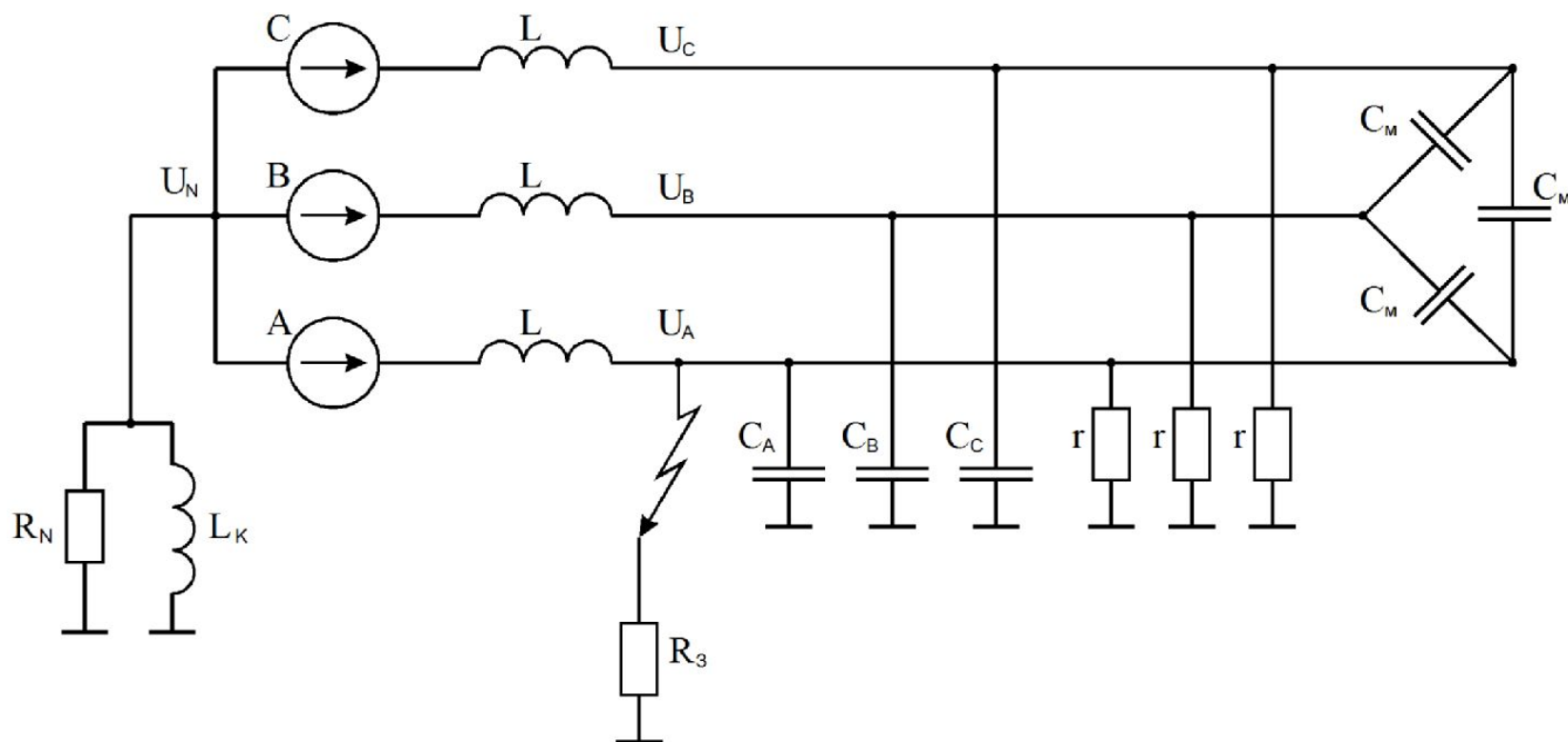


$$I_{\text{ост}} = \sqrt{I_a^2 + (I_C - I_K)^2} = \sqrt{I_a^2 + I_C^2 (1 - k_H)^2},$$

$$k_H = I_K / I_C = \frac{U_\phi / j\omega L}{U_\phi / 1 / j\omega 3C_0} = \frac{1}{\omega^2 L_K 3C_0} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$$

Такое гашение впервые было предложено В. Петерсеном в 1916 году.

В этом случае в нейтраль сети подключается регулируемая индуктивность – дугогасящий реактор - ДГР (катушка Петерсена) с целью компенсации емкостного тока замыкания на землю.



Если подобрать или отрегулировать индуктивность реактора L_K так, чтобы $X_{L_K} = X_C$, то в контуре нулевой последовательности возникает резонанс токов: емкостного и индуктивного

$$I_C = I_{3\text{емк}} = 3U_\Phi j\omega C_\Phi \qquad I_K = \frac{U_\Phi}{\omega L_K}$$

Учитывая сдвиг этих токов на 180° , получим для основной частоты в любой момент времени

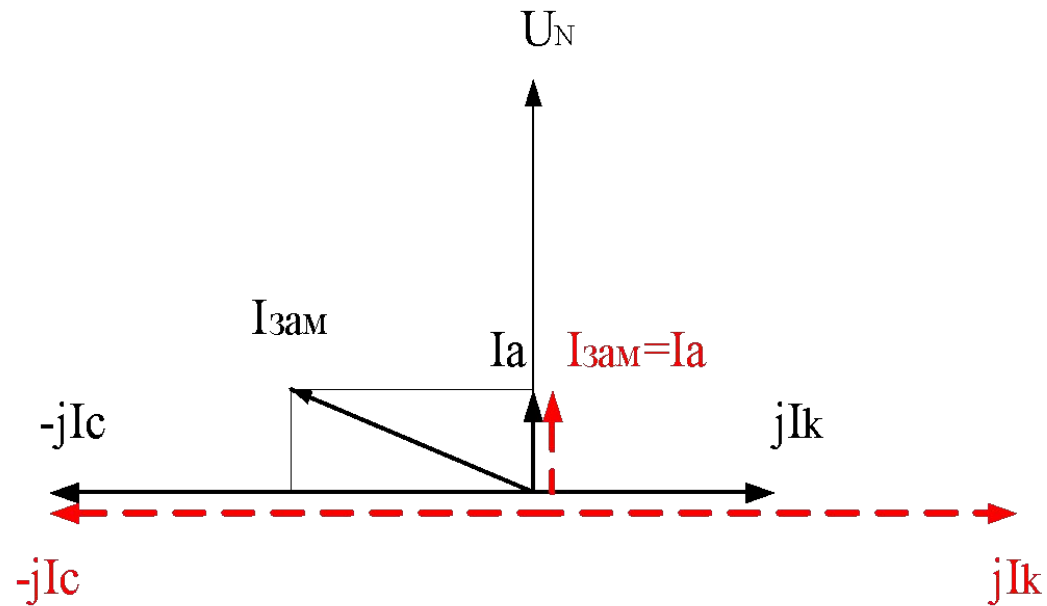
$$I_C^* = -I_K^*$$

ток через место повреждения резко снижается и дуга гаснет

В зависимости от соотношения токов $\overset{*}{I}_C$ и $\overset{*}{I}_K$ различают следующие режимы компенсации

- режим точной (острой или резонансной) настройки, при котором $|\overset{*}{I}_C| = |\overset{*}{I}_K|$
ток в месте замыкания чисто активный $\overset{*}{I}_3 = \overset{*}{I}_A$
- режим недокомпенсации, при котором $|\overset{*}{I}_C| > |\overset{*}{I}_K|$ через место замыкания протекает ток $\overset{*}{I}_3 = \overset{*}{I}_A + j(|\overset{*}{I}_C| - |\overset{*}{I}_K|)$
- режим перекомпенсации, при котором $|\overset{*}{I}_C| < |\overset{*}{I}_K|$ и через место замыкания протекает ток $\overset{*}{I}_3 = \overset{*}{I}_A - j(|\overset{*}{I}_K| - |\overset{*}{I}_C|)$

Векторная диаграмма токов для компенсированной сети



— Режим недокомпенсации

- - - Режим резонанса

РЗДПОМ



ASRC



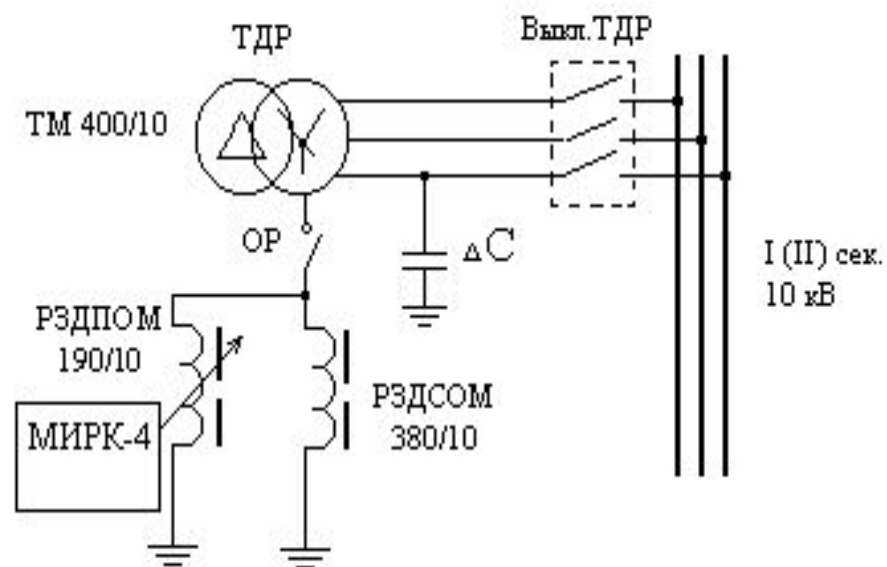
PYOM



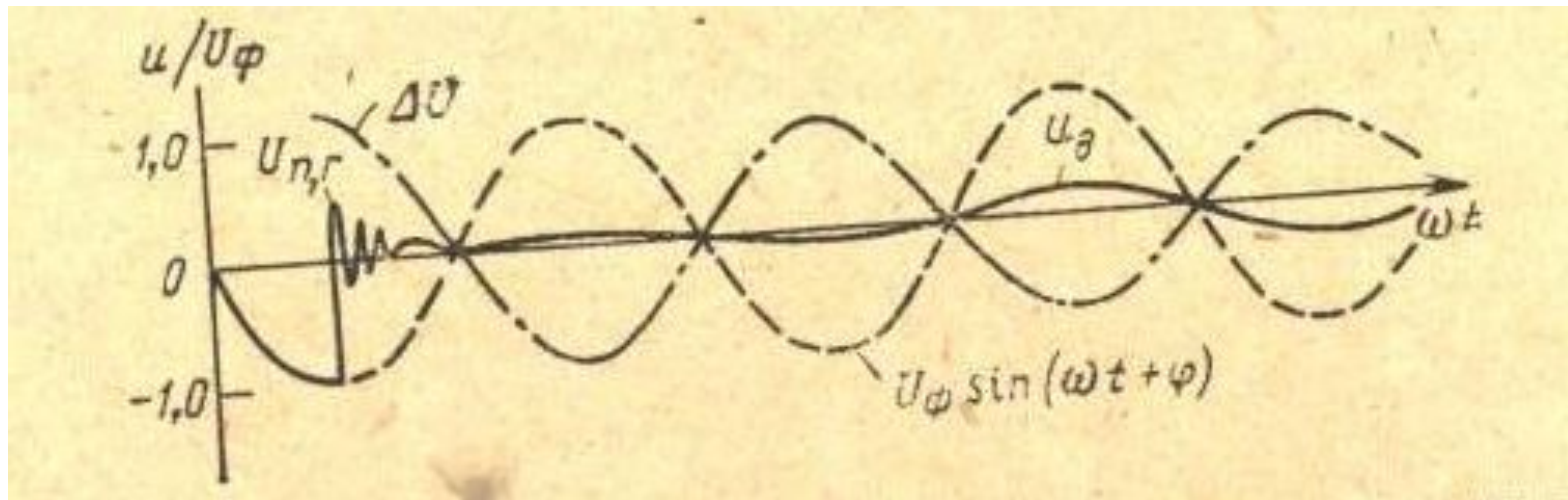
РДМР



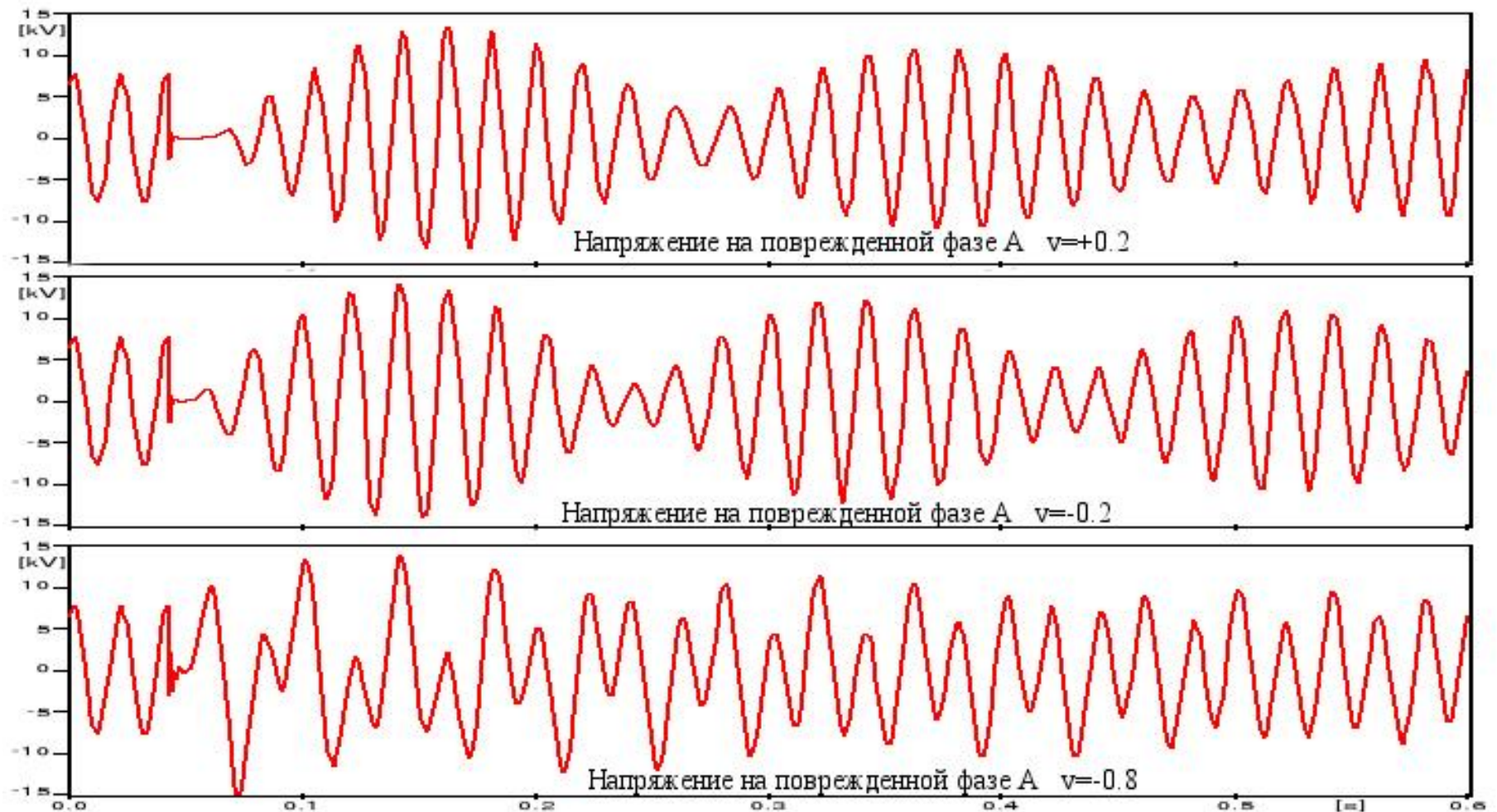
Внешний вид и схема подключения МИРК-4



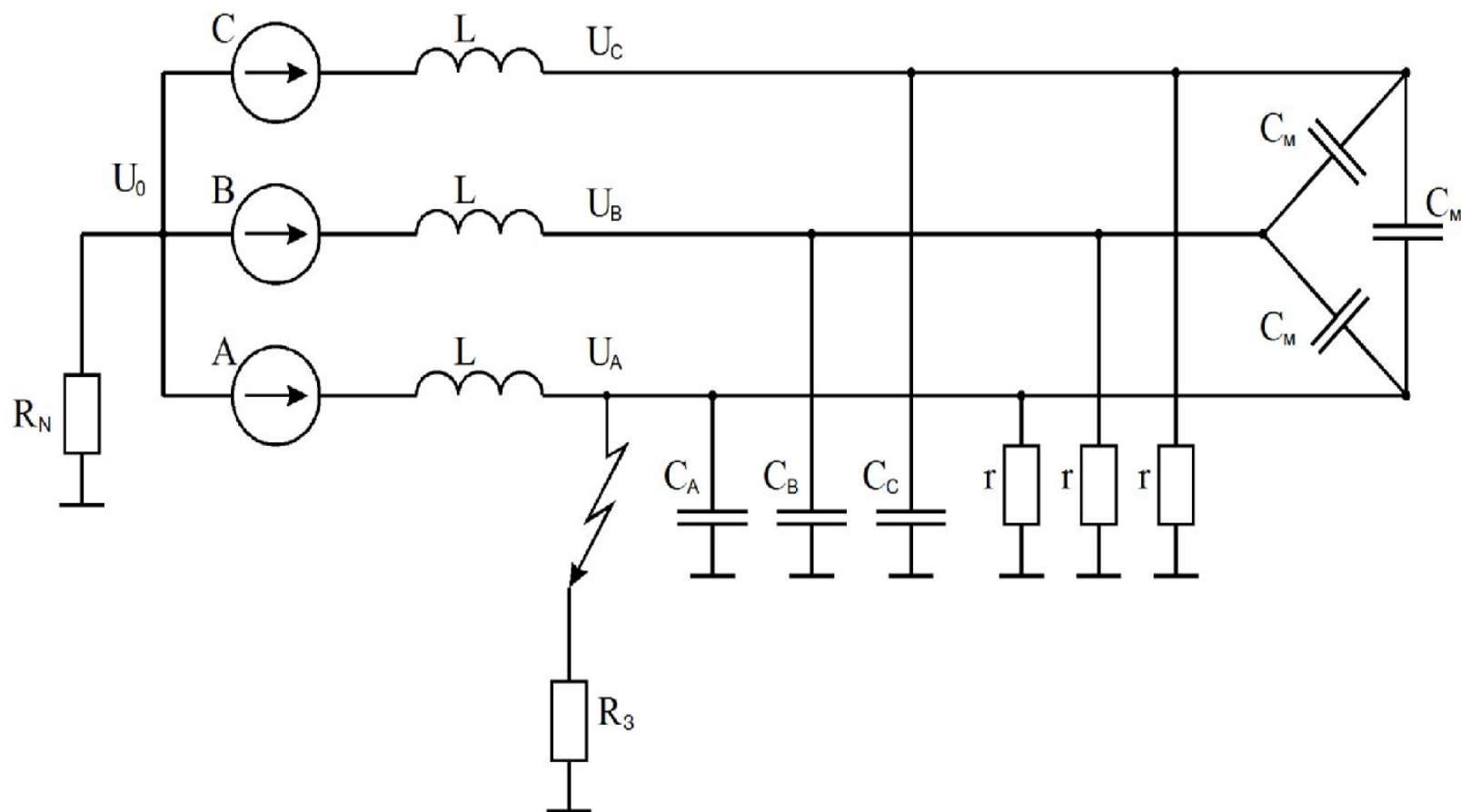
$$u_B(t) = U_\phi [\sin(\omega t + \varphi) - e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \varphi)],$$



Биения фазных напряжений при расстройках компенсации



Перенапряжения в сети с резистивным заземлением нейтрали



Заземление нейтрали сетей 6–35 кВ через резистор разрешено к применению ПУЭ России с 2003 года подразделяется на **ВЫСОКООМНОЕ** и **НИЗКООМНОЕ**

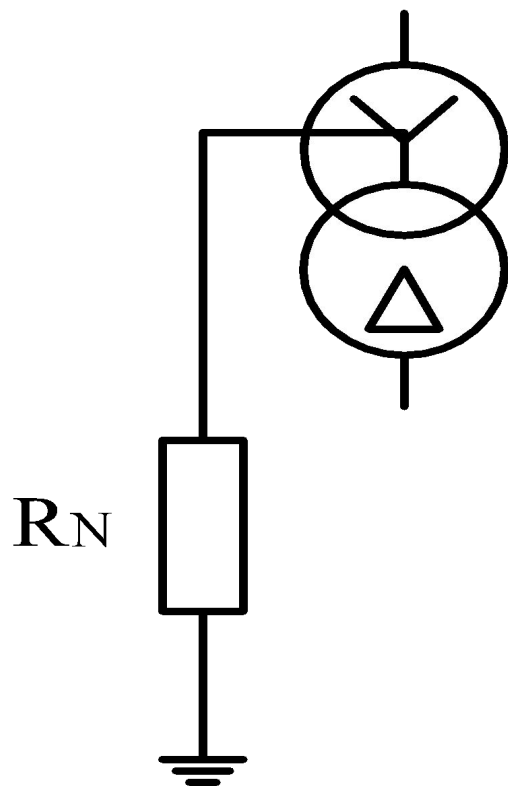
Резистор может включаться в контур нулевой последовательности с помощью заземляющего трансформатора с выведенной нейтралью обмотки высокого напряжения (ВН)

Подключение резистора может осуществляться как непосредственно между нулевой точкой обмотки ВН трансформатора и контуром заземления —

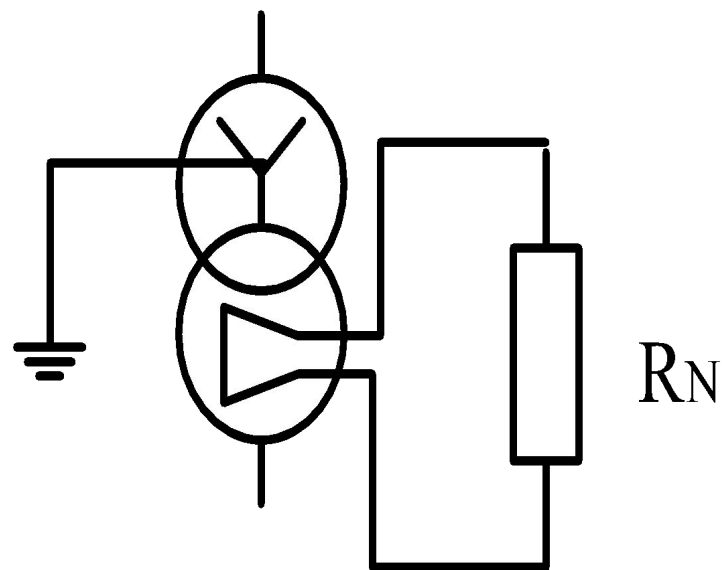
ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ,
так и через однофазный
присоединительный трансформатор -
НИЗКОВОЛЬТНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

Схемы подключения заземляющего резистора

Высоковольтный резистор



Низковольтный резистор



Выбор величины резистора

Высокоомное заземление

- Сопротивление высокоомного резистора выбирается из условия обеспечения полного разряда емкостей фаз за время около полупериода промышленной частоты

$$R_N = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}I_C}$$

U_{BH} – номинальное напряжение сети;

I_C – емкостной ток замыкания на землю

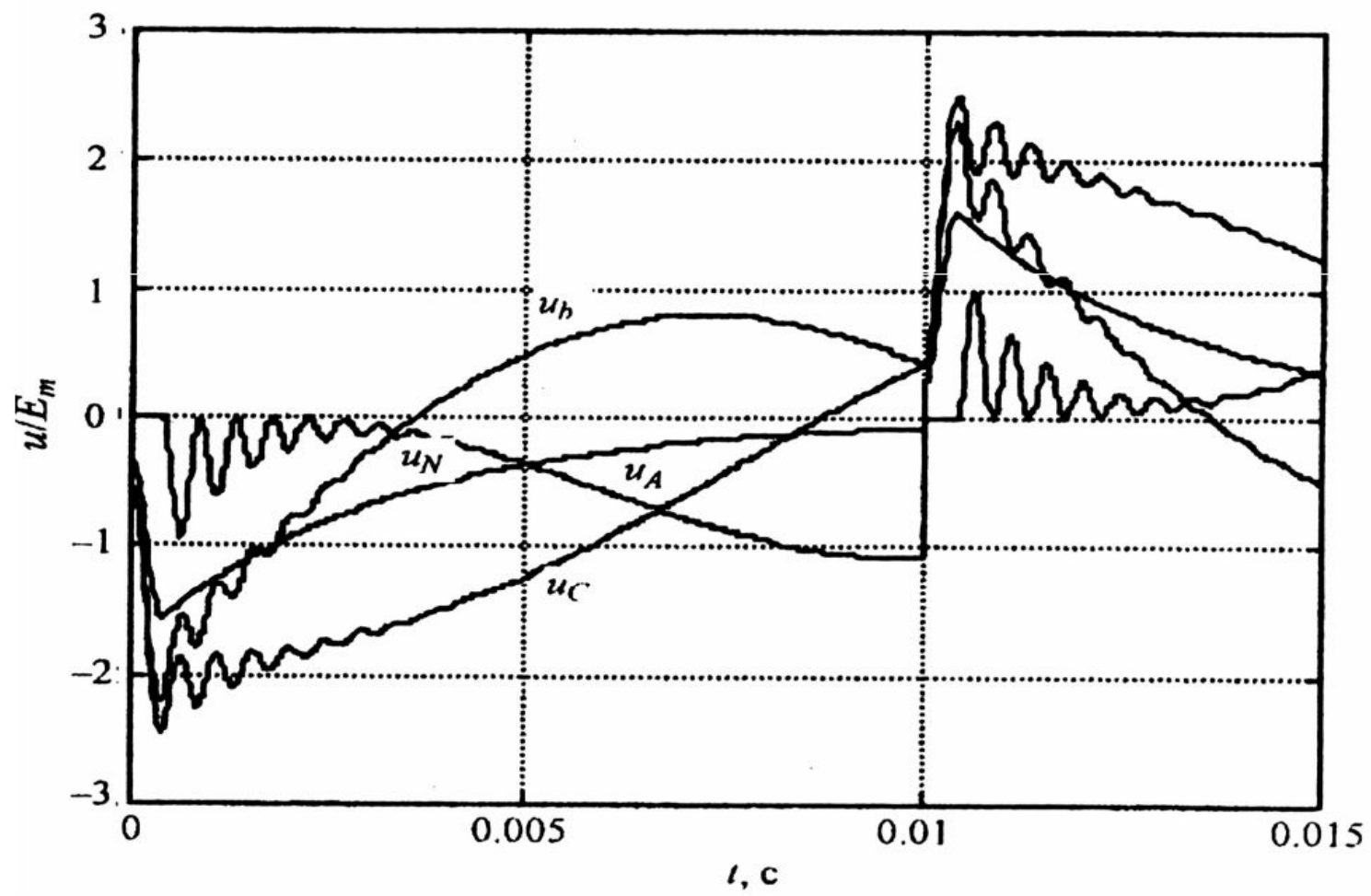
Низкоомное заземление

- При низкоомном заземлении нейтрали резистор выбирается из следующих соображений:
- -ограничение дуговых перенапряжений до уровня $2,4-2,5 U_{фм}$;
- обеспечения селективности действия РЗЗ

$$R_N = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}I_{C33max}}$$

I_{C33max} – максимальный ток срабатывания защиты от замыканий на землю

Сопротивление резистора в низковольтных вариантах подключения должно быть пересчитано к номинальному напряжению ступени низкого напряжения (НН) присоединительного трансформатора или обмотки НН броневого трансформатора.



Резисторы NER 6-35 кВ (ООО ЭНЕРГАН)



Устройства резистивного заземления нейтрали NERC сетей 3-35 кВ

Устройства резистивного заземления нейтрали предназначены для организации резистивного заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ, в которых нейтральная точка отсутствует (обмотки 6-10 кВ силового питающего трансформатора соединены в треугольник).



Устройство резистивного заземления нейтрали NERC представляет собой шкаф из нержавеющей стали, в котором размещены трансформатор вывода нейтрали (фильтр нулевой последовательности с обмотками 6-10 кВ с сухой изоляцией, соединенными в зигзаг), высоковольтный резистор и трансформатор тока. Шкаф имеет съемные опорные катки для перемещения. Ввод кабеля в шкаф выполняется снизу через сальники (возможно другое исполнение).

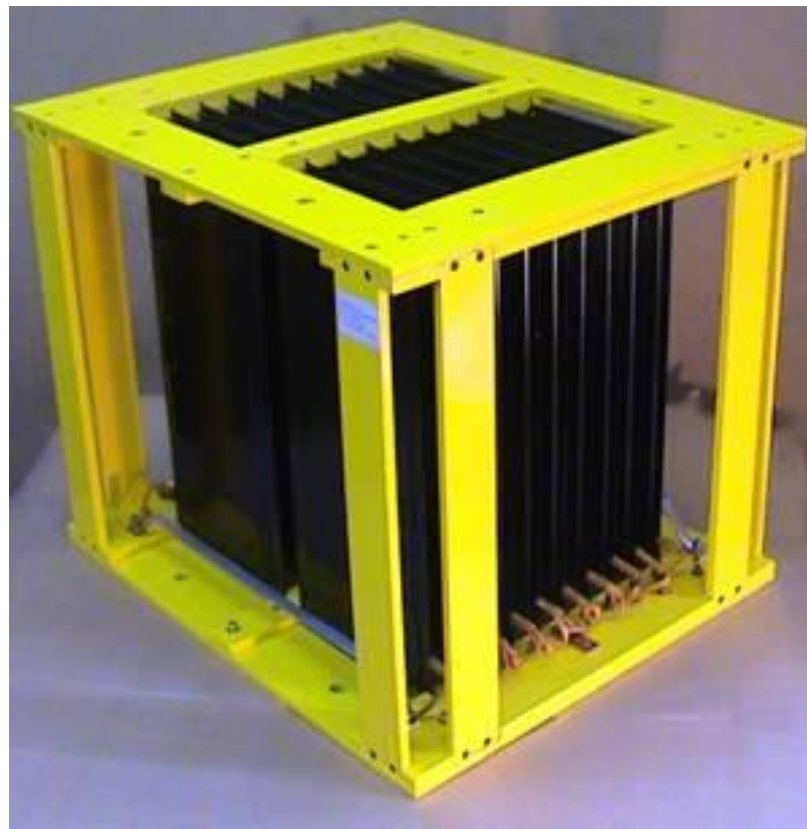
Устройство резистивного заземления нейтрали NERC подключается к сети через линейную ячейку КРУ 6-10 кВ со стандартным набором релейных защит (МТЗ, отсечка, защита от замыканий на землю).

РЕЗИСТОР ДЛЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ПНП БОЛИД



НИЗКООМНЫЙ РЕЗИСТОР ДЛЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

Для ограничения перенапряжений в сетях собственных нужд электростанций напряжением 3, 6, 10 кВ выпускаются резисторы типа РЗ номиналом 50-300 Ом. Эти резисторы предназначены для установки в шкафах КРУ, длительность их работы в режиме ОЗЗ ограничена и определяется быстродайствием релейной защиты.



Ограничение коммутационных перенапряжений

Защита от коммутационных перенапряжений основана на следующих принципах:

- на ограничении числа режимов, в которых могут возникать опасные перенапряжения, с помощью схемных мероприятий;

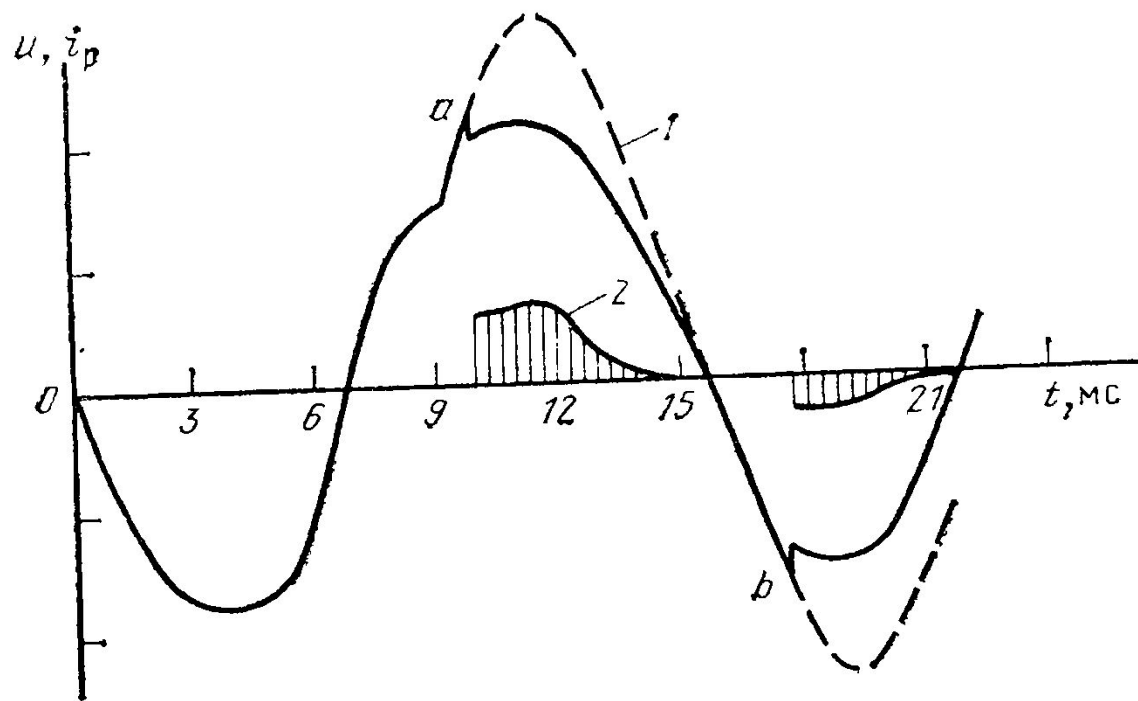
- на ограничении амплитуд установившихся перенапряжений, что приводит также и к снижению перенапряжений переходного процесса;

- на ограничении амплитуд коммутационных перенапряжений с помощью вентильных разрядников или встроенных в выключатели шунтирующих сопротивлений.

Меньшие значения перенапряжений можно получить подбором благоприятных начальных значений переходного процесса, при которых амплитуды свободных колебаний имеют минимальные значения (например, ускорение стекания заряда с линии в паузу АПВ или управление моментом включения выключателя, программированное управление работой выключателей).

К схемным мероприятиям, способствующим снижению амплитуд коммутационных перенапряжений, следует отнести установку при включении линии пониженных коэффициентов трансформации силовых трансформаторов, подключение линии сначала к более мощным шинам, предварительное до коммутации линии подключение реакторов поперечной компенсации на высшем и среднем (или третьем) напряжениях.

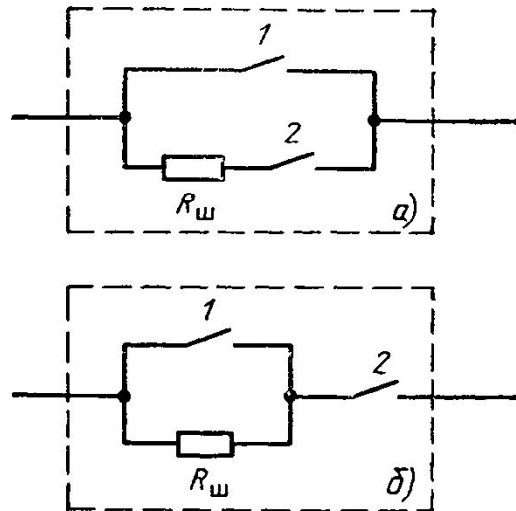
С помощью вентиляных разрядников



Напряжение, при котором повторные пробои больше не происходят, должно быть меньше напряжения гашения $U_{\text{гаш}}$. Срабатывания разрядника должны прекратиться после затухания переходного процесса, но установившееся напряжение $U_{\text{уст}}$ может значительно превышать фазное напряжение за счет емкостного эффекта или несимметрии. Поэтому напряжение гашения коммутационных разрядников должно быть значительно выше, чем у грозозащитных разрядников, а коэффициент $k_{\text{гаш}} = U_{\text{пр}}/U_{\text{гаш}}$ должен быть значительно ниже. Например, для разрядника РВМК-500-П коэффициент гашения $k_{\text{гаш}} = 1,25$, что обеспечивает при пробивном напряжении $(2,4 \div 2,5) U_{\text{ф}}$ напряжение гашения $U_{\text{гаш}} = (1,9 \div 2,0) U_{\text{ф}}$. Так как при обрыве дуги в разряднике происходит повышение напряжения, то допустимое установившееся напряжение должно быть на 10—15 % меньше $U_{\text{гаш}}$, что обеспечивает надежное гашение дуги искровым промежутком. Для линий различного номинального напряжения должно выполняться следующее:

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	500	750	1150
$U_{\text{пр}}/U_{\text{ф}}$	2,5	2,1	1,8
$U_{\text{уст}}/U_{\text{ф}}$	1,75	1,45	1,25

2. С помощью выключателей с шунтирующими резисторами



Благоприятное действие шунтирующих резисторов состоит в демпфировании свободных колебаний напряжения во время включения ненагруженной линии и в уменьшении остаточного заряда на линии при отключении ненагруженной линии или АПВ. Требования к значениям сопротивлений шунтирующих резисторов оказываются различными в зависимости от вида коммутации.

Включение ненагруженной линии. При подключении линии к источнику с нулевым внутренним сопротивлением через активное сопротивление резистора, равное волновому $R_{ш} = Z_c = \sqrt{L'/C'}$, колебательный процесс практически отсутствует, поскольку нет отражений от начала линии.

Отключение ненагруженной линии. Оптимальным при отключении разомкнутой линии является случай, когда нет повторных пробоев, приводящих к опасным перенапряжениям. Поэтому задачей, возлагаемой в этой коммутации на шунтирующее сопротивление, является не демпфирование свободных колебаний при повторных пробоях, а уменьшение восстанавливающегося напряжения до значения, при котором практически не наблюдается повторных пробоев. Последнее достигается тем, что сопротивление $R_{ш}$ берется близким к значению модуля входного сопротивления линии, т.е. создаются условия аperiodического процесса.

При длине линии 200 км это составляет 3000—4000 Ом. На практике используется сопротивление $R_{ш} = 3000$ Ом.

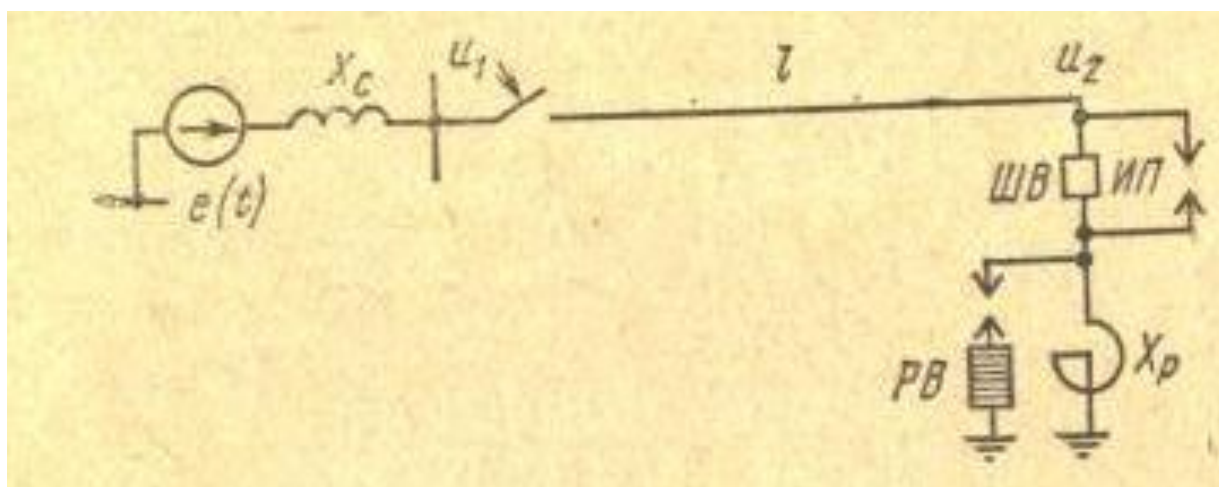


Таблица 19.4. Значения перенапряжений в линиях с реакторами

$U_{y, max}/U_{ф, max}$		$U_{max}/U_{ф, max}$	
при отсутствии реактора	при наличии реактора	глухое присоединение	искровое присоединение
1,5	1,3	1,81	1,92
1,9	1,6	2,83	2,92

пряжения.

Управление моментом включения выключателя. Значение перенапряжений, возникающих при включении линии, зависит от фазы ЭДС φ в момент включения. Для каждой частоты свободных колебаний электропередачи можно указать такой угол включения, когда возникающее перенапряжение будет минимально. Исключение представляет только случай резонанса ($\omega = \omega_1$), когда при любой фазе включения коэффициент $k_{уд} = 1$.

- Сопротивление высокоомного резистора выбирается из условия обеспечения полного разряда емкостей фаз за время около полупериода промышленной частоты

