

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ.

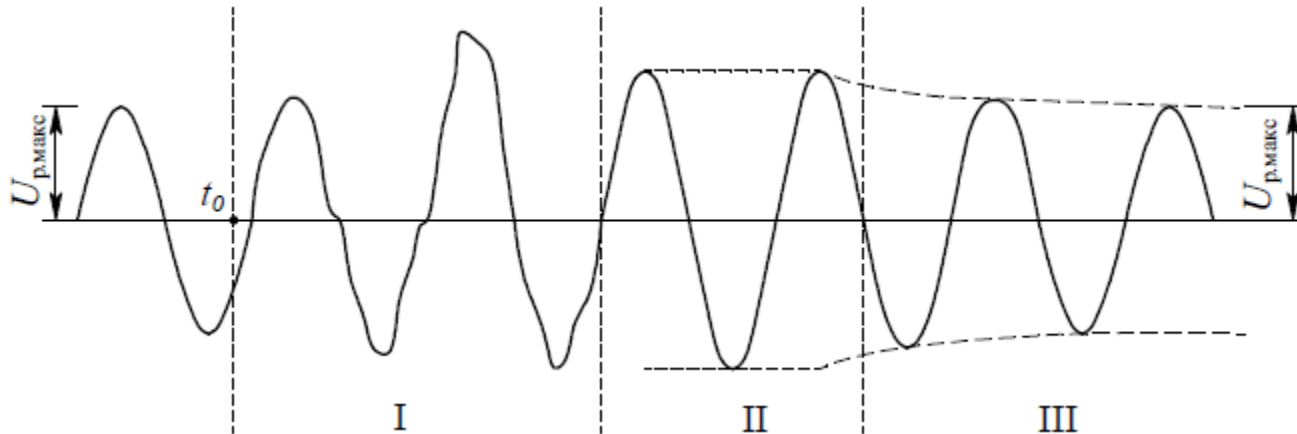
**Перенапряжения и защита от
НИХ**

<http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/s/SOLO/learn/Tab2>

Классификация перенапряжений



*Вид напряжения сети при появлении внутренних перенапряжений:
 t_0 — момент коммутации*



Осуществляется принудительное ограничение перенапряжений до уровней

30 кВ - $K_{\Pi} = 2,7$

500 кВ - $K_{\Pi} = 2,5$

750 кВ - $K_{\Pi} = 2,2$

1150 кВ - $K_{\Pi} = 1,8$

Ограничение перенапряжений осуществляется:

- защитными разрядниками (РЗ),
- трубчатыми разрядниками (РТ),
- вентильными разрядниками (РВ),
- нелинейными ограничителями перенапряжений (ОПН),
- схемными решениями (реакторы, конденсаторы, сопротивления активные и др.).

Атмосферные перенапряжения и грозозащита

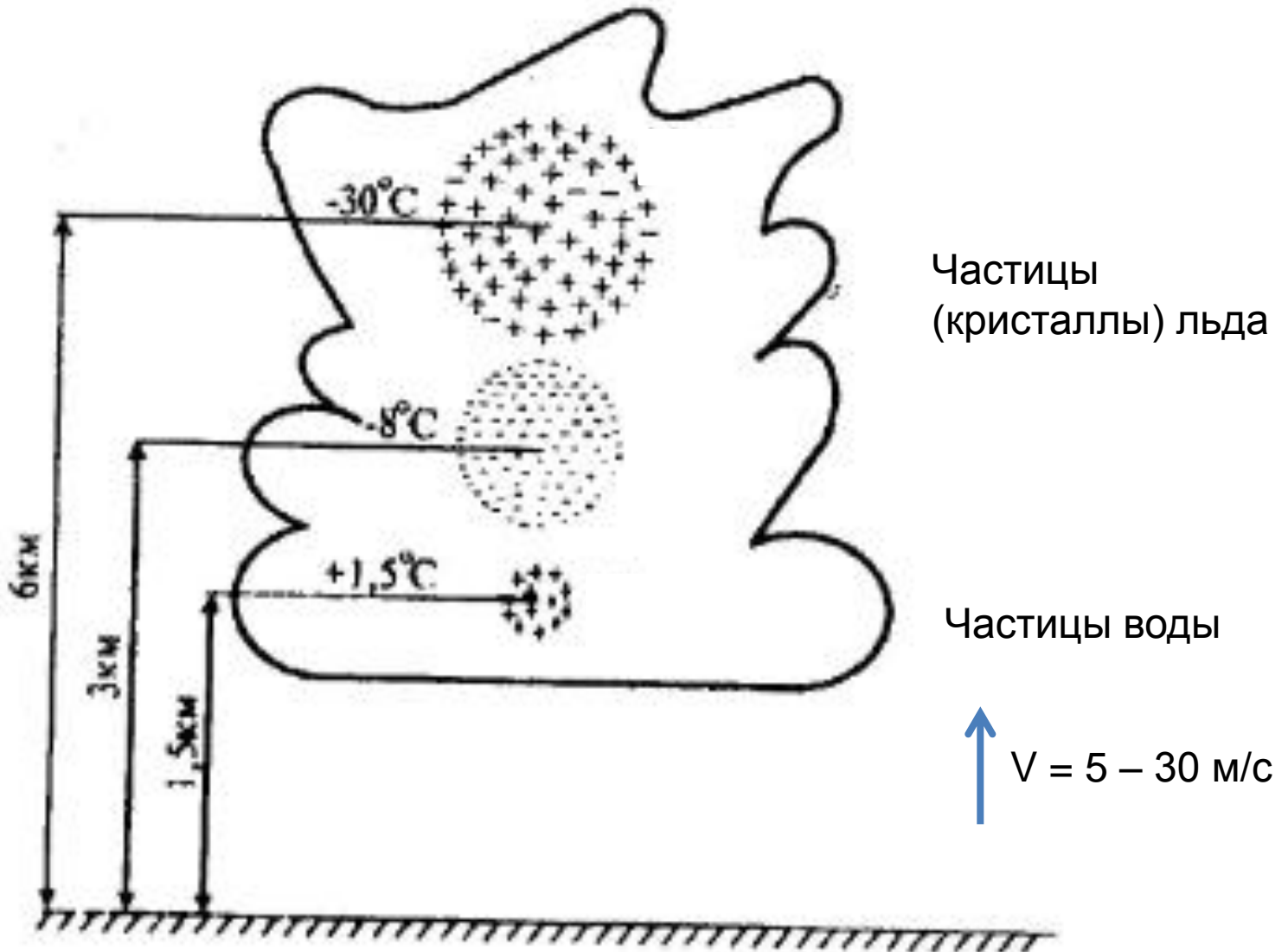
Разряд молнии и его основные параметры

Генератором молний являются грозовые облака, в которых происходит разделение положительных и отрицательных зарядов.

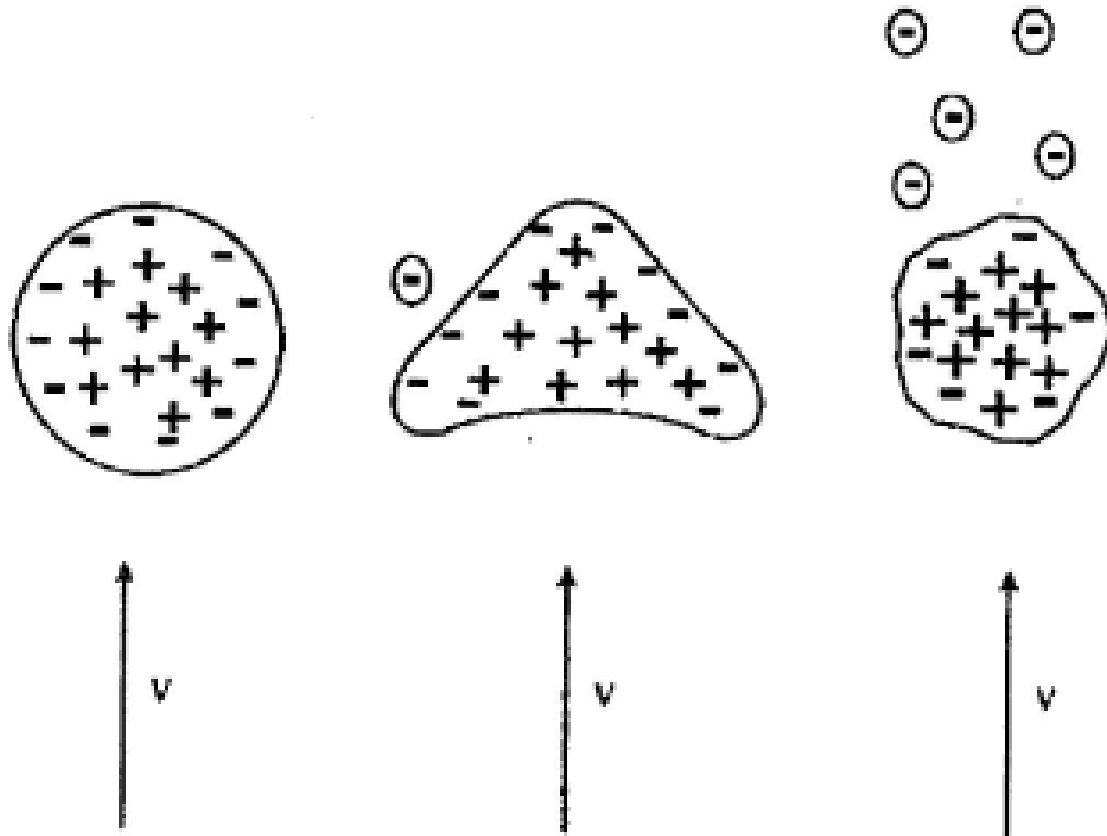
Появление разрядов молний сопровождаются электромагнитными, тепловыми и электродинамическими воздействиями на объекты, находящиеся в зоне их влияния или непосредственно поражаемые ими.

По данным спутниковых наблюдений на земле одновременно существует около 3 000 грозовых очагов и каждую секунду поверхность молнии поражается 100 ударами молний.

Структура грозового облака

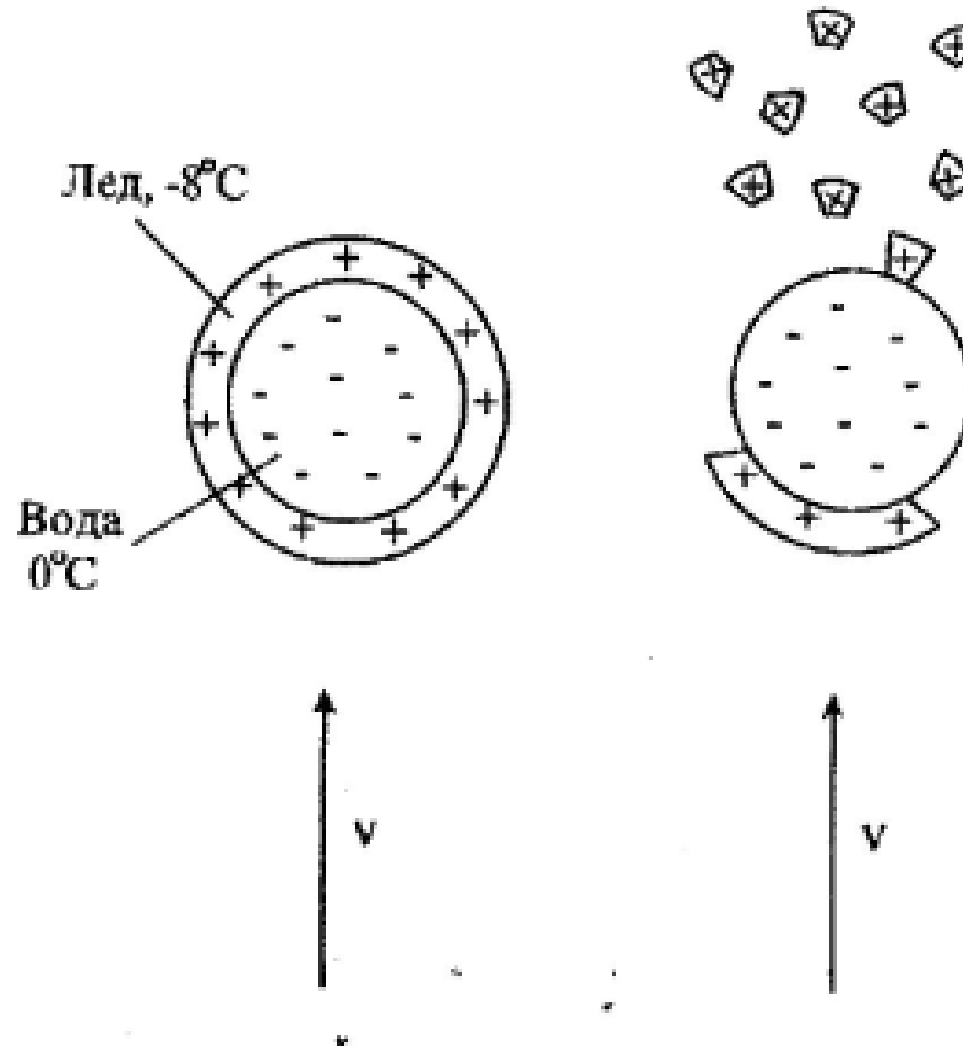


Процесс разделения зарядов при положительных температурах

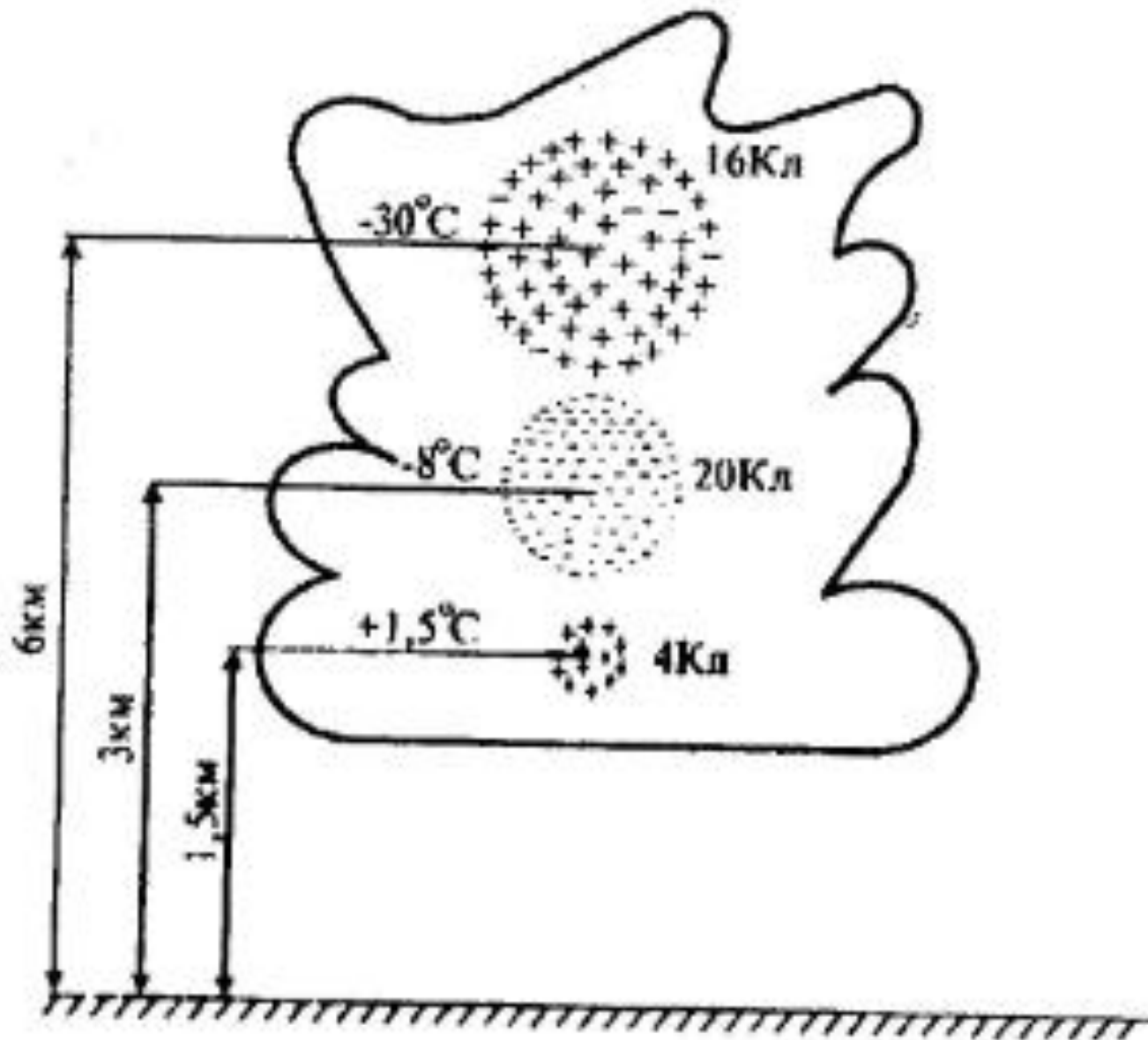


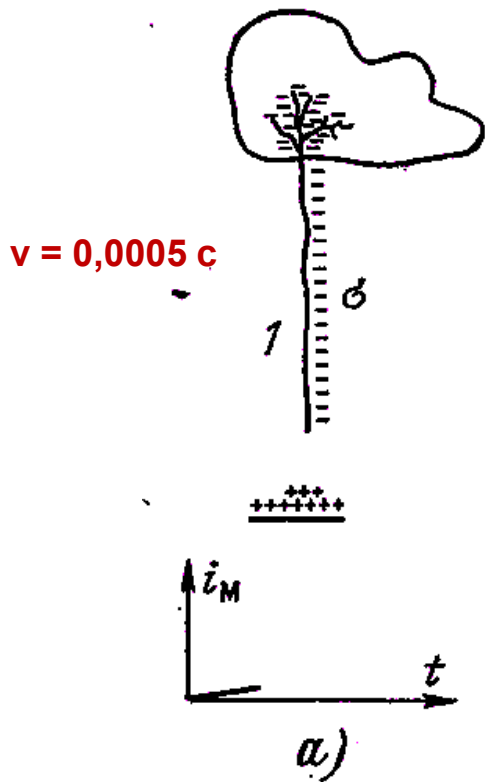
$V > 8 \text{ м/с}$

Процесс разделения зарядов при отрицательных температурах



Структура грозового облака

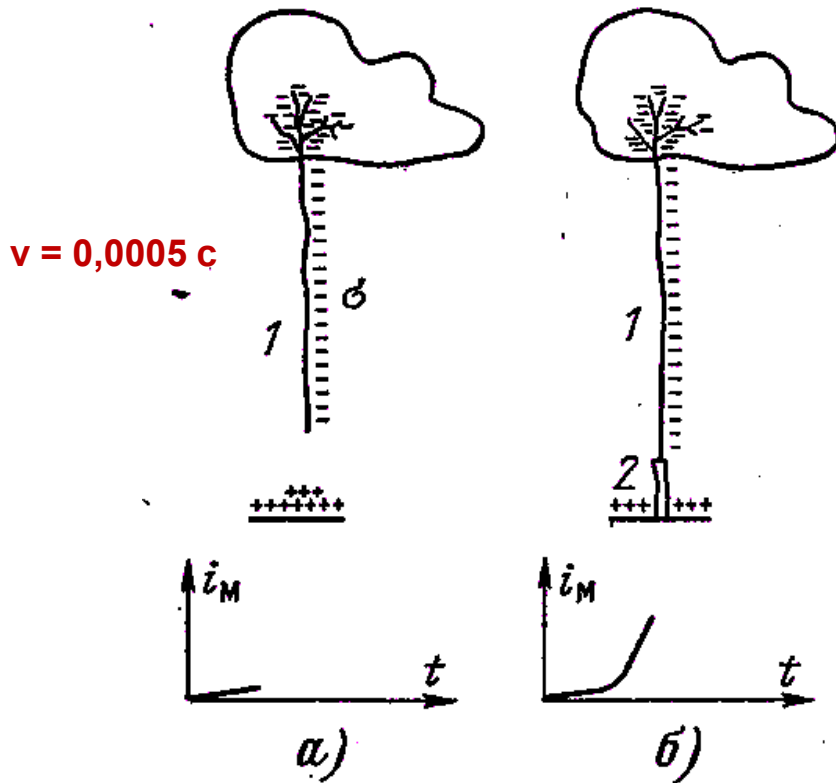




Отдельные стадии развития обратного разряда и изменение во времени тока молнии.

a — последняя стадия лидерного разряда;

1 — канал лидера;

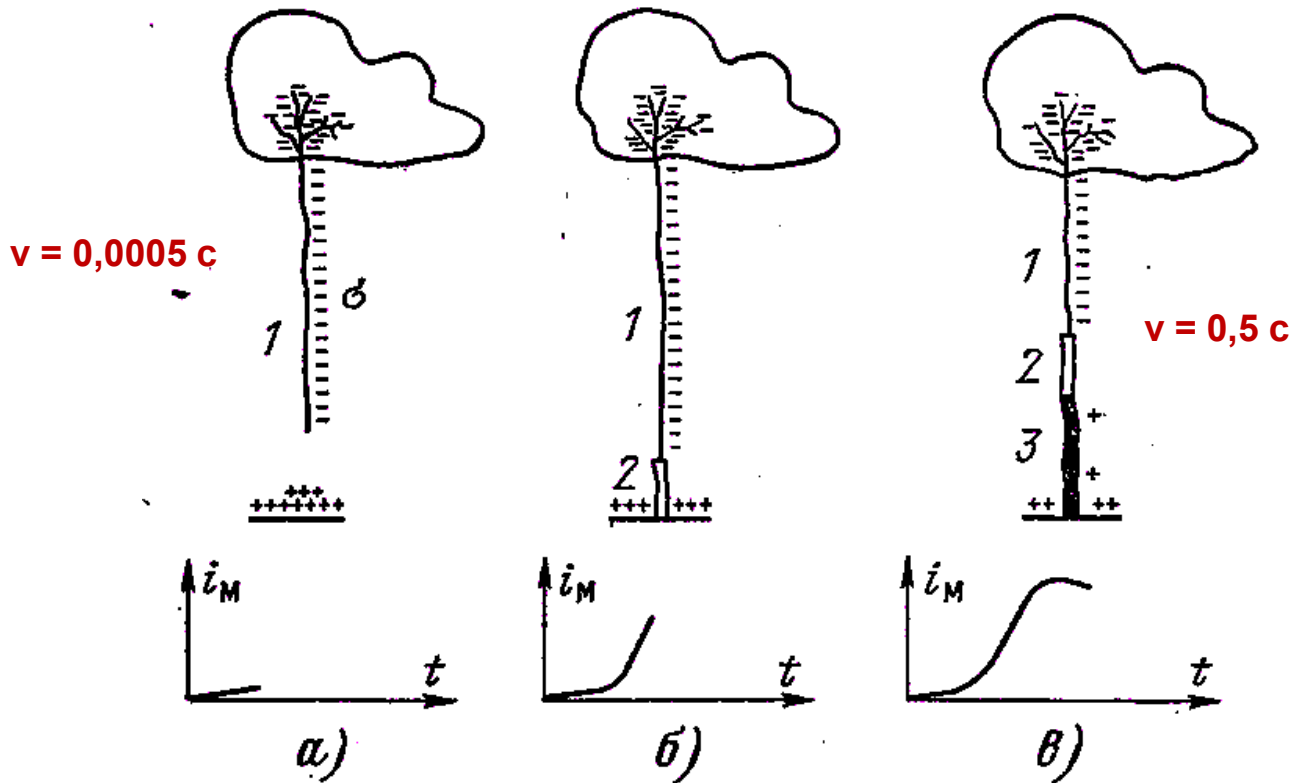


Отдельные стадии развития обратного разряда и изменение во времени тока молнии.

а — последняя стадия лидерного разряда;

б — возникновение зоны интенсивной ионизации вблизи поверхности земли;

1 — канал лидера; 2 — зона перестройки канала;



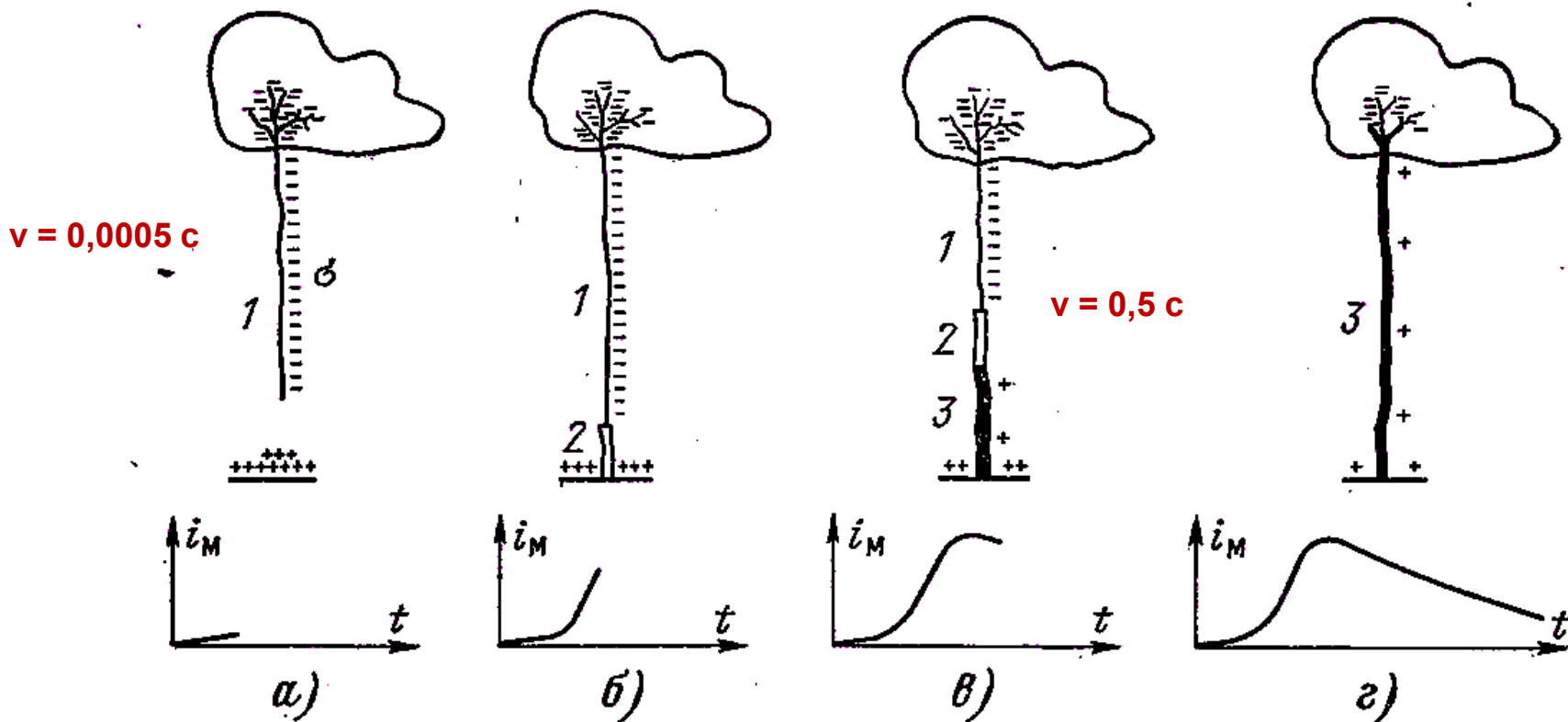
Отдельные стадии развития обратного разряда и изменение во времени тока молнии.

а — последняя стадия лидерного разряда;

б — возникновение зоны интенсивной ионизации вблизи поверхности земли;

в — промежуточная стадия развития обратного разряда;

1 — канал лидера; 2 — зона перестройки канала; 3 — канал обратного разряда.



Отдельные стадии развития обратного разряда и изменение во времени тока молнии.

а — последняя стадия лидерного разряда;

б — возникновение зоны интенсивной ионизации вблизи поверхности земли;

в — промежуточная стадия развития обратного разряда;

г — заключительная стадия развития обратного разряда;

1 — канал лидера; 2 — зона перестройки канала; 3 — канал обратного разряда.

В грозовом облаке часто образуется не одна область концентрации зарядов, а несколько. Как правило, они располагаются на разной высоте.

После нейтрализации заряда в нижней части облака становится возможным разряд из следующей по высоте области концентрации зарядов.

Лидер повторного разряда называется **стреловидным лидером** и развивается он по ионизированному пути, проложенному первым лидером (скорость развития разряда выше, развивается непрерывно, далее главный разряд).

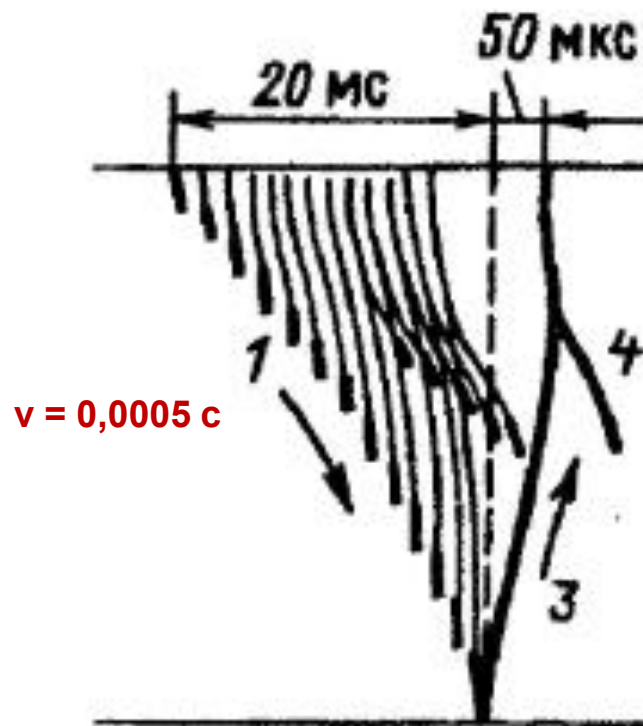


Схема развития многокомпонентной молнии:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1) Ступенчатый лидер | 2) Стреловидный лидер |
| 3) Главный разряд | 4) Ветвь |

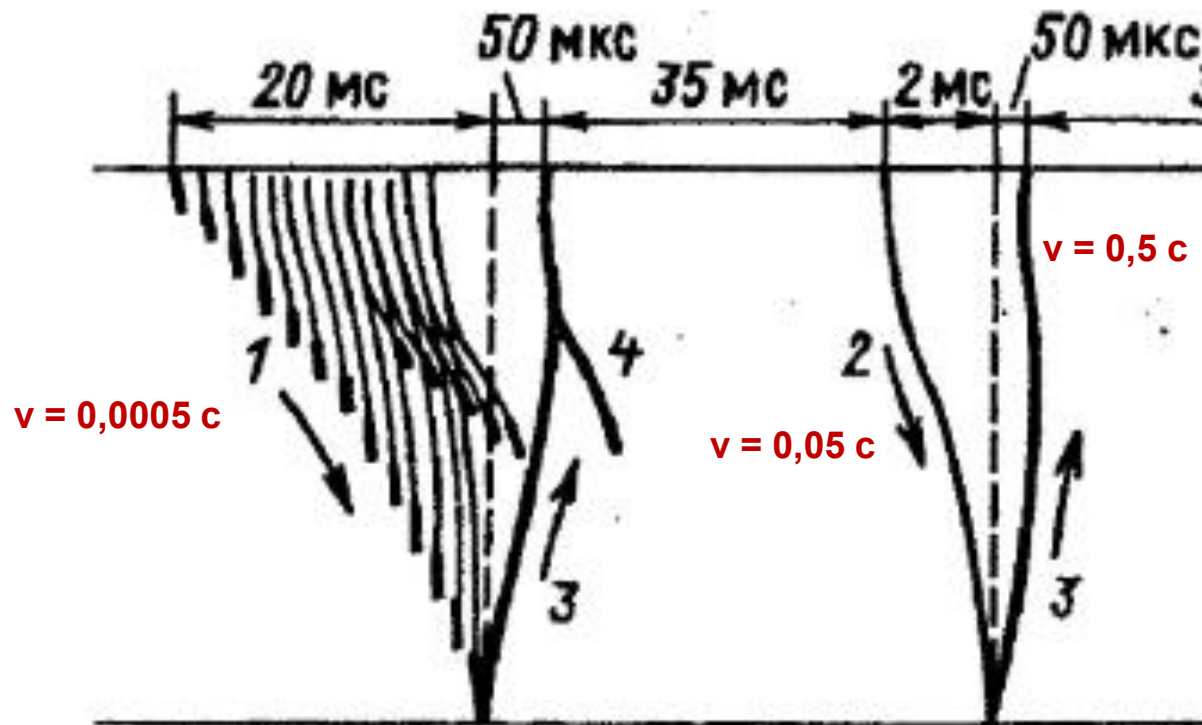


Схема развития многокомпонентной молнии:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1) Ступенчатый лидер | 2) Стреловидный лидер |
| 3) Главный разряд | 4) Ветвь |

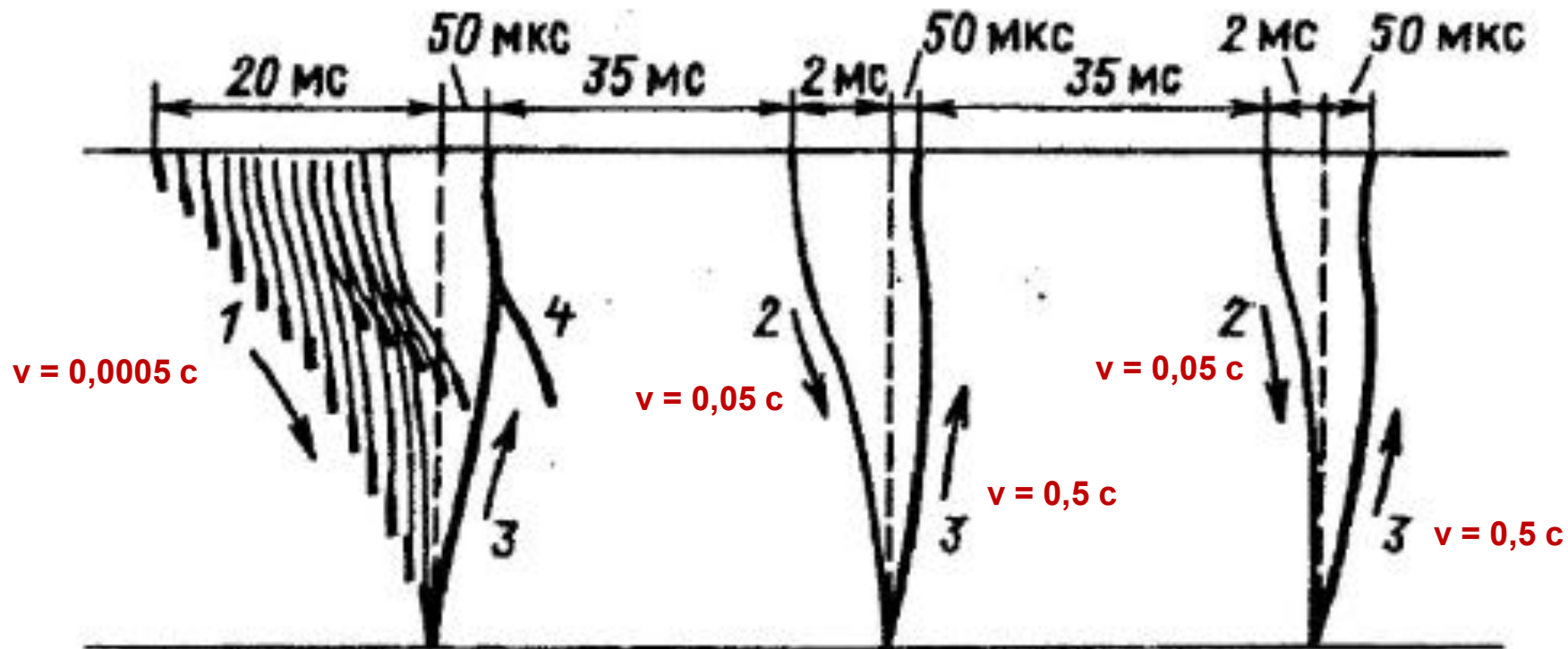


Схема развития многокомпонентной молнии:

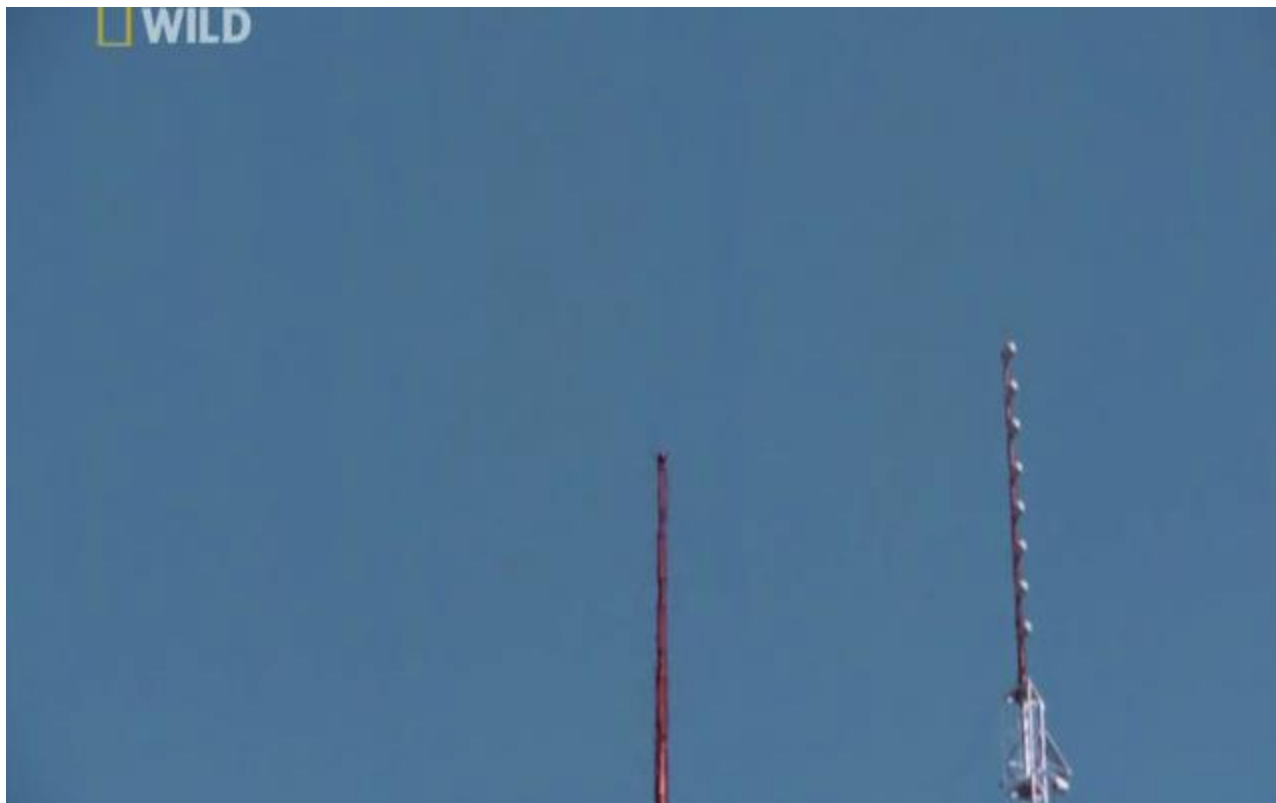
- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1) Ступенчатый лидер | 2) Стреловидный лидер |
| 3) Главный разряд | 4) Ветвь |

Максимальная зарегистрированная многокомпонентная молния – до 1,5 сек.

Развитие разряда молнии
(видеосъемка 1 000 кадров /сек и 11 000 кадров/сек)

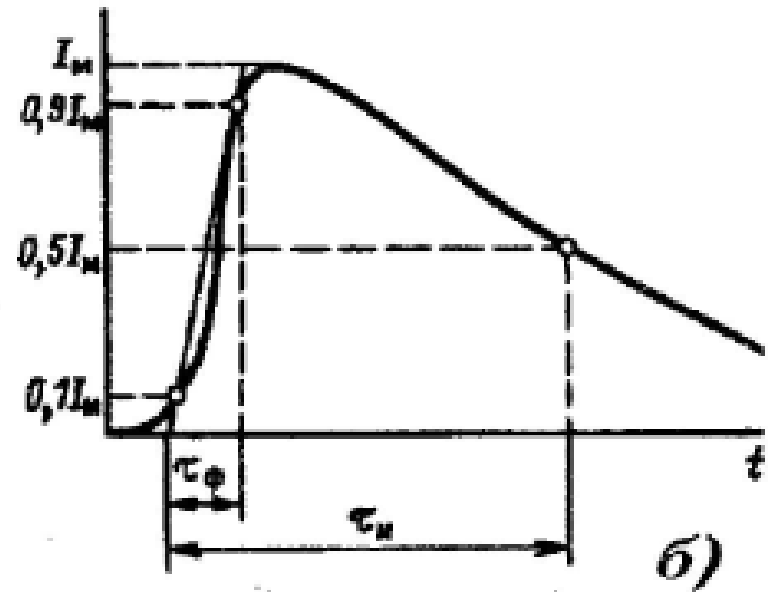
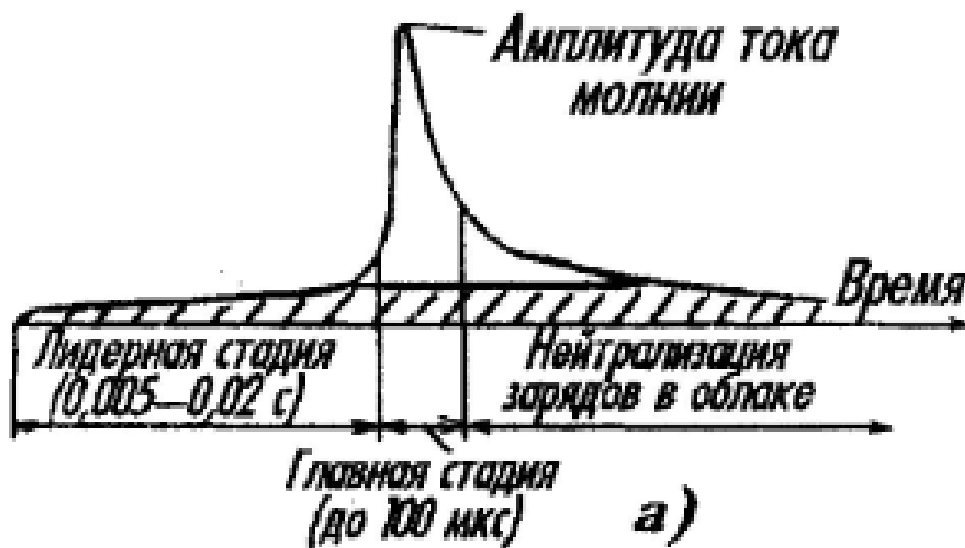


Развитие восходящей молнии



Основные параметры молнии

$$I_m \quad a_m = \frac{di_m}{dt} \approx \frac{I_m}{t_\phi}$$



а) Упрощенная осциллограмма тока молнии

б) Определение параметров тока главного разряда

Параметры разрядов молнии

Параметры	Наиболее часто встречающиеся значения	Зарегистрированное значение	
		наибольшее	наименьшее
Полярность	до 80% отрицательная	—	—
Токи молнии (амплитудные значения), зарегистрированные в опорах, кА	до 20	200–300	0,5
Заряд, переносимый молнией, Кл	до 20	100	0,5
Длительность импульса тока молнии, мкс	10–30	100	менее 10
Длительность фронта импульса тока молнии, мкс	1,5–10	80–90	менее 1
Крутизна фронта импульса тока молнии, А/мкс	5000	50 000	—
Количество импульсов в разряде	2–3	20	1
Продолжительность разряда молнии, с	0,2–0,6	1,33	—

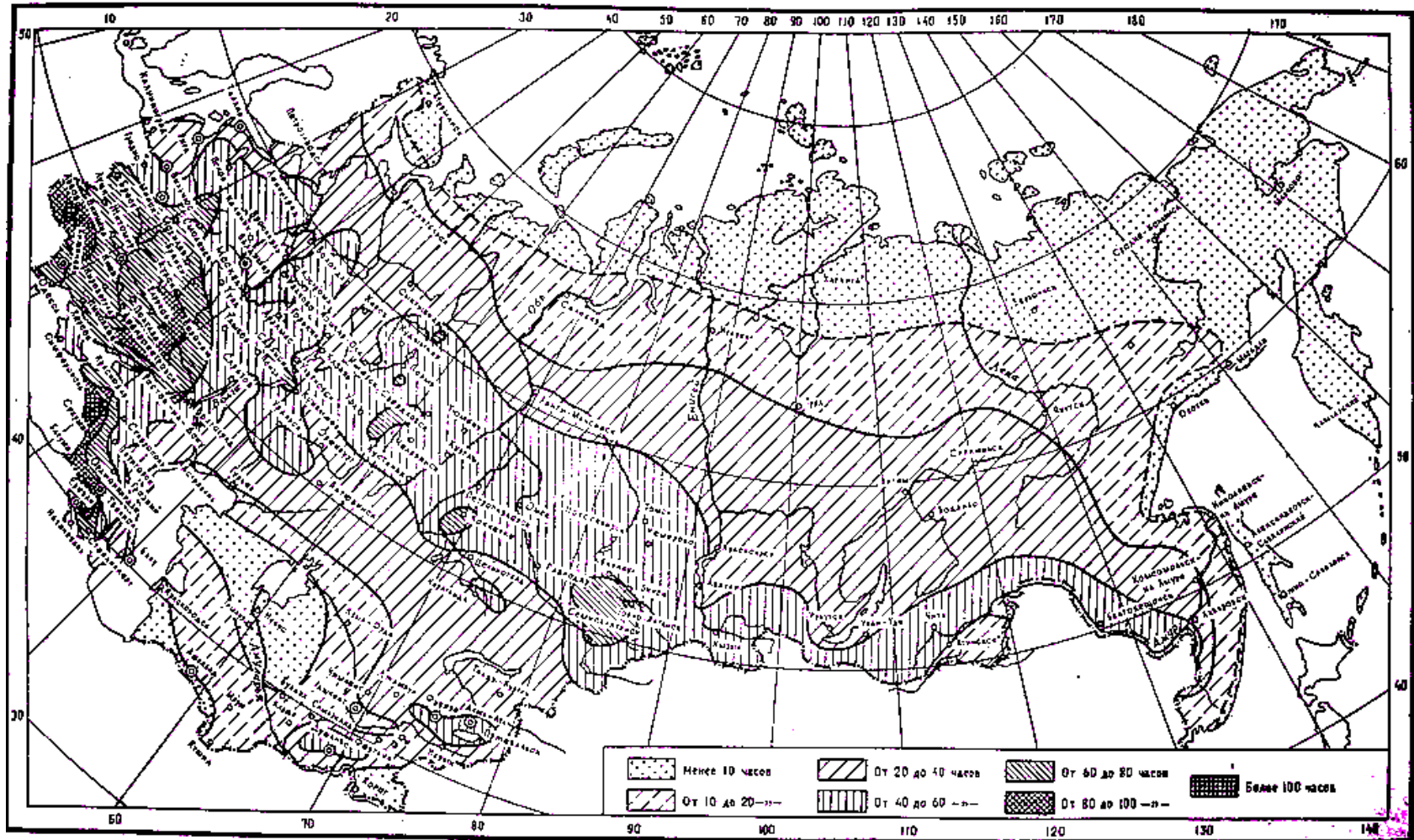
$$P(I_m) = e^{-0,03 \cdot I_m}$$

$$P(a_m) = e^{-0,06 \cdot a_m}$$

***Среднегодовая продолжительность гроз
на территории России***

Район	Среднее число гро- зовых часов в году
Мурманск, Нарьян-Мар, Хатанга, Верхоянск, Магадан, Сахалин, Камчатка	менее 10
Архангельск, Салехард, Игарка, Якутск, Владивосток	10—20
С.-Петербург, Петрозаводск, Москва, Вологда, Сык- тывкар, Вятка, Астрахань, Оренбург, Ханты-Мансийск, Красноярск, Иркутск, Бодайбо, Хабаровск	20—40
Искон, Новгород, Калуга, Кострома, Арзамас, Нижний Новгород, Тамбов, Пенза, Волгоград, Ставрополь, Уфа, Екатеринбург, Тюмень, Омск, Барнаул, Чита, Благо- вещенск	40—60
Орел, Воронеж, Самара, Горно-Алтайск, Краснодар, Пятикавказ	60—80
Курск, Белгород, Майкоп	80—100
Красная Поляна, Сочи	более 100

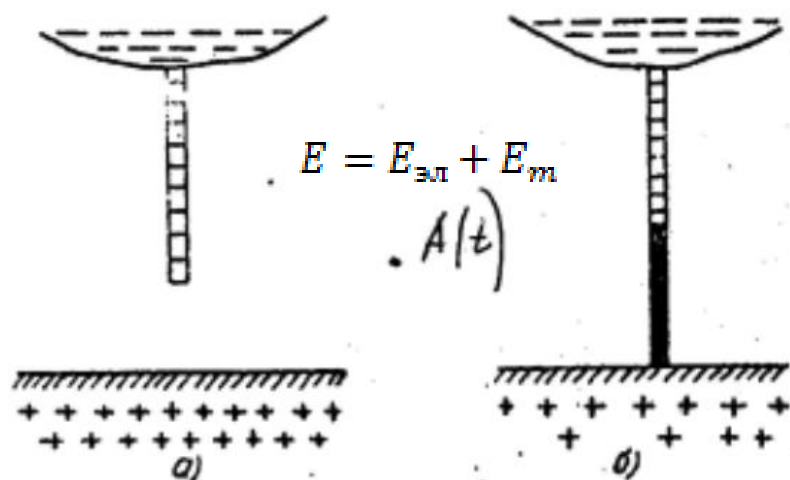
Карта интенсивности грозовой деятельности



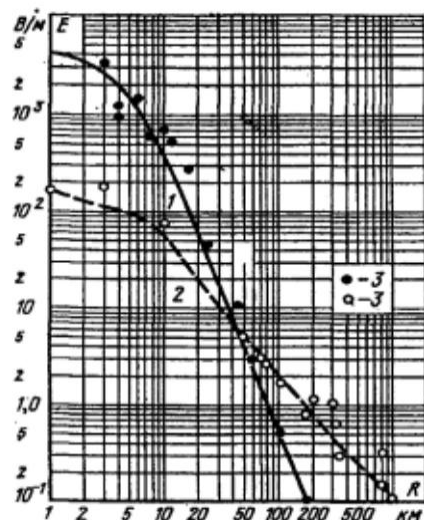
Число ударов молнии в ЛЭП

$$n_{\text{уд}} = 0,67 \cdot (W + R_{\text{э}}) \cdot \frac{l}{100} \cdot \frac{D_{\text{г}}}{100}$$

Электромагнитное поле канала молнии



$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_{(V)} \frac{\delta\left(t - \frac{R}{c}\right)}{R} dV; \\ \varphi &= \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{(V)} \frac{q\left(t - \frac{R}{c}\right)}{R} dV. \end{aligned} \right\}$$



$$E_{\text{эл}} = -\text{grad}(\varphi)$$

$$E_m = -\frac{d\vec{A}}{dt}$$

$$E = E_{\text{эл}} + E_m$$

Защита от прямых ударов молнии

Стержневые и тросовые молниеотводы.

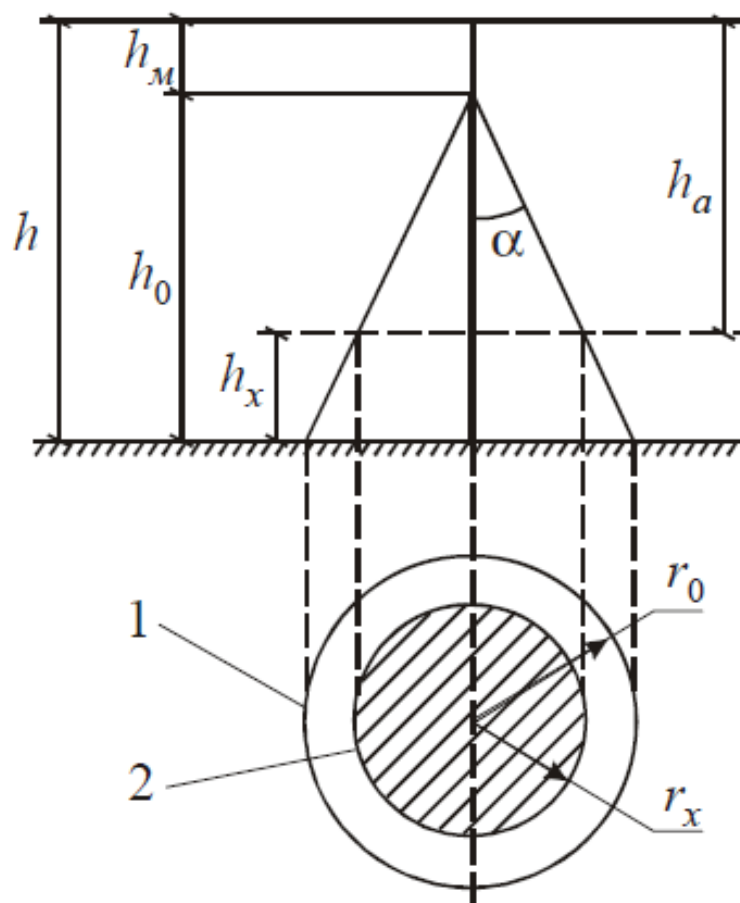
Защитное действие молниеотвода:

Заряды, скапливающиеся на его вершине в лидерной стадии разряда молнии, создают максимальные напряженности поля на пути между головкой лидера и вершиной молниеотвода, при этом разряд молнии ориентируется на молниеотвод.

Зона защиты молниеотвода – пространство вблизи молниеотвода, вероятность попадания молнии в которое не превышает определенного значения (0,95 / 0,99).

Защита от прямых ударов молнии

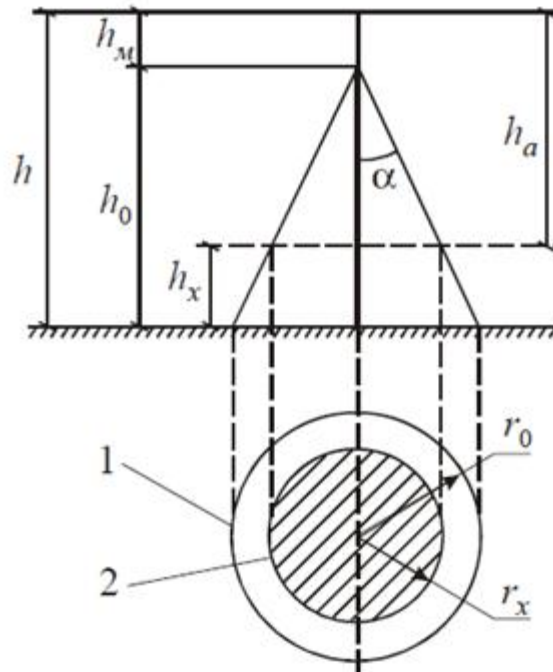
Зона защиты стержневого молниеотвода



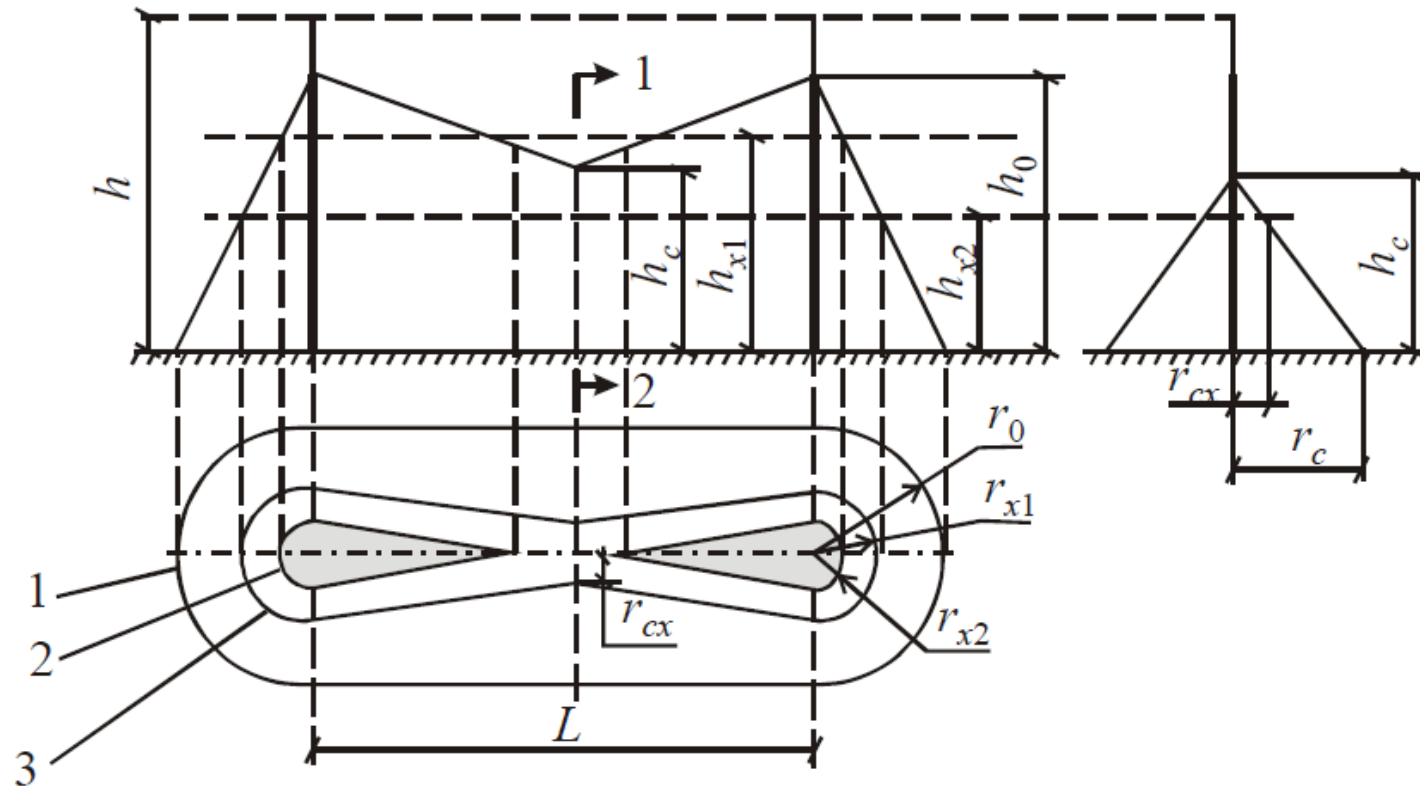
Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой до 150 м: 1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне h_x .

Зоны защиты молниеотводов

Зона А: степень надежности защиты $\geq 99,5\%$	Зона Б: степень надежности защиты 95–99,5%
<p style="text-align: center;">Одиночные стержневые: $h = (r_x + 1,63h_x)/1,5$ (рис. 1.4)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> $h_0 = 0,85h$ $r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)h$ $r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)(h - 1,2h_x)$ </div> <div style="width: 48%;"> $h_0 = 0,92h$ $r_0 = 1,5h$ $r_x = 1,5(h - 1,1h_x)$ </div> </div>	



Зона защиты двумя молниеотводами



Зона защиты двойного стержневого молниеотвода высотой до 150 м:
 1 – граница зоны защиты на уровне земли; 2 – то же на уровне h_{x1} ; 3 – то же на уровне h_{x2} .

Зона защиты двумя молниеотводами

Зона А: степень надежности защиты $\geq 99,5\%$	Зона Б: степень надежности защиты 95–99,5%
<p style="text-align: center;"><i>Двойные стержневые одинаковой высоты: $h = (h_c + 0,14L)/1,13$ (рис. 1.5)</i></p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">При $h < L \leq 2h$</p> $h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c$ <p style="text-align: center;">При $2h < L \leq 4h$</p> $h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$ $r_c = r_0[1 - 0,2(L - 2h)/h]$ $r_{cx} = r_c(h_c - h_x)/h_c$ <p style="text-align: center;">При $L > 4h$</p> <p style="text-align: center;">Молниеотводы рассматривать как одиночные</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">При $L \leq h$</p> $h_c = h_0$ $r_{cx} = r_x$ $r_c = r_0$ <p style="text-align: center;">При $h < L \leq 6h$</p> $h_c = h_0 - 0,14(L - h)$ $r_c = r_0$ $r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c$ <p style="text-align: center;">При $L > 6h$</p> <p style="text-align: center;">Молниеотводы рассматривать как одиночные</p> </div> </div>	

Зона защиты молниеотводов

Примечания. 1. Параметрами молниезащиты являются (все размеры – в метрах):

h – полная высота молниеотвода;

h_0 – высота вершины конуса стержневого молниеотвода;

h_m – высота стержневого молниеприемника;

h_a – активная высота молниеотвода;

h_x – высота защищаемого сооружения;

r_0, r_x – радиусы защиты на уровне земли и на высоте защищаемого сооружения;

h_c – высота средней части двойного стержневого молниеотвода;

$2r_c, 2r_x$ – ширина средней части зоны двойного стержневого молниеотвода на уровне земли и на высоте защищаемого объекта;

α – угол защиты (между вертикалью и образующей), град;

L – расстояние между двумя стержневыми молниеотводами;

Защита подстанций от прямых ударов молний

Открытые распределительные устройства и открытые подстанции 20–500 кВ должны быть защищены от прямых ударов молнии (ПУМ).
Допускается не защищать:

- подстанции 20 и 35 кВ с трансформаторами единичной мощностью 1,6 МВА и менее независимо от числа грозовых часов в году;
- ОРУ и подстанции 20 и 35 кВ в районах с числом грозовых часов в году не более 20;
- ОРУ и подстанции 220 кВ и ниже на площадках с эквивалентным удельным сопротивлением земли ρ в грозовой сезон более $2 \cdot 10^3$ Ом·м при числе грозовых часов в году не более 20.

Защита подстанций от прямых ударов молний

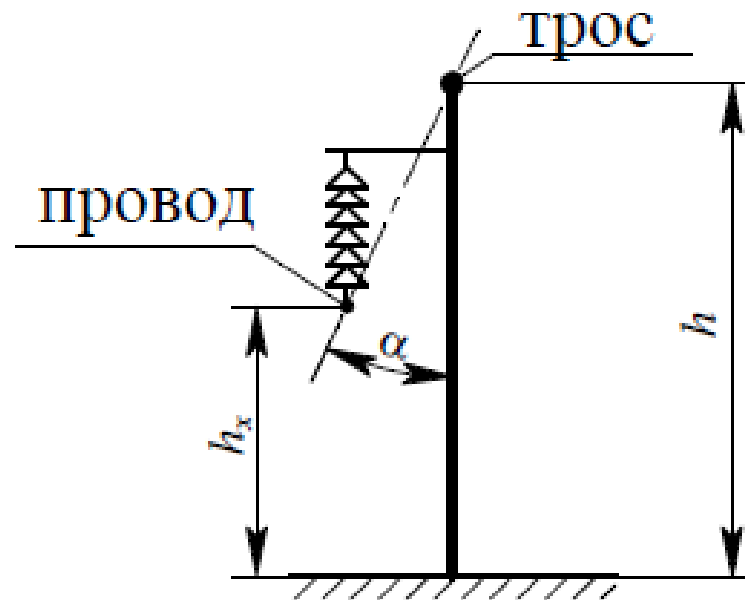
Здания ЗРУ и закрытых подстанций следует защищать от прямых ударов молнии в районах с числом грозových часов более 20.

Защиту зданий ЗРУ и закрытых подстанций, имеющих металлические покрытия кровли или железобетонные несущие конструкции кровли, следует выполнять заземлением этих покрытий (конструкций). Для защиты зданий ЗРУ и закрытых подстанций, крыша которых не имеет металлических или железобетонных покрытий либо несущих конструкций или не может быть заземлена, следует устанавливать стержневые молниеотводы или молниеприемные сетки непосредственно на крыше зданий.

Защита подстанций от прямых ударов молний

Защищаемые объекты	Защитные мероприятия
Открытые распределительные устройства, в том числе гибкие мосты и шинные связи	Стержневые молниеотводы
Здания машинного зала при числе грозовых часов в году более 20	<ol style="list-style-type: none"> 1. Заземление металлических или железобетонных конструкций кровли или металлической кровли. 2. Стержневые молниеотводы или молниеприемные сетки на крыше зданий при невозможности выполнения п.1
Дымовые трубы: металлические кирпичные, бетонные и железобетонные	Заземление Стальной молниеотвод и заземляющий спуск, присоединенный к заземлителю
Здания трансформаторной башни, маслохозяйства, нефтехозяйства, электролизной и ацетилено-генераторной станции	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отдельно стоящий стержневой или тросовый молниеотвод 2. Импульсное сопротивление каждого заземлителя не более 10 Ом при $\rho < 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и не более 40 Ом при $\rho \geq 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ 3. Заземление металлических корпусов
Угледробилки, вагоноопрокидыватели, резервуары с горючими жидкостями или газами, места хранения баллонов с водородом	<ol style="list-style-type: none"> 1. Молниеотвод, установленный отдельно или на самом сооружении при толщине крыши менее 4 мм. 2. Заземление корпуса установки при: <ol style="list-style-type: none"> а) толщине металла крыши 4 мм и более; б) объеме емкости менее 200 м^3 независимо от толщины металла крыши

Зона защиты тросового молниеотвода



$$\lg P_{\alpha} = \alpha \frac{\sqrt{h_{on}}}{90} - 4,$$

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту

Грозозащита ЛЭП

Основные виды грозовых поражений:

1. Перегорание проводов
2. Расщепление стоек и траверс деревянных опор
3. Перекрытие и разрушение изоляторов
4. Перекрытие и разрушение трубчатых разрядников
5. Пробои кабельных муфт
6. Отказ систем АПВ

Грозозащитные устройства:

1. Устройства, ограничивающие число и уровень АПН (разрядники, ОПН, тросы)
2. Устройства, способные ликвидировать возникшие последствия без нарушения электроснабжения (ДГК, АПВ)

Требования к грозозащите ЛЭП:

1. Обеспечить защиту проводов от ПУМ (тросы)
2. Исключить возможность обратных перекрытий с опоры на провод ($R_{и}$)
3. Исключить возможность установления силовой дуги по месту перекрытия (ДГК)
4. Не допустить нарушения нормальной работы потребителей (АПВ)

Грозозащита ЛЭП

Надежность грозозащиты ВЛ обеспечивается:

- подвеской грозозащитных тросов с углами защиты $20\text{--}30^\circ$;
- снижением импульсного сопротивления заземления опор;
- повышением импульсной прочности изоляции линий и снижением вероятности установления силовой дуги (в частности, использованием деревянных траверс и опор);
- применением изолированной нейтрали или дугогасящей катушки;
- использованием АПВ линий.

Применение грозозащитных тросов на линиях 6–500 кВ не требуется:

- для всех ВЛ напряжением до 35 кВ;
- для линий 110 кВ на деревянных опорах;
- в районах с числом грозовых часов в году менее 20;
- на отдельных участках ВЛ с удельным сопротивлением грунтов более $10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- на участках трассы с расчетной толщиной стенки гололеда более 20 мм.

Условия возникновения и горения силовых дуг на ЛЭП

$$E_{cp} = U_{раб} / l$$

Рабочий градиент напряжения вдоль пути перекрытия

$$\eta = (1,6E_{cp} - 6) \cdot 10^{-2}$$

Вероятность перекрытия импульсного перекрытия в силовую дугу

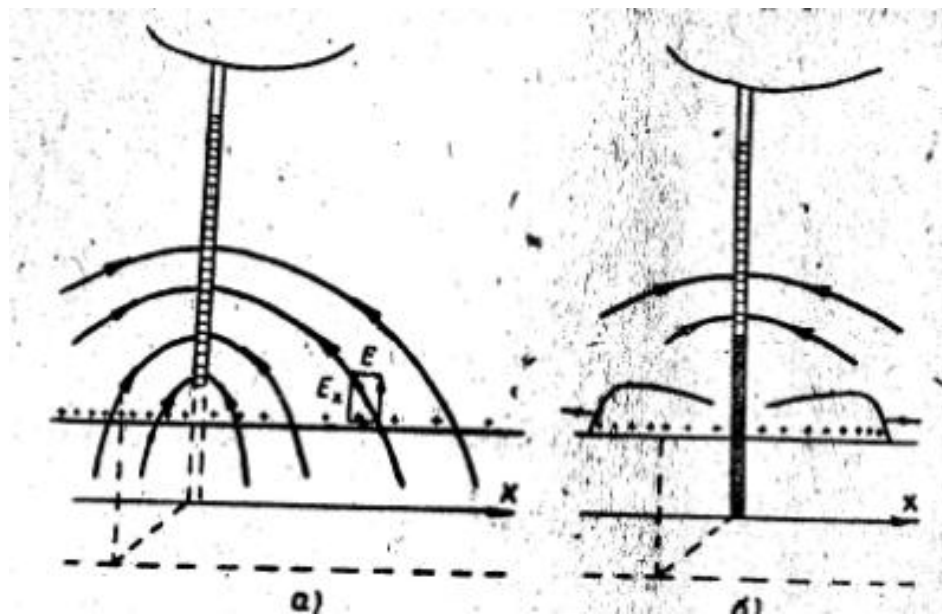
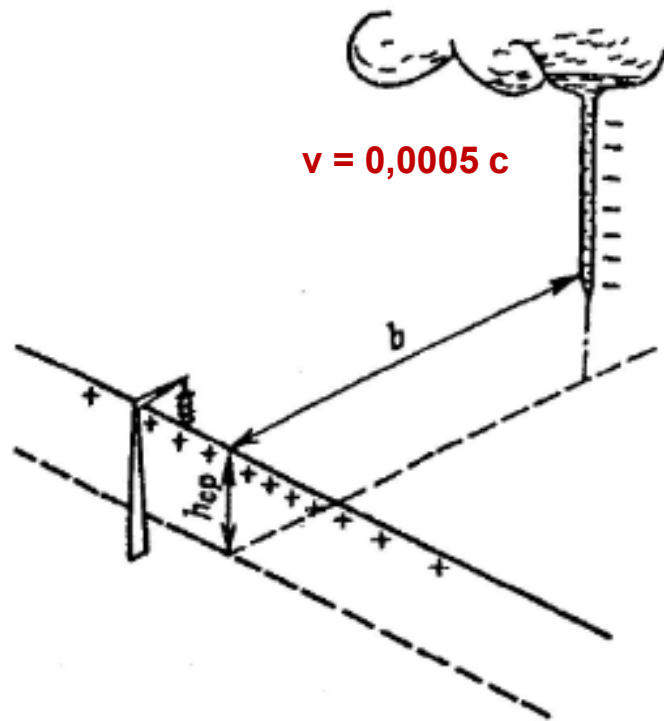
Для воздушных линий (ВЛ) с заземленной точкой подвеса гирлянды можно принять $\eta = 0,7$ для ВЛ до 220 кВ включительно и $\eta = 1$ для ВЛ 330 кВ и выше.

**Волновые сопротивления проводов воздушных линий
и коэффициенты электромагнитной связи провода
и троса (или другого провода)**

Тип опоры	Материал опоры	$U_{\text{ном}}$ кВ	Число проводов в фазе	Волновое сопротивление, Ом		Коэффициент связи	
				z рас- чет- ное	z_k с учетом короны	K рас- чет- ный	K_k с учетом короны
Одностоечная, одноцепная, с тросом	железобетон —"	110	1	505	455	0,215	0,240
		220	1	475	420	0,200	0,210
Одностоечная, двухцепная, с тросом	металл	35	1	510	475	0,215	0,240
	железобетон	110	1	520	470	0,210	0,250
	металл	220	1	505	455	0,200	0,245
	—"	330	2	400	375	0,175	0,215
Портальная, с двумя тро- сами, гори- зонтальное расположение проводов	дерево	35	1	490	450	0,285	0,310
	—"	100	1	465	420	0,260	0,305
	—"	220	1	445	385	0,245	0,300
	металл,	330	2	360	330	0,200	0,245
	железобетон —"	500	3	320	305	0,180	0,225

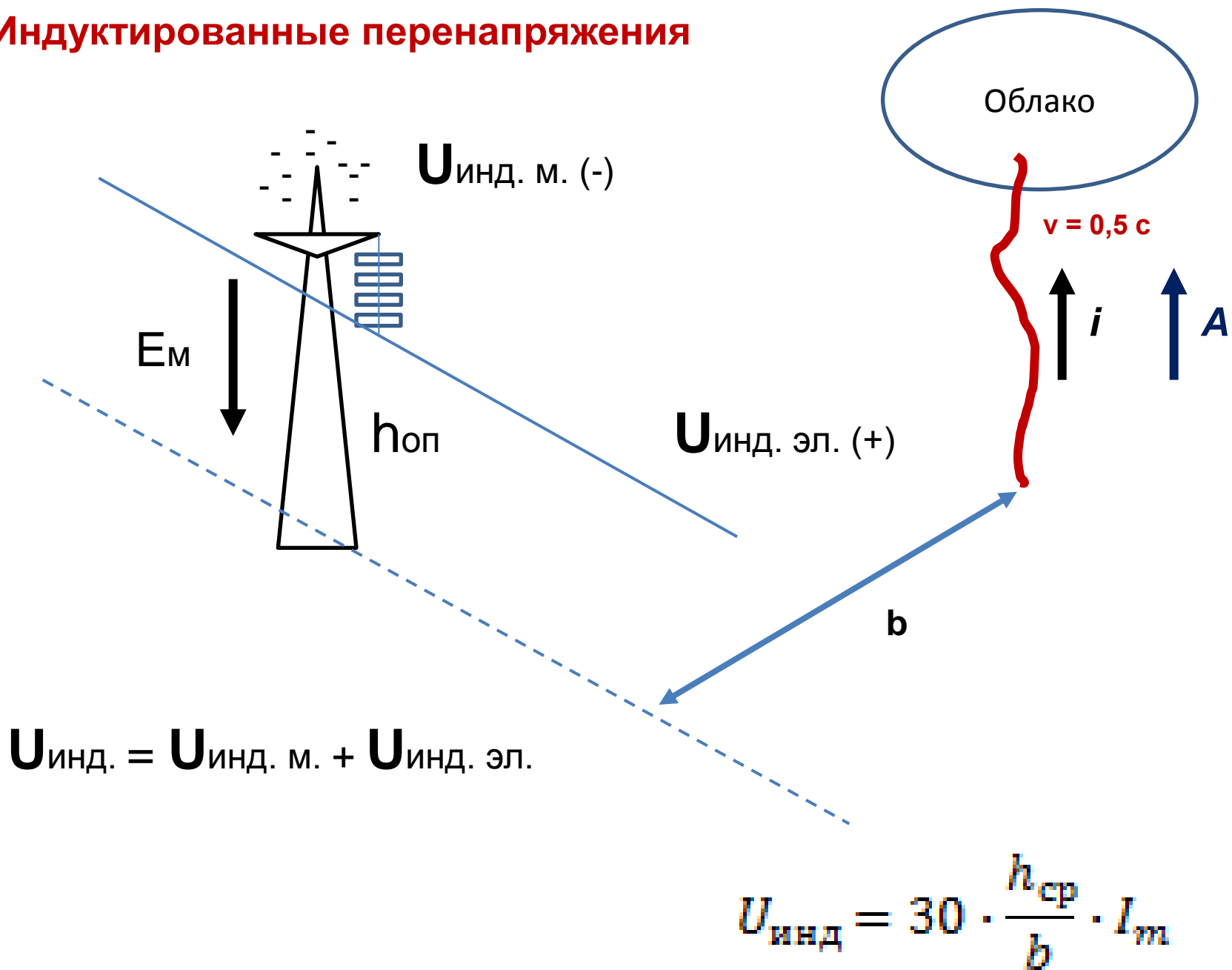
Индуктированные ПН при разряде молнии вблизи ЛЭП

Индуктированные перенапряжения



U инд. эл. (+)

Индуктированные перенапряжения



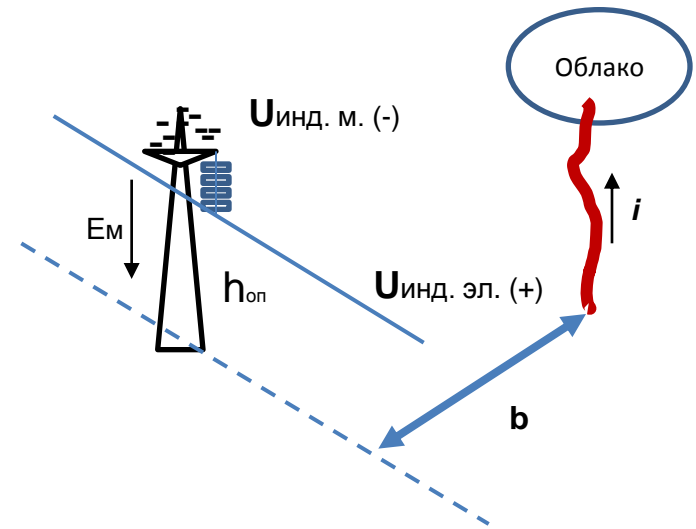
Индуктированные перенапряжения

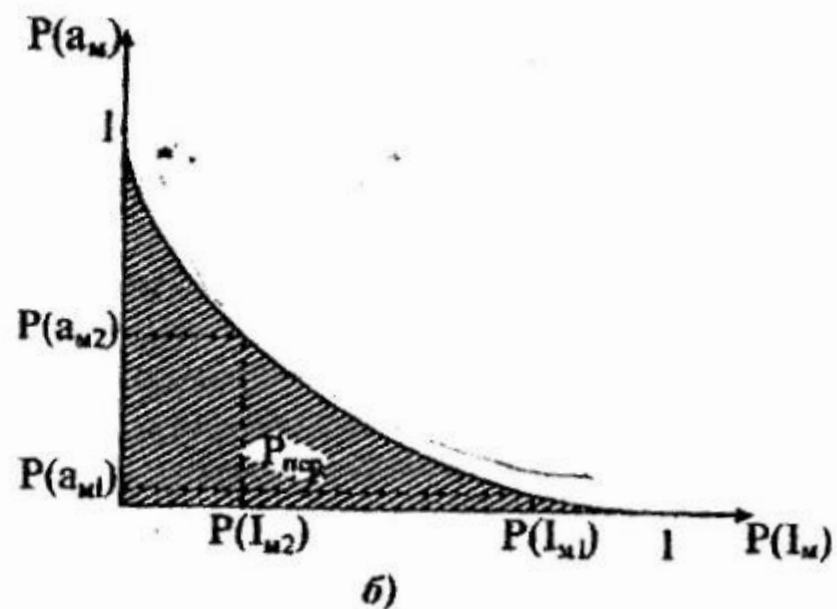
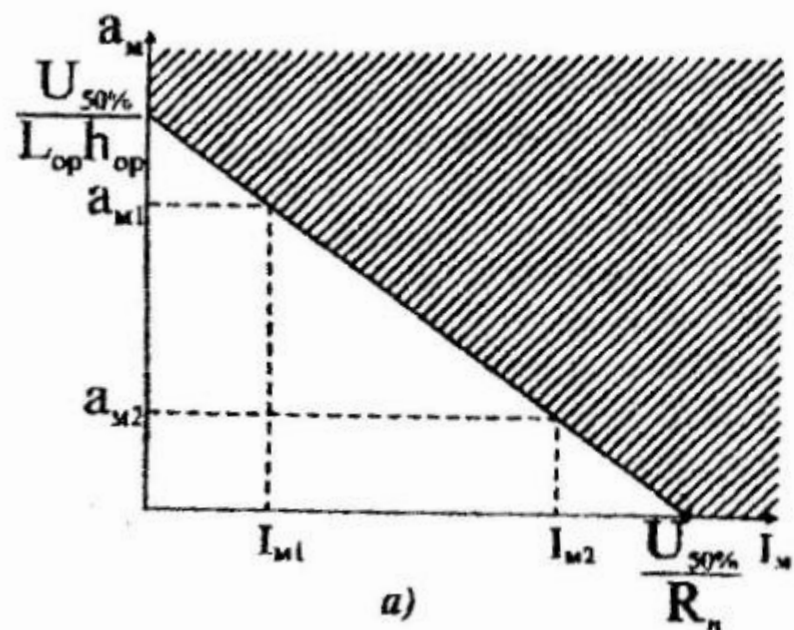
$$U_{\text{инд}} = 30 \cdot \frac{h_{\text{ср}}}{b} \cdot I_m$$

$$I_{\text{инд.кр}} = \frac{U_{50\%} \cdot b}{30 \cdot h_{\text{ср}}}$$

$$P_{\text{инд}} = e^{-m \cdot 0,03 \cdot \frac{U_{50\%} \cdot b}{30 \cdot h_{\text{ср}}}}$$

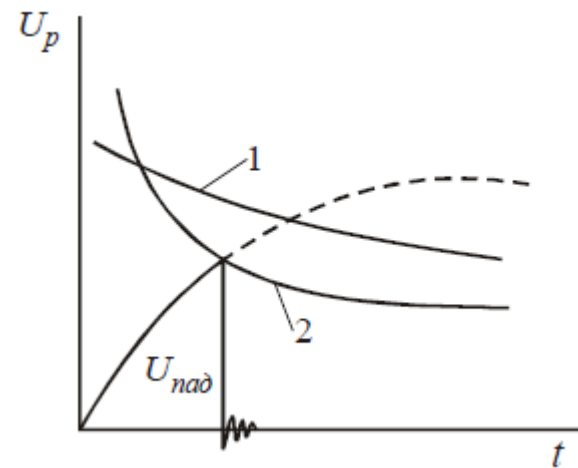
$$n_{\text{пер.инд.т}} = 2 \cdot \int_{R_3 + \frac{W}{2}}^{\infty} \left[0,067 \cdot L_{\text{лэп}} \cdot D_r \cdot e^{(-0,03 \cdot m \cdot \frac{U_{50\%} \cdot b}{30 h_{\text{ср}}})} \right] db$$

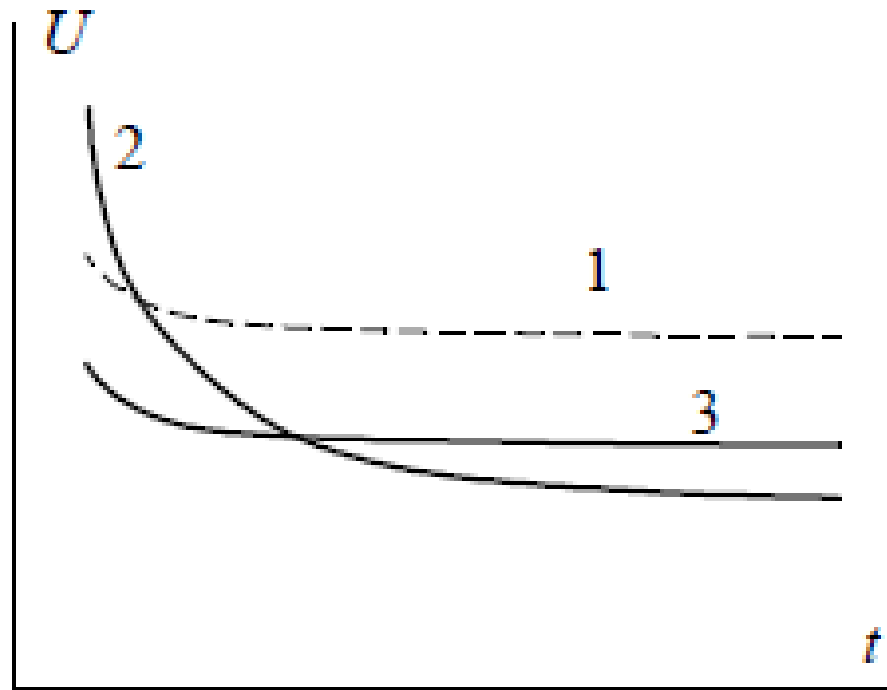




а) Кривая опасных параметров

б) Определение вероятности перекрытия изоляции





*Вольт-секундная характеристика защищаемой изоляции
(1) и искрового промежутка с резконеоднородным полем (2)
(2) и однородным полем (3)*

Устройство трубчатого разрядника:

S_1 — основной промежуток;

S_2 — внешний искровой промежуток;

1 — диэлектрическая труба;

2 — стержневой электрод;

3 — открытый электрод



Тип разрядника	Внешний искровой промежу- ток, мм	Разрядные напряжения при импульсах 1,2/50 мкс, кВ		Разрядные напряжения при 50 Гц (действую- щие значения), 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
РТФ 35/0,4–3	80 100 150 200	160/170 180/190 225/255 270/320	200/200 205/220 250/265 300/310	95 105 130 155	95 83 110 135
РТВ 35/2–10	80 100 150 200	135/140 165/165 210/225 260/285	145/145 180/180 220/225 275/288	100 115 150 180	100 110 145 170
РТФ 110/0,4–2,2	350 400 450 500	410/455 432/495 455/530 475/570	495/560 525/600 550/640 580/680	213 230 240 255	200 225 250 270
РТВ 110/2–10	350 400 450 500	380/400 405/440 435/460 460/490	415/435 450/480 485/510 520/575	165 217 310 395	100 145 170 212
РТВУ 110/7–30 (усиленный)	400 450 500	405/440 — /460 — /490	450/480 — /505 — /538	217 265 282	212 234 255
РТВУ 220/2–10	500 600 700 800	— /1050 — /1100 — /1150 — /1200	— /1100 — /1150 — /1200 — /1250	600 700 750 864	550 600 700 838

Основные характеристики некоторых типов трубчатых разрядников

Крутая ВСХ, наличие зоны выхлопа, нестабильные характеристики и срез напряжения не позволяют использовать РТ для защиты подстанционного оборудования.

Основное применение – защита линейных подходов к ПС, электрооборудования маломощных подстанций 3-10 кВ, участков пересечения ЛЭП различных классов напряжения.

Длинно-искровые разрядники (РДИ)

Принцип работы разрядника основан на использовании **эффекта скользящего разряда**, который обеспечивает большую длину импульсного перекрытия по поверхности разрядника, и предотвращении за счет этого перехода импульсного перекрытия в силовую дугу тока промышленной частоты.

Разрядный элемент РДИ, вдоль которого развивается скользящий разряд, имеет длину, в несколько раз превышающую длину защищаемого изолятора линии.

Конструкция разрядника обеспечивает его более низкую импульсную электрическую прочность по сравнению с защищаемой изоляцией.

Главной особенностью длинно-искрового разрядника является то, что **вследствие большой длины** импульсного грозового перекрытия **вероятность установления дуги** короткого замыкания **сводится к нулю**.

$$\eta = (1,6E_{cp} - 6) \cdot 10^{-2}$$

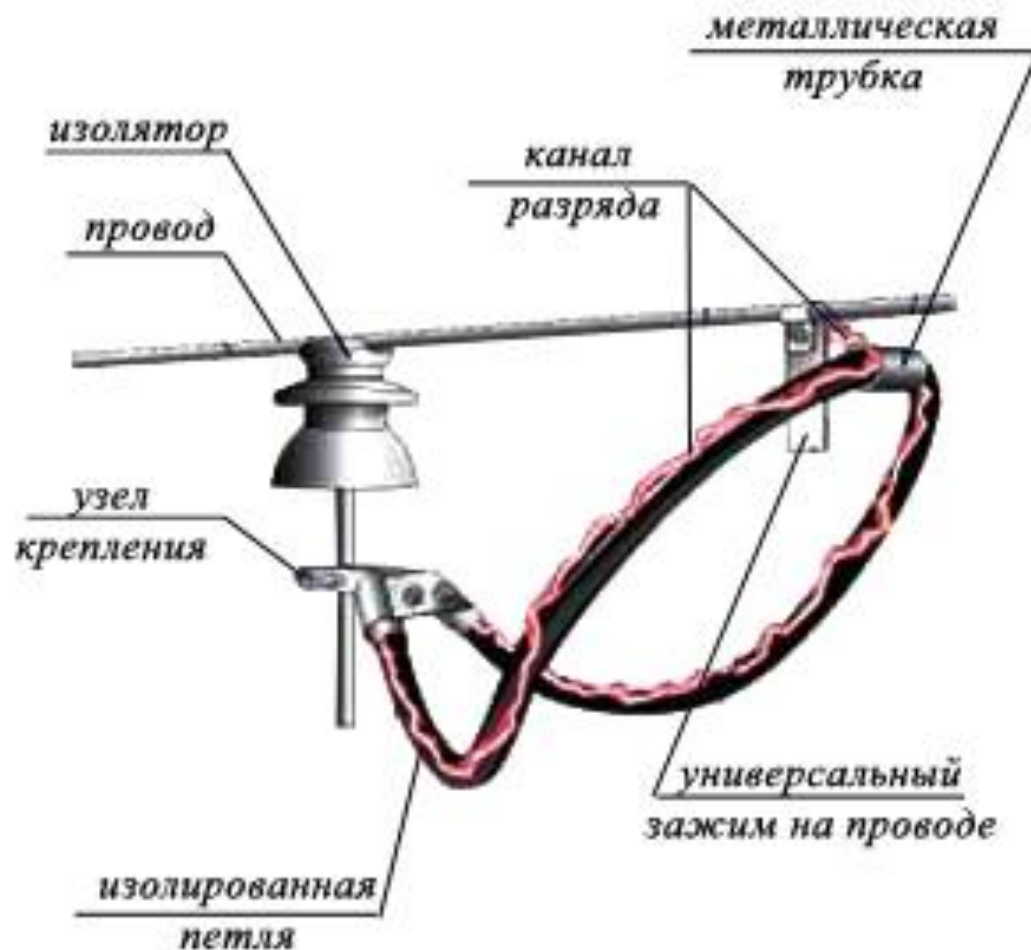
$$E_{cp} = U_{раб} / l$$

РДИП-10 (ОАО "НПО Стример")

Разрядник РДИП-10-4-УХЛ1 сертифицирован и принят МВК РАО "ЕЭС России"

- Защищает от индуктированных перенапряжений
- Устанавливается на все виды опор
- Не подвергается воздействию рабочего напряжения

Схема установки на опоре



Существуют различные модификации РДИ, отличающиеся назначением и особенностями ВЛ, на которых они применяются.

РДИ предназначены для защиты воздушных линий электропередачи напряжением 6-10 кВ трехфазного переменного тока с защищёнными и неизолированными проводами от индуктированных грозовых перенапряжений и их последствий и прямого удара молнии; рассчитаны для работы на открытом воздухе при температуре окружающего воздуха от минус 60 °С до плюс 50 °С в течение 30-и лет.

Основное преимущество РДИ: разряд развивается вдоль аппарата по воздуху, а не внутри его. Это позволяет значительно увеличить срок эксплуатации изделий и повышает их надежность.



РДИП-10

Импульсное разрядное напряжение:	при положительной полярности 110кВ
	при отрицательной полярности 90 кВ
Длина перекрытия по поверхности:	78 см
Внешний искровой воздушный промежуток:	2-4 см
Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, не менее:	в сухом состоянии 42Кв
	под дождем 28кВ
Выдерживаемый импульсный ток, не менее:	40кА
Масса:	2,3 кг
Срок службы, не менее:	30 лет

Вентильные разрядники

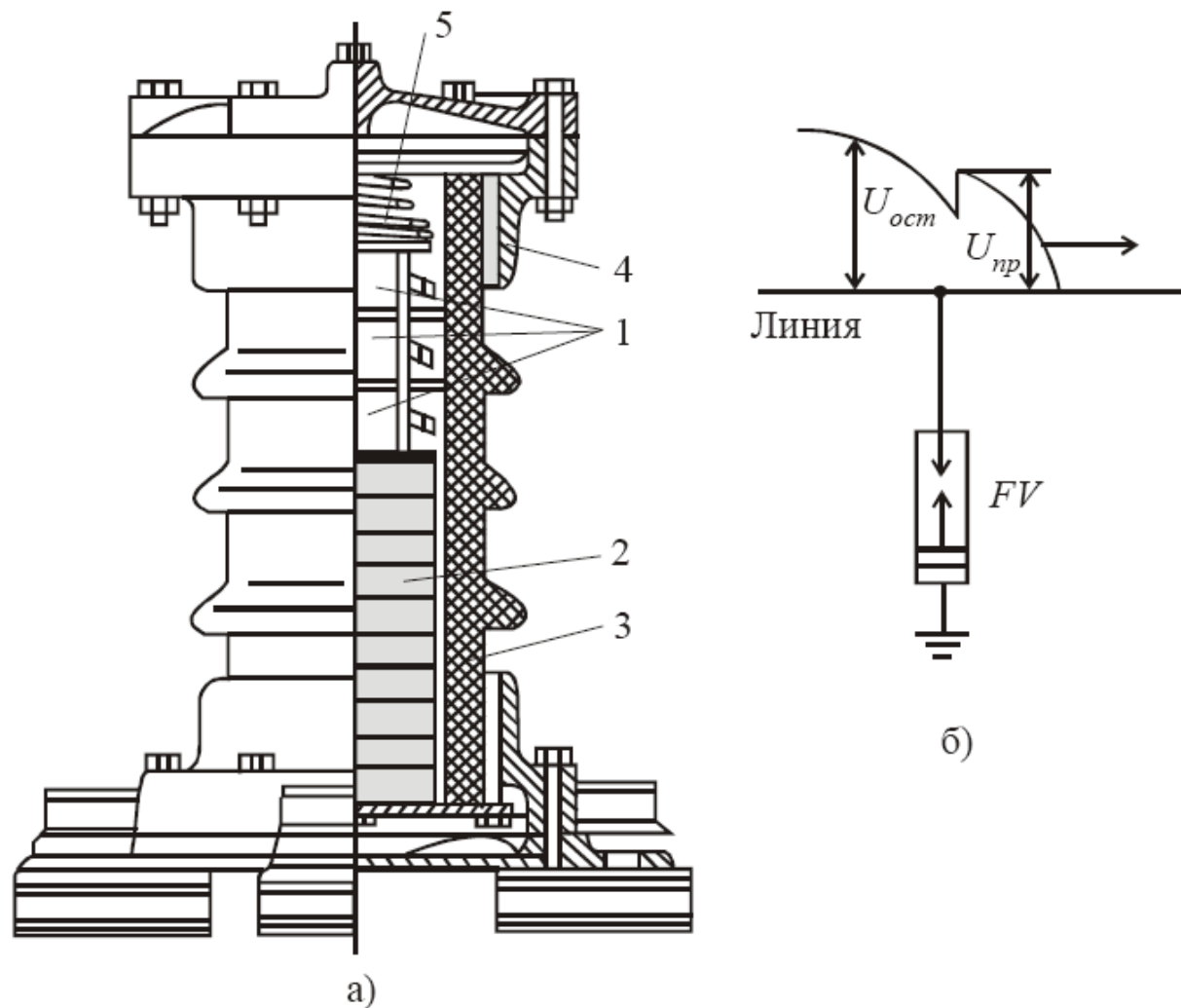


Рис. 2.3. Вентильный разрядник: а) общий вид; б) схема включения. 1 – искровые промежутки; 2 – вилитовые (тервитовые) диски; 3 – фарфоровый корпус; 4 – крышка; 5 – пружина.

Вентильные разрядники

$$U = K \cdot I^\alpha,$$

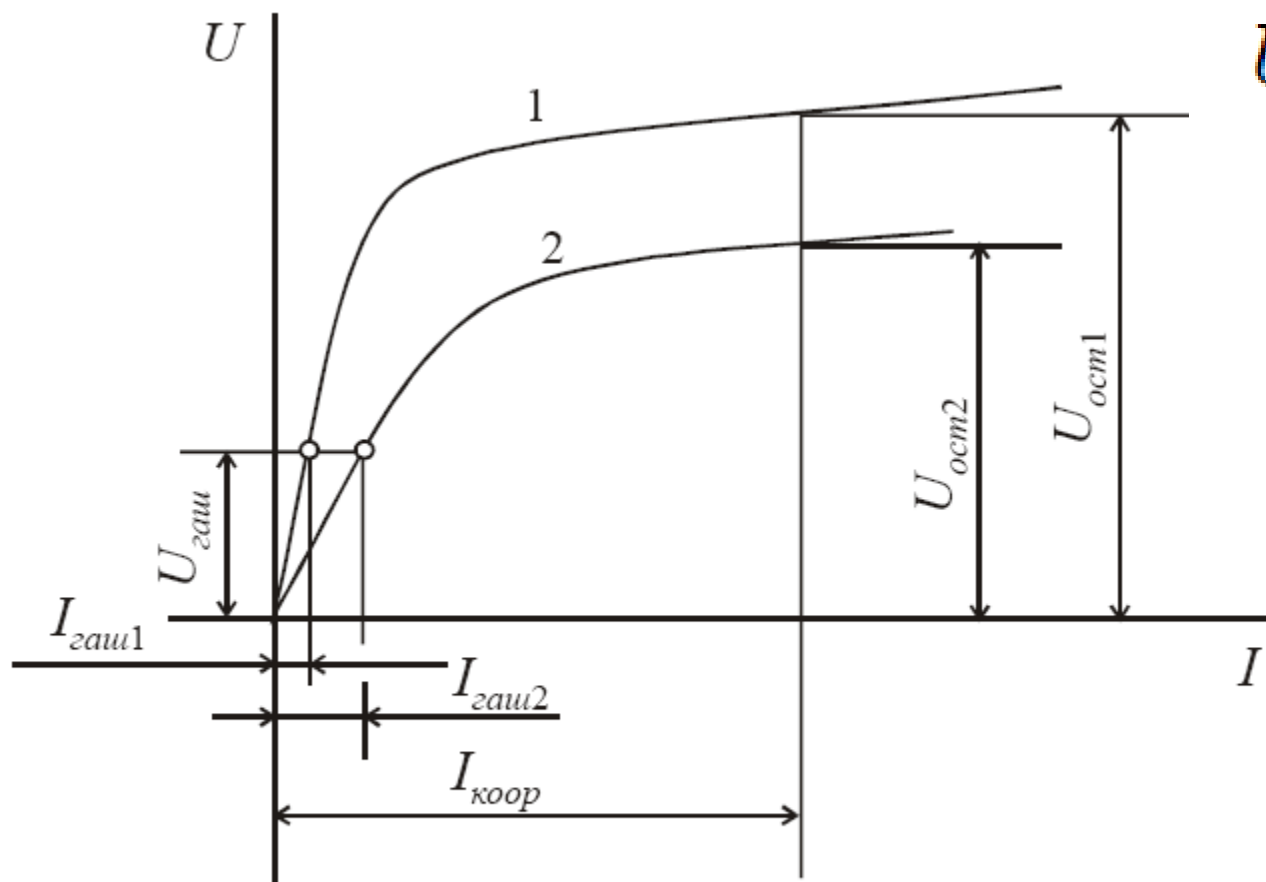


Рис. 2.4. Вольтамперные характеристики вентильных разрядников:
1 и 2 – разные нелинейности резистора.

Остающееся напряжение (импульсное пробивное напряжение искрового промежутка) должны быть на 20-25% ниже разрядного напряжения защищаемой изоляции.

Нелинейные ограничители напряжений

Особенности:

Высокая нелинейность ВАХ, отсутствие искровых промежутков, применение полимерных и композиционных материалов
(высокие эксплуатационные и технологические характеристики)

Изготовление и принцип действия:

Специальный отжиг металлической пудры из оксида цинка – каждая частица сферический варистор.

Объем сферы – высокая электрическая проводимость.

Оболочка – изоляция (управляется электрическим током, протекающим через керамику).

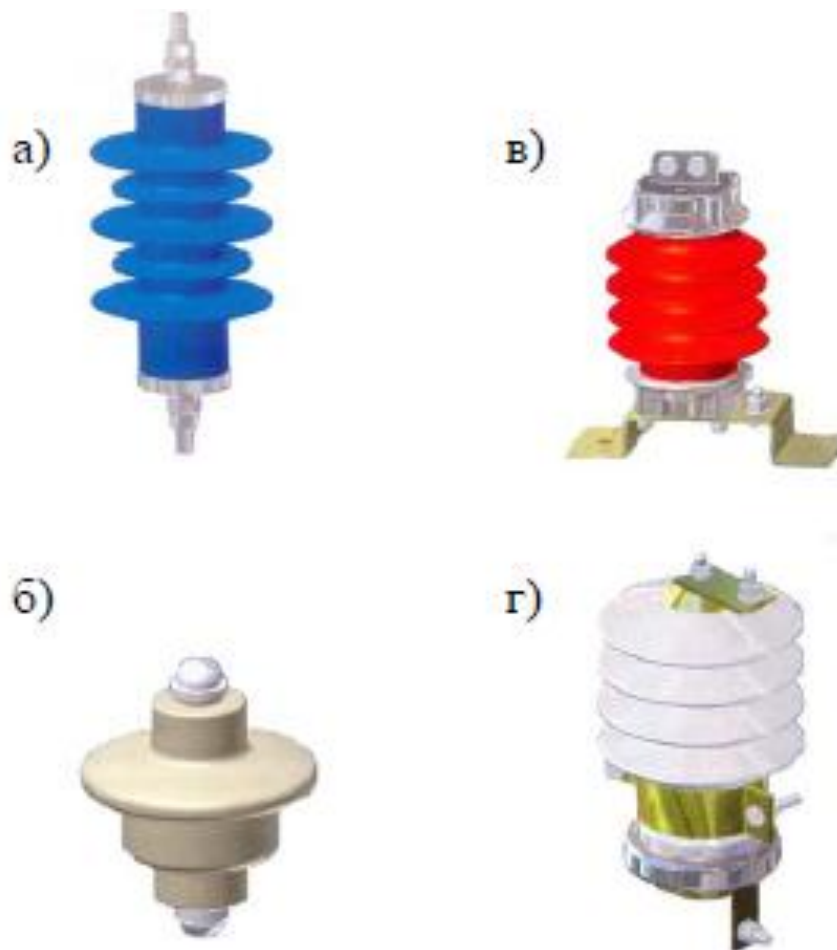
Если приложенное напряжение ниже порогового, то материал работает как изолятор.

При достижении порогового значения керамические частицы начинают проводить электрический ток.

Преимущества:

Возможность глубокого ограничения перенапряжений, малые габариты, большая пропускная способность.

Нелинейные ограничители напряжений

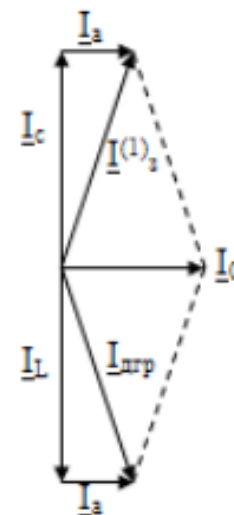
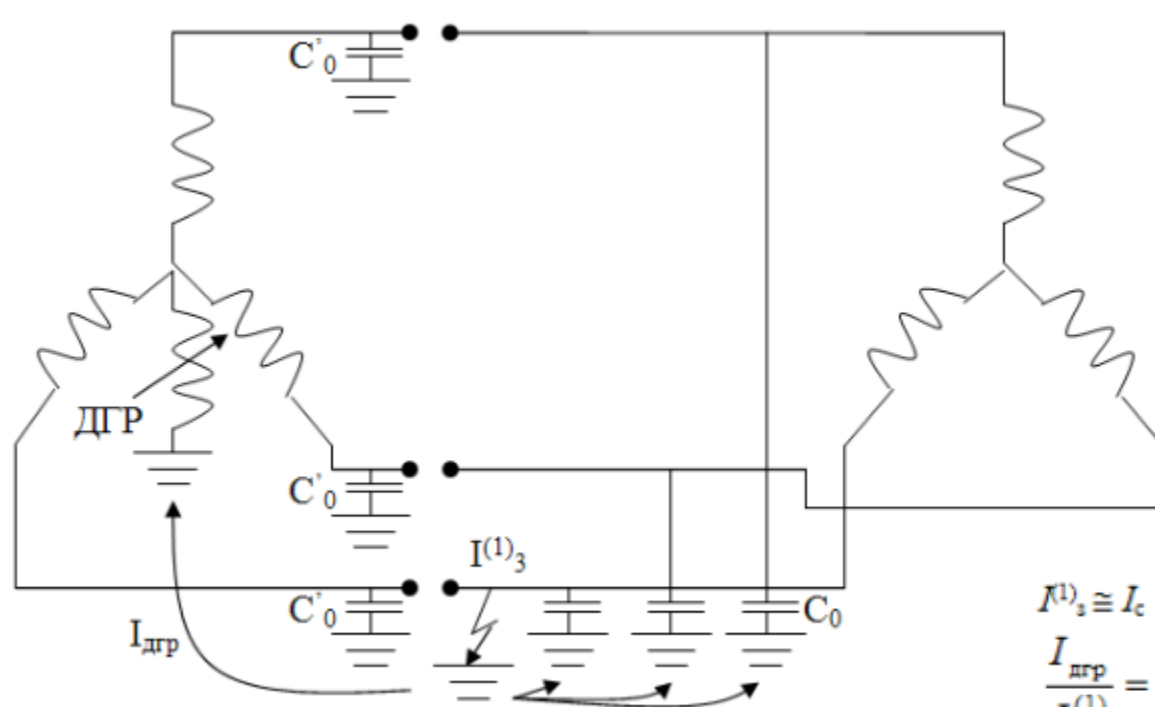


Ограничители перенапряжений серий ОПН-П до 1000 В (а, б), ОПН-П1 на 10 кВ (в) и ОПНФ на 6, 10 кВ (г).

Основные технические характеристики ОПН

Тип ОПН	Класс напряжения сети, кВ, действующее значение	Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН, кВ, действующее значение	Токовая пропускная способность при импульсе тока большой длительности 2000 мкс (20 воздействий), А	Максимальная амплитуда импульса тока 4/10 мкс (2 воздействия), кА	Номинальный разрядный ток, кА	Удельная емкость, кДж/кВ	Остающееся напряжение при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой, кВ, не более				Остающееся напряжение при волне импульсного тока 8/20 мкс с амплитудой, кВ, не более						Остающееся напряжение при импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, кВ, не более	
							125 А	250 А	500 А	1000 А	250 А	500 А	2500 А	5000 А	10000 А	20000 А	5000 А	10000 А
Для защиты изоляции электрооборудования от атмосферных и коммутационных перенапряжений в сетях с эффективно заземленной нейтралью до 1 кВ																		
ОПН-П-0,38 УХЛ1, ОПН-П1-0,38 УХЛ1		0,38	0,4	125		2,5	1,6	1,3				1,4		1,6	1,7			
ОПН-П-0,66 УХЛ1, ОПН-П1-0,66 УХЛ1		0,66	0,8	125		2,5	1,6	2,6				2,8		3,2	3,4			
Для защиты изоляции электрооборудования от атмосферных и коммутационных перенапряжений в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью																		
ОПН-П1-3/3,0/10/2 УХЛ1		3	3,0	500	100	10	4,4	7,1		7,4			7,5		8,9	9,65		10,9
ОПН-П1-3/3,3/10/2 УХЛ1		3	3,3	500	100	10	4,4	7,8		8,1			8,25		9,75	10,5		11,9
ОПН-П1-3/3,6/10/2 УХЛ1		3	3,6	500	100	10	4,4	8,4		8,7			8,8		10,6	11,5		13,0
ОПН-П1-6/6,0/10/2 УХЛ1		6	6,0	500	100	10	4,4	14,2		14,8			15,0		17,7	19,3		21,8
ОПН-П1-6/6,6/10/2 УХЛ1		6	6,6	500	100	10	4,4	15,5		16,2			16,5		19,5	21,0		23,8
ОПН-П1-6/6,9/10/2 УХЛ1		6	6,9	500	100	10	4,4	16,3		17,0			17,25		20,4	22,0		24,9
ОПН-П1-6/7,2/10/2 УХЛ1		6	7,2	500	100	10	4,4	16,7		17,4			17,6		21,2	22,9		25,9
ОПН-П1-10/10,5/10/2 УХЛ1		10	10,5	500	100	10	4,4	25,0		26,0			26,25		31,0	33,5		37,9
ОПН-П1-10/11,5/10/2 УХЛ1		10	11,5	500	100	10	4,4	27,1		28,2			28,75		34,0	36,6		41,4
ОПН-П1-10/12/10/2 УХЛ1		10	12,0	500	100	10	4,4	28,2		29,3			29,6		36,0	38,0		43,0
ОПН-П1-35/40,5/10/2 УХЛ1		35	40,5	500	100	10	4,4	97		101			102		120	127		142

Применение дугогасящих реакторов в сети с изолированной нейтралью



$$I_3^{(1)} \cong I_c$$

$$\frac{I_{\text{дгр}}}{I_3^{(1)}} = K = 1 \text{ — режим точной настройки ДГР.}$$

В режиме точной настройки индуктивная составляющая тока, протекающего через реактор, компенсируется емкостной составляющей тока замыкания на землю, обусловленной емкостью проводов линии.

При точной настройке **остаточный ток**, протекающий через место однофазного замыкания на землю замыкания минимален, **дуга легко гаснет при его прохождении через ноль**, **электрическая прочность изоляции полностью восстанавливается**.

Применение дугогасящих реакторов в сети с изолированной нейтралью



Реакторы управляемые заземляющие дугогасящие однофазные с масляным охлаждением типа РУОМ-190/11(6,6)/3 используются в электрических сетях 6 или 10 кВ с изолированной нейтралью в качестве заземляющего дугогасящего устройства с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю.

Предназначены для автоматической компенсации емкостных токов замыкания на землю; предотвращения переходов однофазных замыканий на землю в короткие замыкания электрической сети.

Система АПВ

Опыт эксплуатации сетей высокого напряжения показывает - если поврежденную линию электропередачи быстро отключить, т. е. снять с нее напряжение, то в большинстве случаев повреждение ликвидируется.

При этом **электрическая дуга**, возникавшая в месте короткого замыкания (КЗ), **не успевает** вызвать существенных разрушений оборудования, препятствующих обратному включению линии под напряжение.

Система АПВ повышает надёжность электроснабжения потребителей и восстанавливает нормальный режим работы электрической системы.

Выполняется с помощью автоматических устройств, воздействующих на высоковольтные выключатели после их аварийного автоматического отключения от релейной защиты.

Система АПВ

Эффективность АПВ тем выше, чем быстрее следует оно за аварийным отключением, т. е. чем меньше время перерыва питания потребителей. Это время зависит от длительности цикла АПВ.

В электрических системах применяют:

однократное АПВ — с одним циклом,
двукратное — при неуспешном первом цикле,
трёхкратное — с тремя последовательными циклами.

Цикл АПВ — время от момента подачи сигнала на отключение до замыкания цепи главными контактами выключателя — **состоит из времени отключения и включения выключателя и времени срабатывания устройства АПВ.**

Длительность бестоковой паузы, когда потребитель не получает электроэнергию, выбирается такой чтобы :

- успело произойти восстановление изоляции (деионизация среды) в месте короткого замыкания,
- привод выключателя после отключения был бы готов к повторному включению,
- выключатель к моменту замыкания его главных контактов восстановил способность к отключению поврежденной цепи в случае **неуспешного АПВ.**

Время деионизации зависит от среды, климатических условий и других факторов.
Время восстановления отключающей способности выключателя определяется его конструкцией и количеством циклов АПВ., предшествовавших данному.

Система АПВ

Обычно длительность АПВ:

1 цикл - не превышает 0,5—1,5 сек (0,4 – 0,5 сек. для БАПВ),

2 цикл - от 10 до 15 сек (1,0 – 1,5 сек. для БАПВ), ,

3 цикл - от 60 до 120 сек.

Наиболее распространено **однократное АПВ**, обеспечивающее на воздушных линиях высокого напряжения (110 кВ и выше) до 86 %, а на кабельных линиях (3—10 кВ) — до 55 % успешных включений.

Двукратное АПВ обеспечивает во втором цикле до 15 % успешных включений.

Третий цикл увеличивает число успешных включений всего на 3—5 %.

На линиях электропередачи высокого напряжения (от 110 до 500 кВ) применяется однофазовое АПВ; при этом выключатели должны иметь отдельные приводы на каждой фазе.

Применение АПВ экономически выгодно, т. к. стоимость устройств АПВ и их эксплуатации несравнимо меньше ущерба из-за перерыва в подаче электроэнергии.

Рекомендуемые способы грозозащиты ЛЭП 110 кВ

1. ЛЭП 110 Кв и выше на металлических и железобетонных опорах - защищаются тросом по всей длине. Сопротивление заземления – 10 Ом. Необходимо использование АПВ.
2. ЛЭП 110 – 220 Кв на деревянных опорах – подвеска троса на подходах к подстанции и установка разрядников в начале подхода.
Оборудование тросом всей ЛЭП - только для очень ответственных потребителей. При частичной установке Ме и ж/б опор – установка на них разрядников.
3. ЛЭП 35 Кв на металлических, железобетонных и деревянных опорах – трос только для защиты подхода к подстанциям.
4. ЛЭП 3 - 10 Кв – установка разрядников в местах с ослабленной изоляцией и на подходов к подстанциям.

Рекомендуемые способы грозозащиты ЛЭП 110 кВ

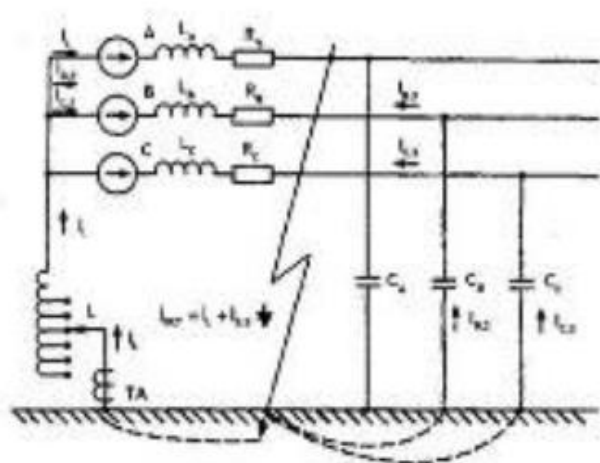
Дополнительных мер защиты на воздушных линиях электропередачи требуют:

- пересечения ВЛ между собой (РТ, РЗ с АПВ);
- пересечения ВЛ с линиями связи, трамвайными линиями и линиями электрофицированных железных дорог (РТ, РЗ с АПВ);
- опоры ВЛ со сниженной электрической прочностью (РТ, РВ);
- высокие опоры переходных пролетов (тросы, снижение сопротивлений заземления, усиление изоляции, РТ, РВ);
- ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях (тросы, РТ, РВ);
- кабельные вставки на воздушных линиях (РТ, РВ);

Эксплуатационные показатели ЛЭП 110 кВ

	ЛЭП без тросов		ЛЭП с тросами	
	Мет. опоры	Дер. опоры	Мет. опоры	Дер. опоры
Удельное число отключений (n)	4,7	1,5	0,324	0,047
Показатель грозоупорности (m)	0,21	0,67	3,1	21
Показатель грозоупорности с учетом АПВ	5,5	8,5	25	110

Режимы работы нейтрали



В настоящее время в мировой практике используются следующие способы заземления нейтрали электрических сетей:

- изолированная (незаземленная);
- глухозаземленная (непосредственно присоединенная к заземляющему контуру);
- заземленная через дугогасящий реактор;
- заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный).

Способ заземления нейтрали сети является достаточно важной характеристикой. Он определяет:

- ток в месте повреждения и перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании;
- схему построения релейной защиты от замыканий на землю;
- уровень изоляции электрооборудования;
- выбор аппаратов для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений (ограничителей перенапряжений);
- бесперебойность электроснабжения;
- допустимое сопротивление контура заземления подстанции;
- безопасность персонала и электрооборудования при однофазных замыканиях.

Согласно требованиям Правил устройства электроустановок

Сети с номинальным напряжением до 1 кВ, питающиеся от понижающих трансформаторов, присоединенных к сетям с $U_{ном} > 1$ кВ, выполняются с глухим заземлением нейтрали.

Сети с $U_{ном}$ до 1 кВ, питающиеся от автономного источника или разделительного трансформатора (по условию обеспечения максимальной электробезопасности при замыканиях на землю), выполняются с незаземленной нейтралью.

Сети с $U_{ном} = 110$ кВ и выше выполняются с эффективным заземлением нейтрали (нейтраль заземляется непосредственно или через небольшое сопротивление).

Сети 3 — 35 кВ, выполненные кабелями, при любых токах замыкания на землю выполняются с заземлением нейтрали через резистор.

Сети 3—35 кВ, имеющие воздушные линии, при токе замыкания не более 30 А выполняются с заземлением нейтрали через резистор.

Перенапряжения при несимметричном отключении фаз

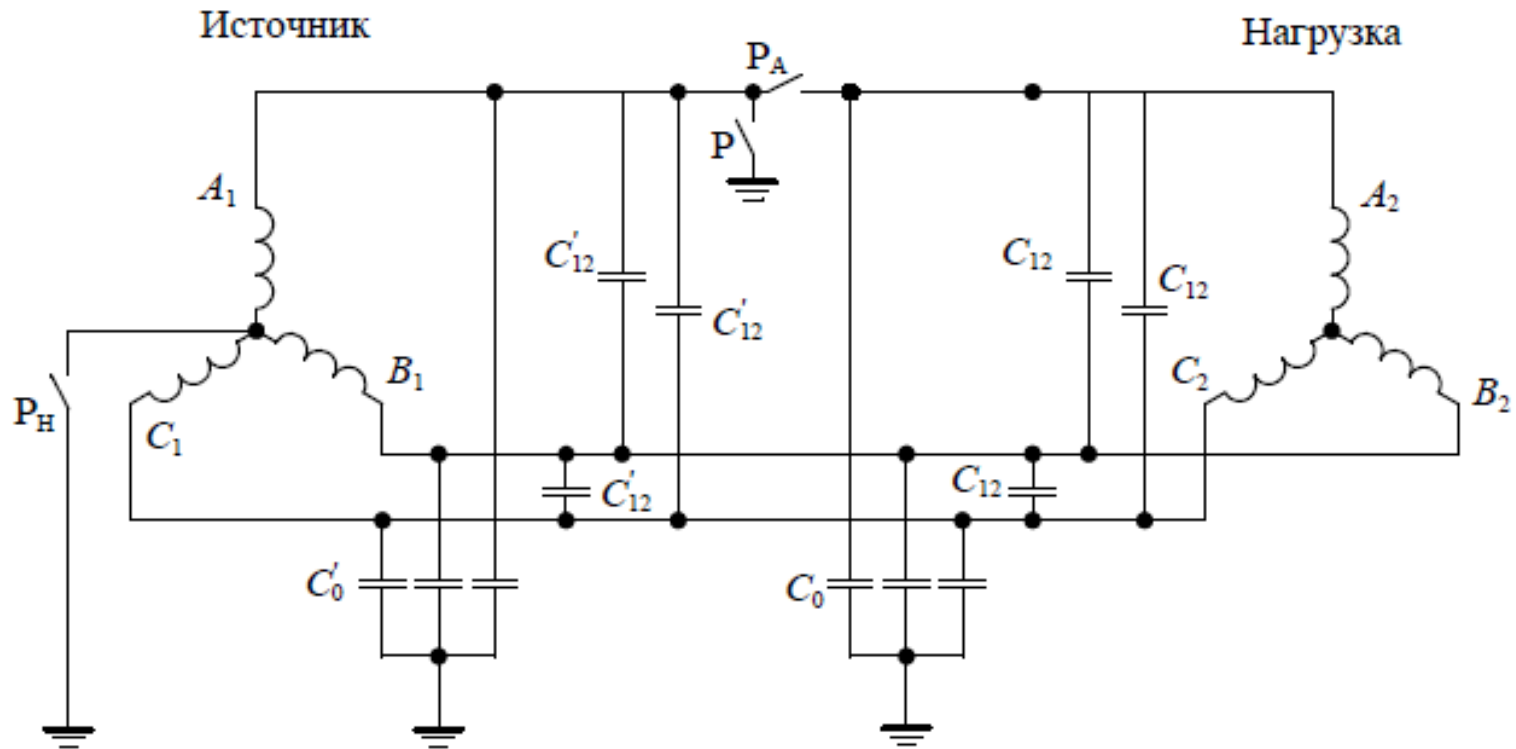


Схема для исследования перенапряжений при несимметричном отключении фаз:

A_1, B_1, C_1 — фазы источника;

A_2, B_2, C_2 — фазы нагрузки — трансформатора с изолированной нейтралью;

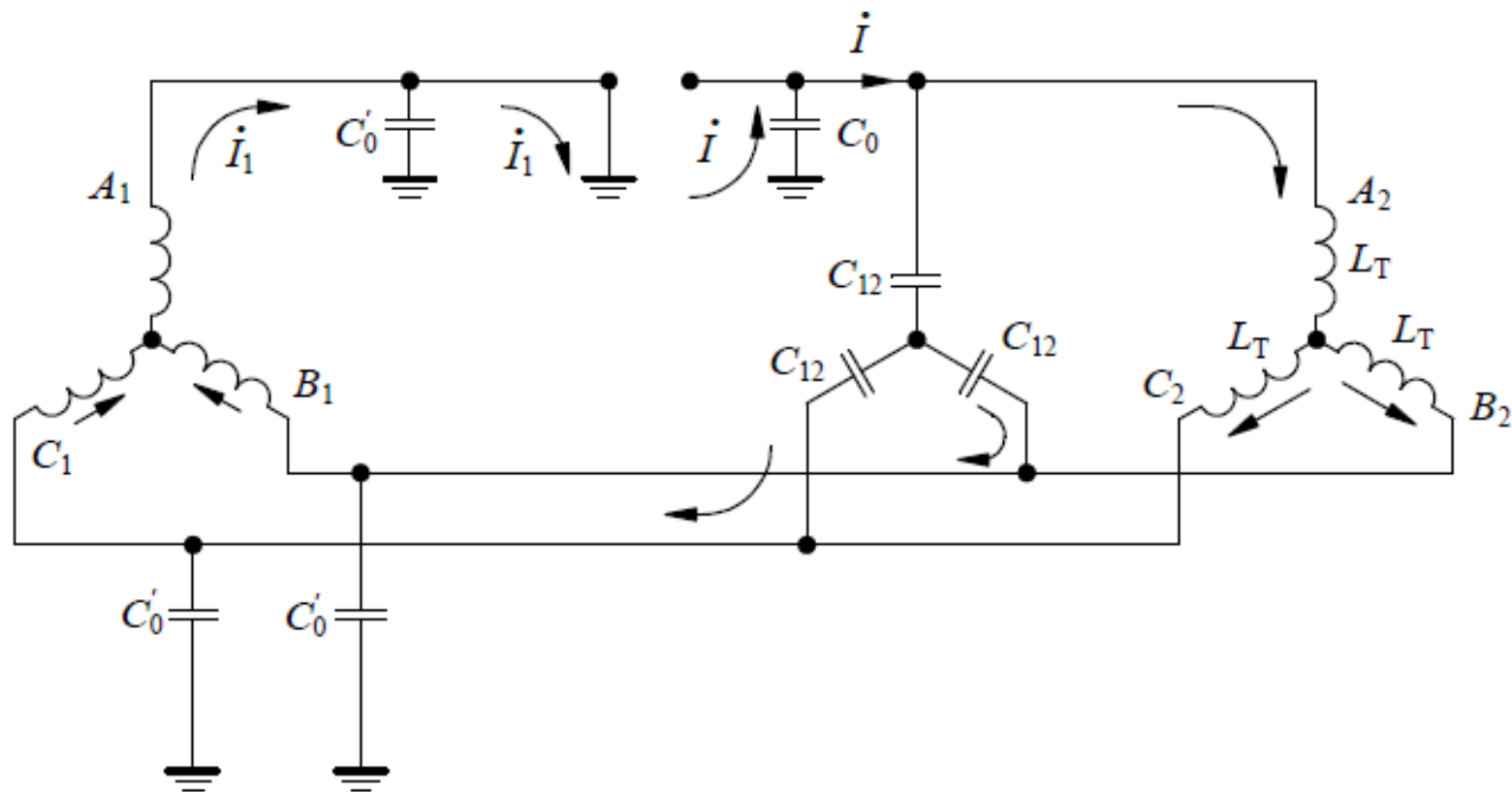
C'_{12} — междуфазные емкости системы до ключа P_A ;

C'_0 — емкости фаз на землю системы до ключа P_A ;

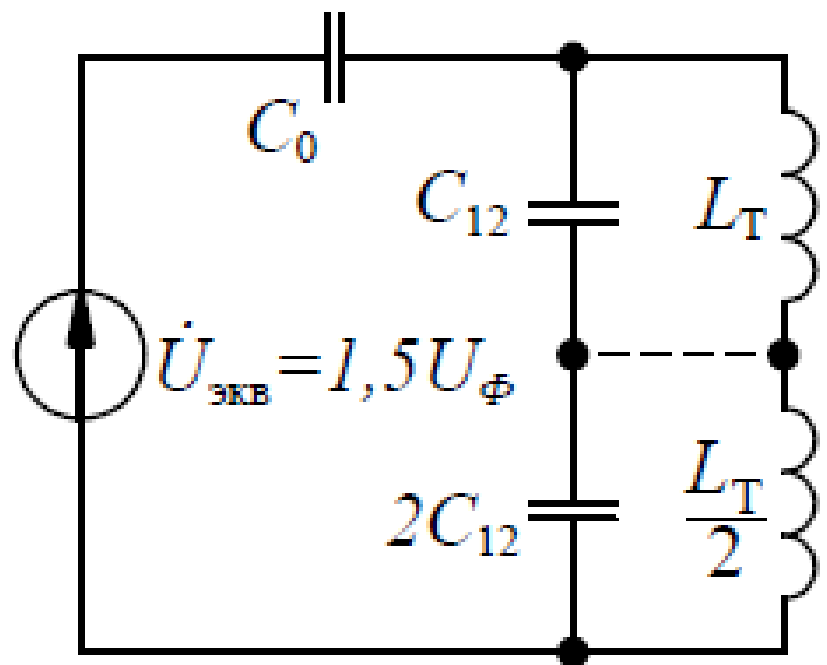
C_{12} — междуфазные емкости нагрузки;

C_0 — емкости фаз нагрузки; P, P_A, P_H — ключи

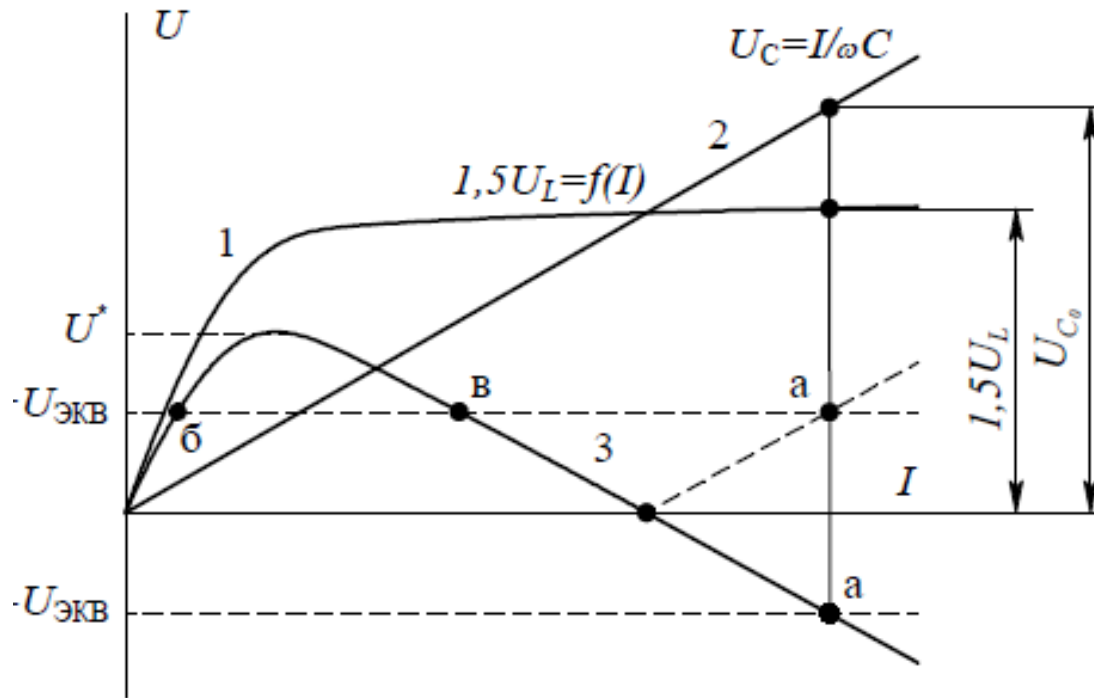
Схема замещения с несимметричной коммутацией
(один провод заземлен)



Однофазная схема замещения



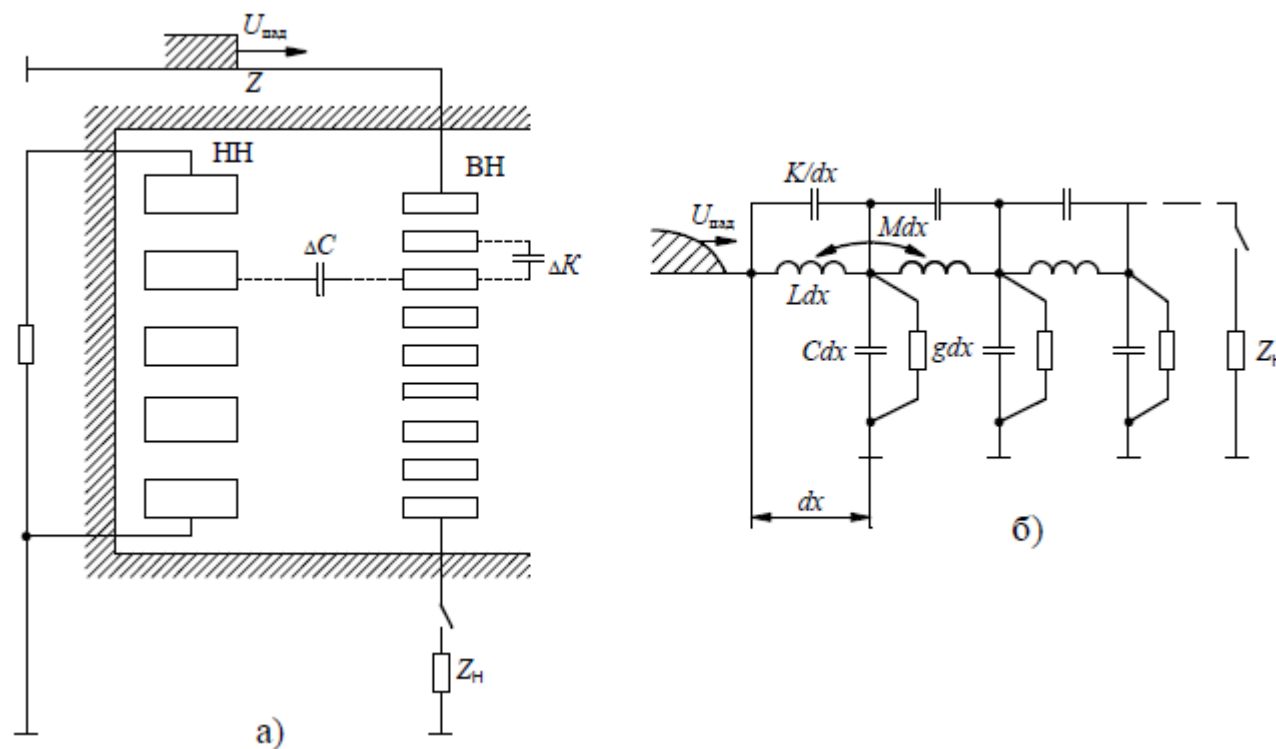
$$\dot{U}_{\text{ЭКВ}} = 1,5 \dot{U}_{\Phi} = 1,5 \dot{U}_L - \dot{U}_{C_0}$$



Графическое решение уравнения для колебательного контура с нелинейной индуктивностью:

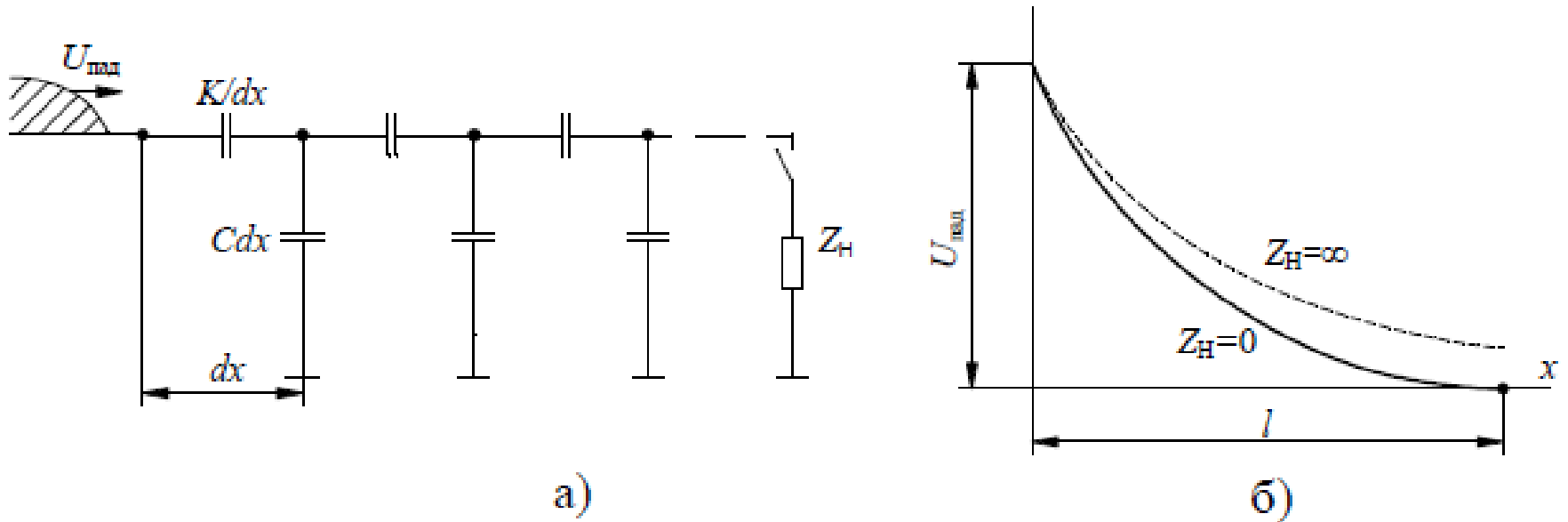
- 1 — изменение напряжения на нелинейной индуктивности (обмотке трансформатора);
- 2 — изменение напряжения на емкости;
- 3 — суммарное изменение напряжения в контуре

Волновые процессы в обмотках трансформаторов



Конструктивная схема однофазной катушечной обмотки (а)
и электрическая схема замещения (б)
высоковольтного трансформатора:
 Z_H — сопротивление нейтрали трансформатора

Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформаторов



Начальное распределение напряжения по обмотке трансформатора:
 а) — электрическая схема замещения для начального процесса ($t=0$);
 б) — распределение напряжения вдоль обмотки для $t=0$

$$U_{\text{нач}} = U_{\text{пад}} e^{-\alpha l \left(\frac{x}{l} \right)}$$

Установившийся режим (или принужденный режим)

$$U_{\text{пр}(x)} = U_{\text{пад}}(1-x/l)$$

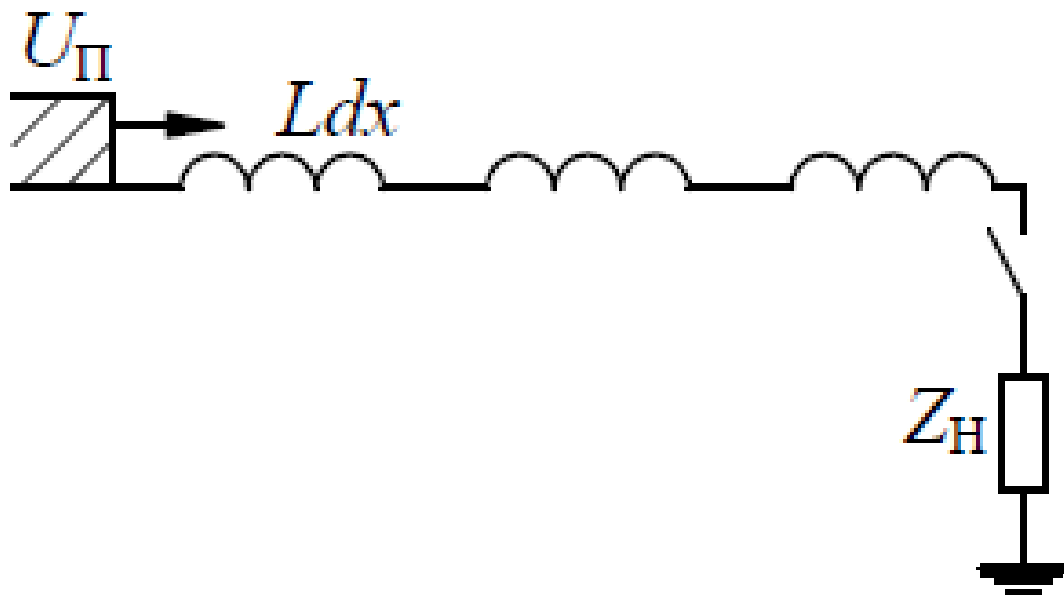
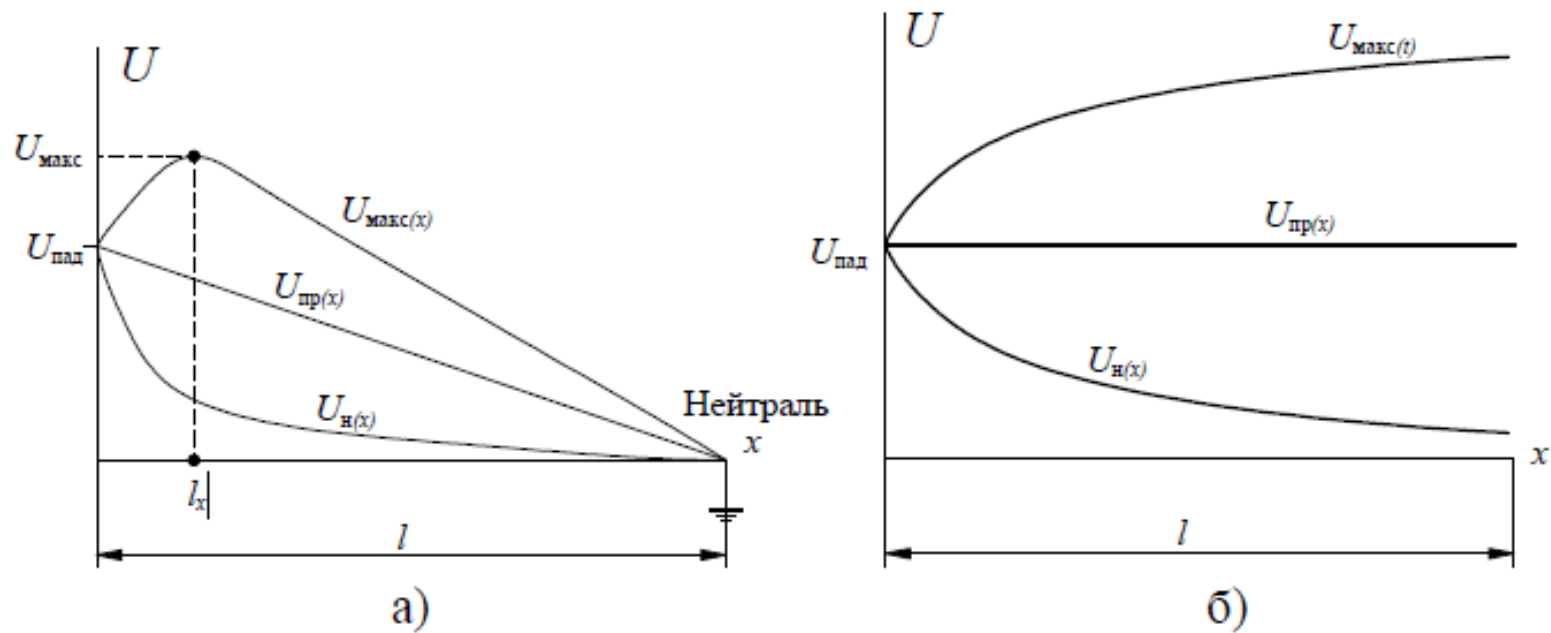


Схема замещения обмотки трансформатора в установившемся режиме

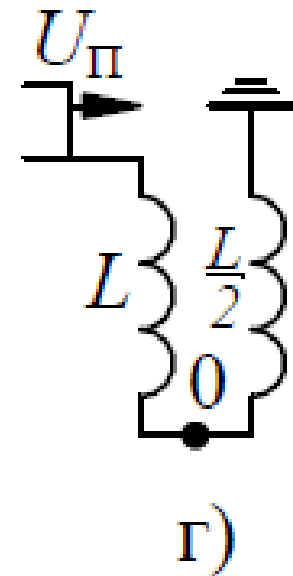
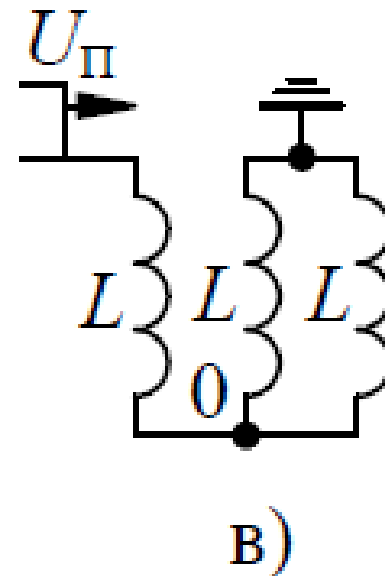
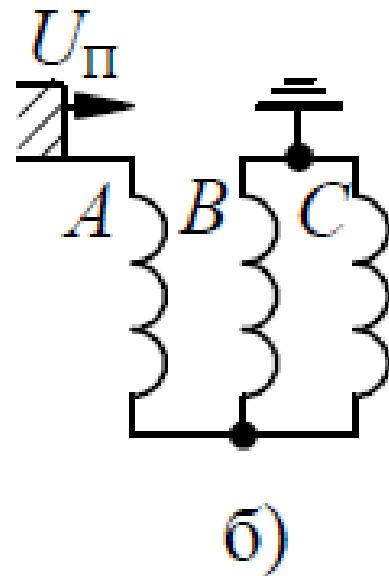
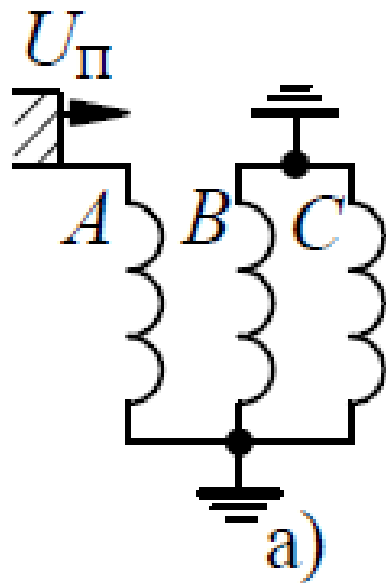


Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора в разных стадиях:

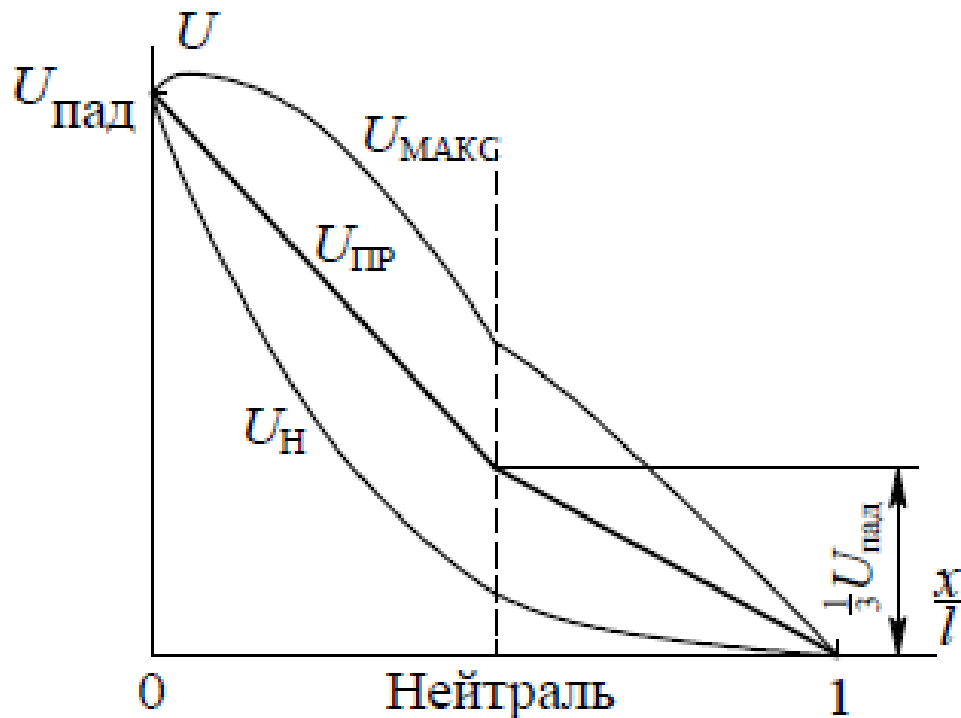
а) сопротивление нейтрали равно нулю;

б) сопротивление нейтрали равно бесконечности

Распределение напряжения вдоль обмоток 3-х фазного трансформатора



Распределение напряжения вдоль обмоток 3-х фазного трансформатора

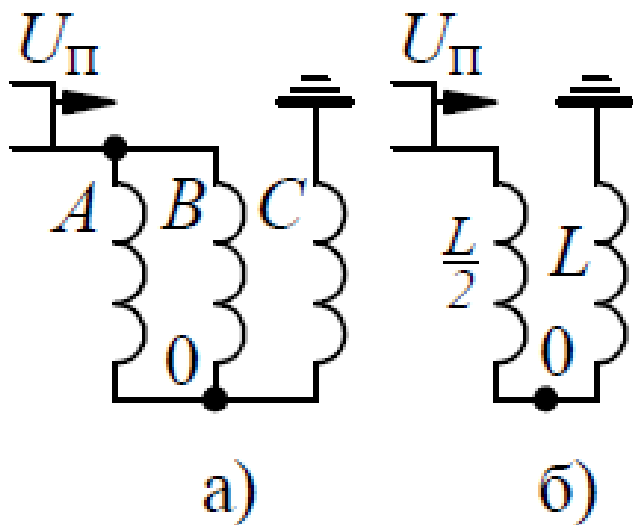


Распределение напряжения по высоковольтным обмоткам 3-х фазного трансформатора при падении волны по фазе А:

$U_{\text{н}}$ — начальное распределение падающего напряжения вдоль обмоток;

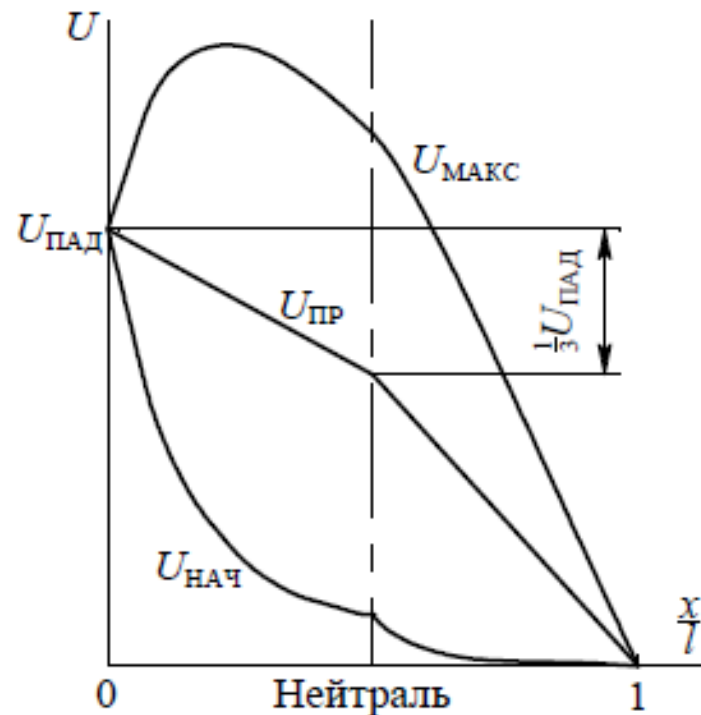
$U_{\text{пр}}$ — принужденное распределение напряжения;

$U_{\text{макс}}$ — огибающая переходного напряжения



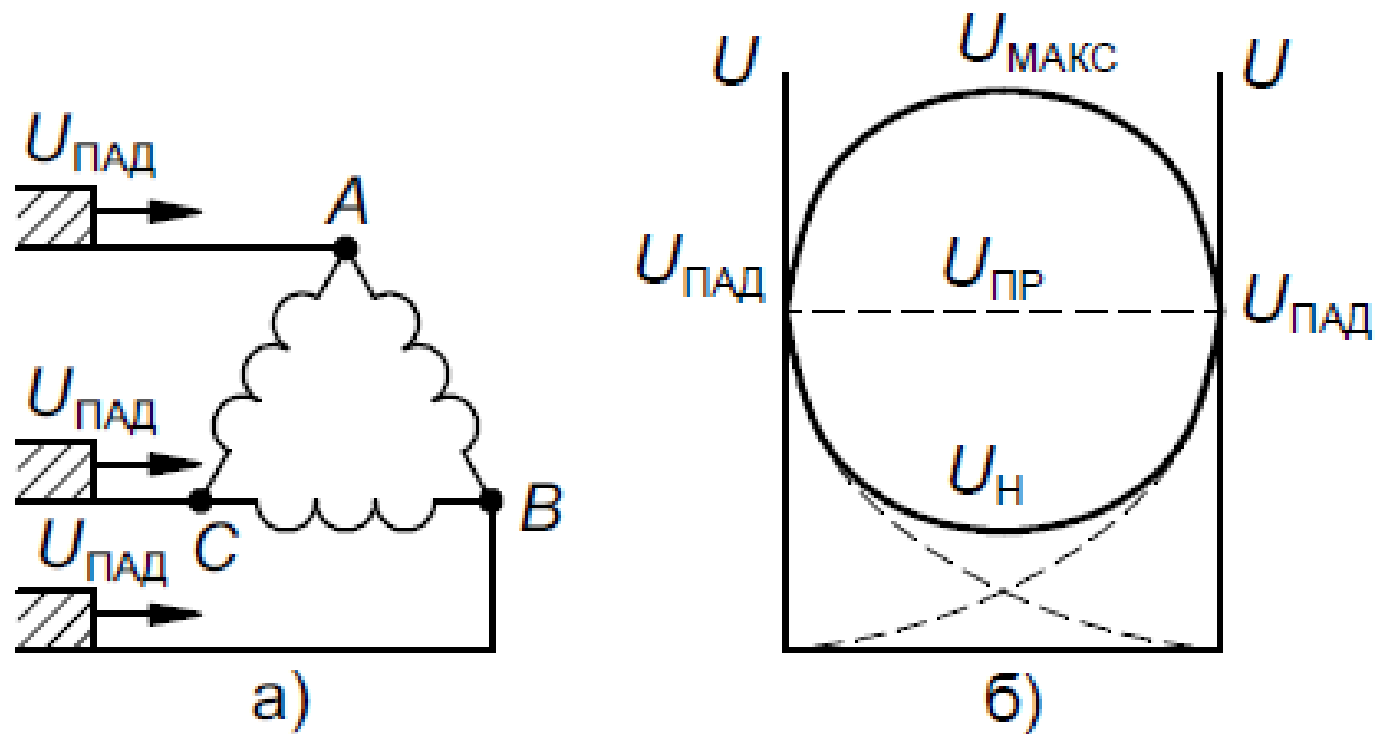
Эквивалентные схемы замещения для анализа перенапряжений в обмотках трансформаторов при падении волн по двум фазам:

а - "звезда" с изолированной нейтралью;
 б - эквивалентная схема замещения



Распределение напряжения по высоковольтным обмоткам 3-х фазного трансформатора при падении волны по двум фазам А и В:

$U_{Н}$ — начальное распределение падающего напряжения вдоль обмоток;
 $U_{ПР}$ — принужденное распределение напряжения;
 $U_{МАКС}$ — огибающая переходного напряжения

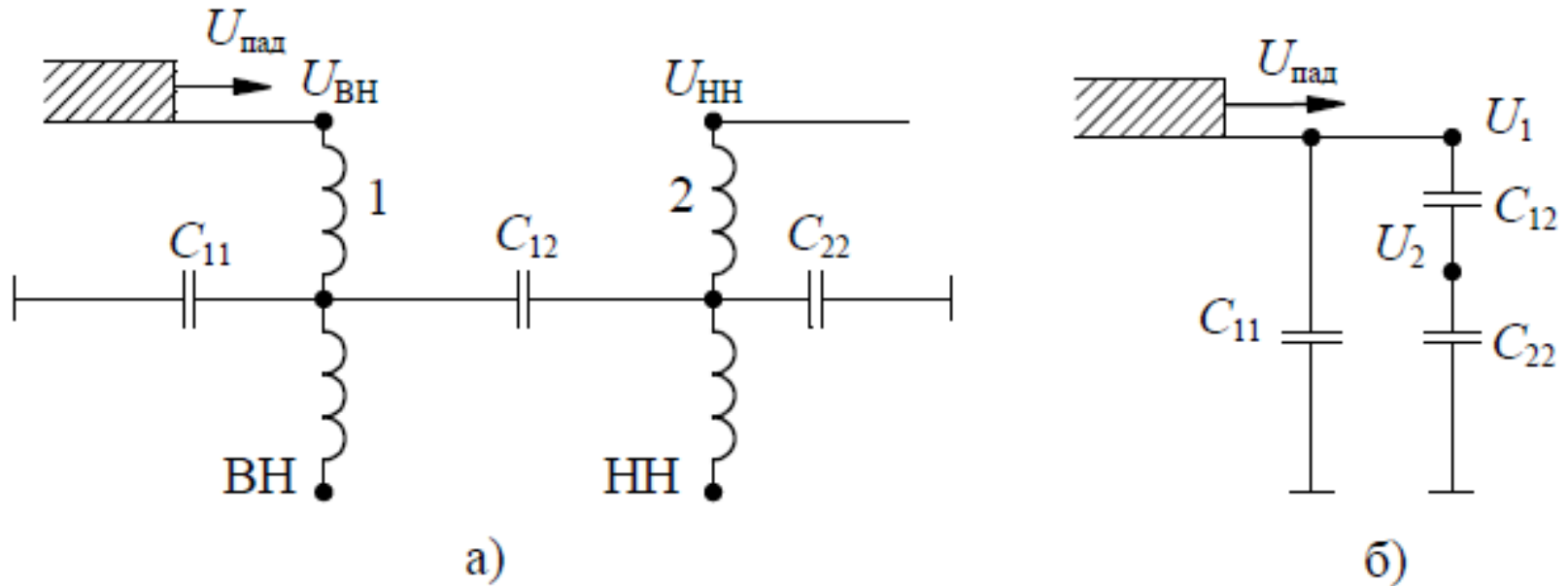


Распределение потенциалов в обмотке трансформатора, соединенного в треугольник при симметричном падении волн:

а) — падение волн по трем фазам обмотки, соединенных в треугольник;

б) — распределение напряжения в одной из фаз

Передача волн перенапряжения из одной обмотки в другую



Емкостная передача электромагнитной волны между обмотками трансформатора при приходе волны перенапряжения по одной из фаз:

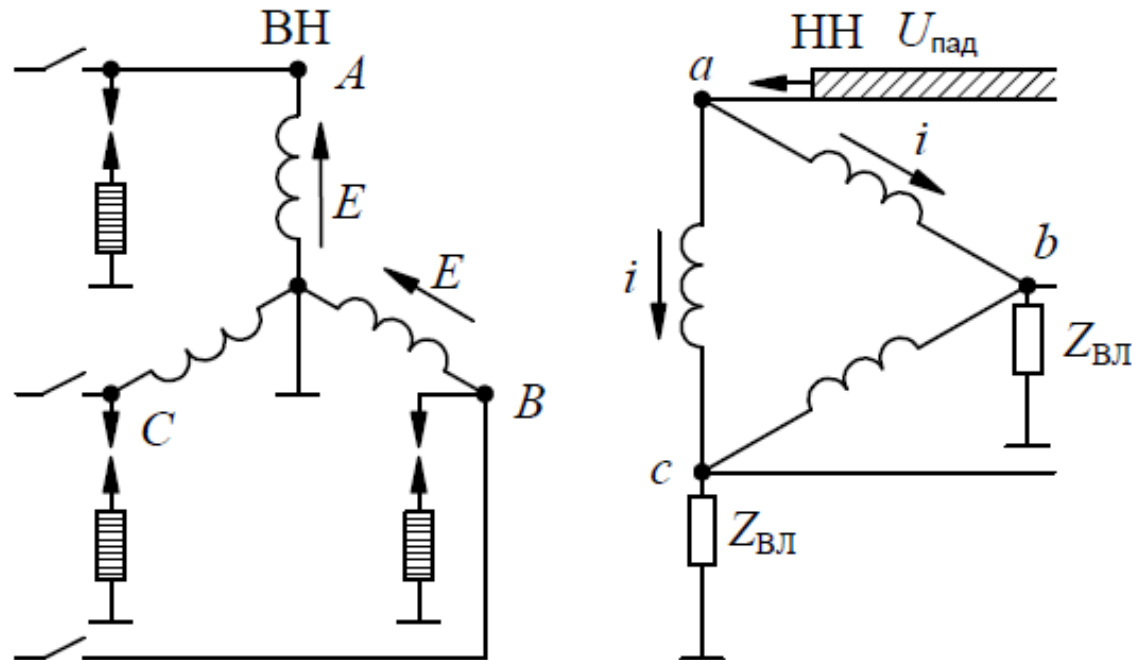
а) — общая схема замещения;

б) — эквивалентная электрическая схема для расчета

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_{12} + C_{22}}{C_{12}}$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} = U_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{22}}{C_{12}}}$$

Электромагнитная передача при падении волны перенапряжения на обмотку низкого напряжения



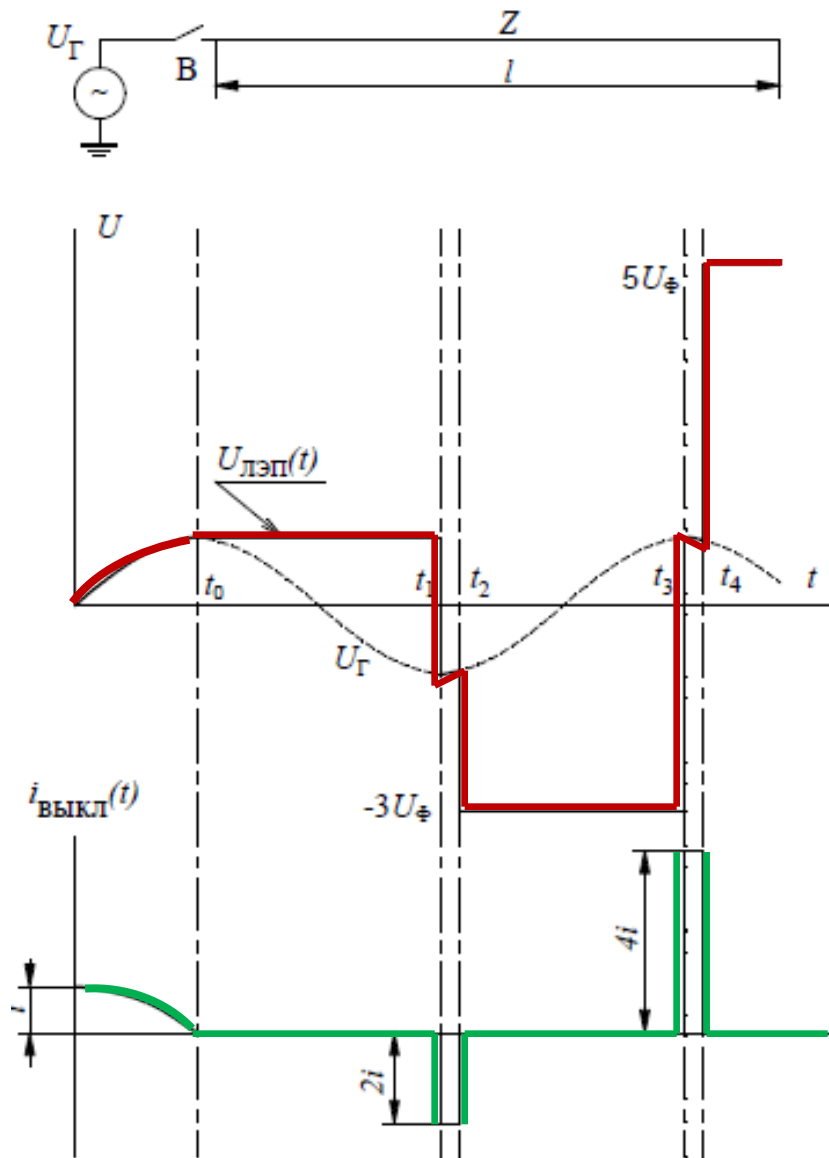
Возможны два варианта:

а) Если фазы ВН присоединены к ВЛ, то рост потенциала будет незначителен как в начале, так и в середине обмотки.

б) Если фазы АВС отсоединены от ВЛ, то $U_A = U_B = U_C \approx U_{\text{пад}} \cdot k_{\text{тр}}$, где k — коэффициент трансформации.

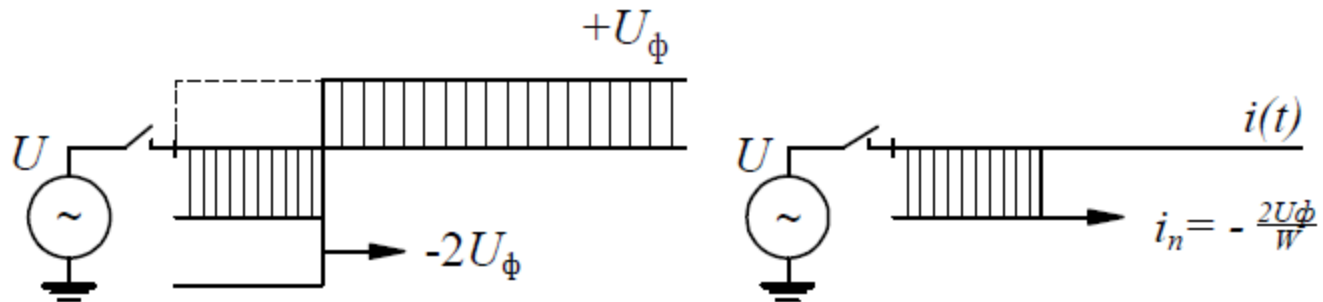
Это опасный режим и для внутренней и для внешней изоляции трансформатора. Следовательно, нужна установка защитных аппаратов от перенапряжений на выводах трансформатора.

Отключение ненагруженных ВЛ

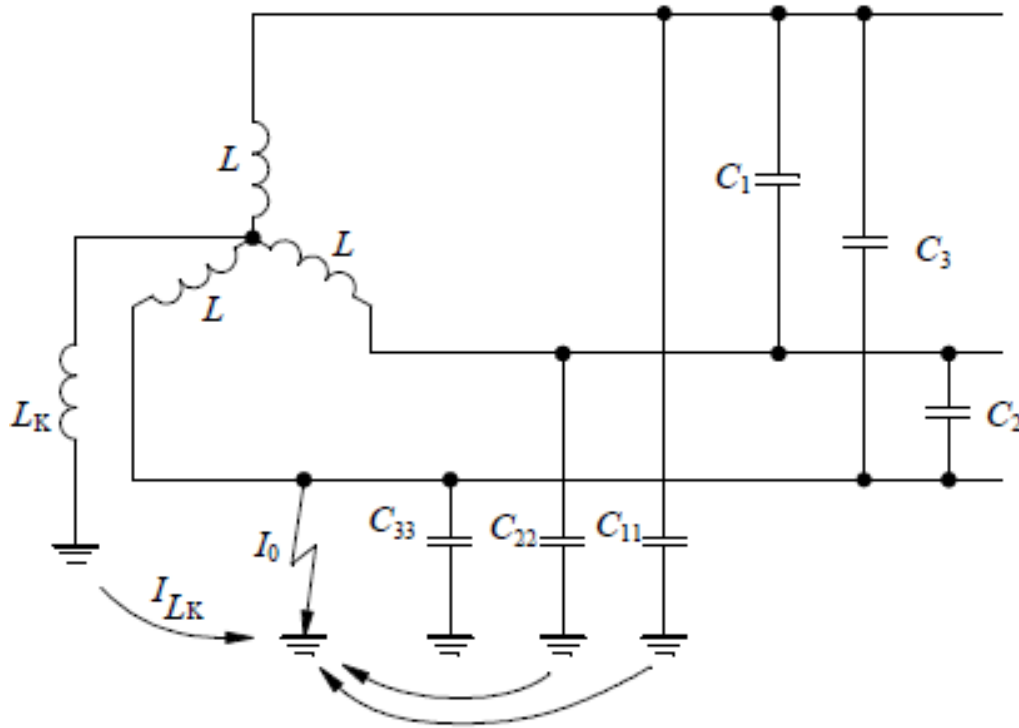


Отключение холостой линии от источника при наличии повторного зажигания

Волновые процессы при отключении холостых линий



Дугогасящие аппараты



$$I_{L_K} = \frac{U_{\Phi}}{\omega L_K}$$

Условие идеальной настройки дугогасящей катушки

$$\omega L_K = \frac{1}{3\omega C_{11}}$$

Схема замещения сети с дугогасящей катушкой:

L_K – индуктивность дугогасящей катушки;

L – индуктивность обмотки трансформатора;

C_1 , C_2 , C_3 – емкость фаз линии между собой – междуфазная емкость;

C_{11} , C_{22} , C_{33} – емкость фаз относительно земли;

I_0 – ток короткого замыкания;

I_{LK} – ток через дугогасящую катушку