

Внешние перенапряжения и молниезащита

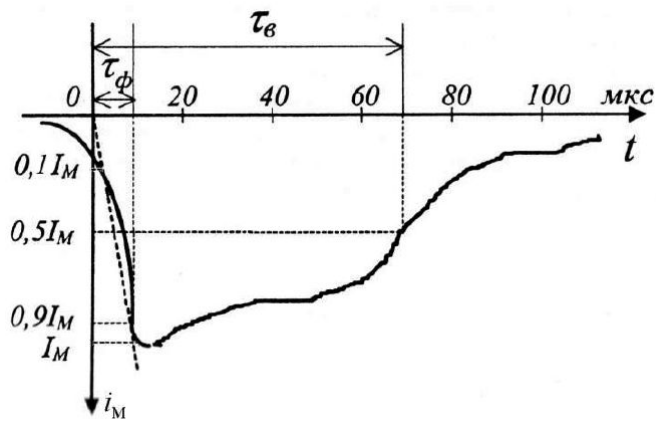
Молния – электрический разряд в атмосфере в промежутках облако-земля, облако-облако

Типовые параметры молниевых разрядов:

напряжение более 10-1000 МВ

Разрядный ток 10- 100 кА

Средняя длина 2.5 км



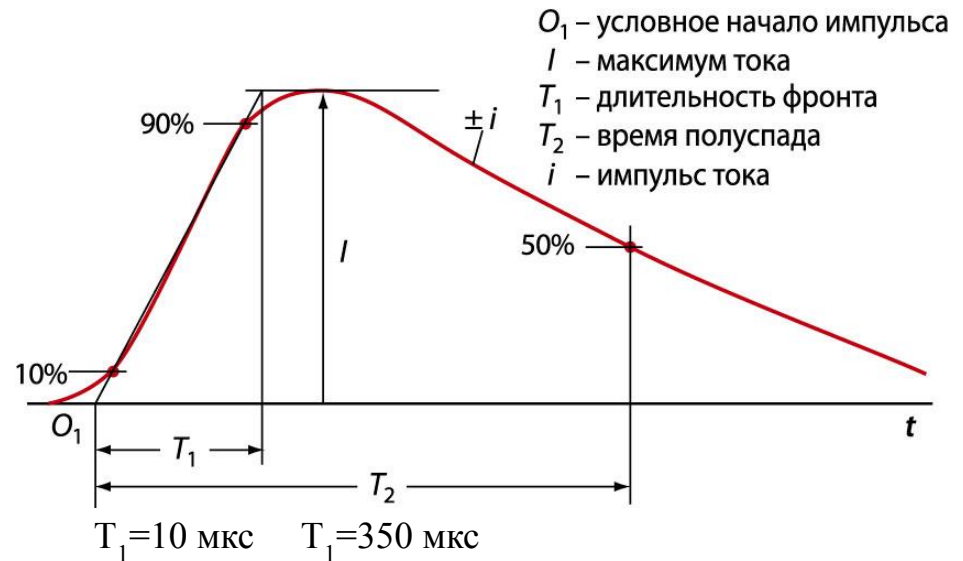
Пример реальной осциллограммы тока молнии

Главные параметры молниевых разрядов

I_M – ток молнии

$I'_M = I_M / \tau_\phi$ – крутизна тока молнии

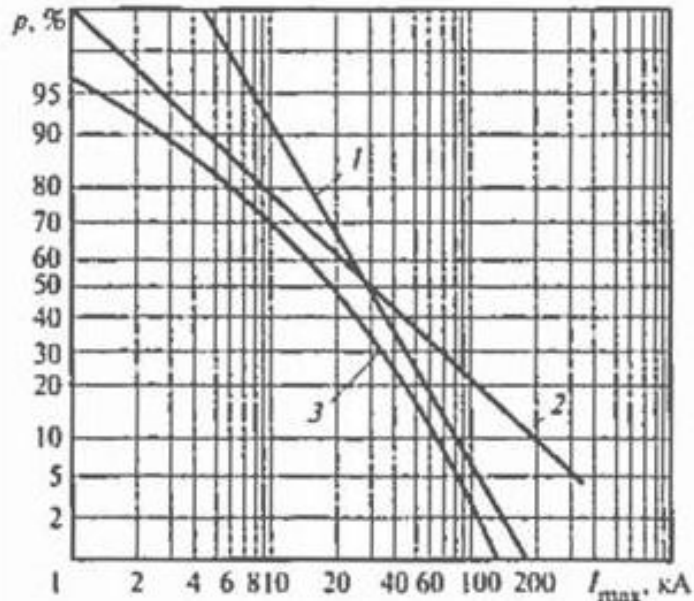
Стандартизированная форма импульса тока молнии



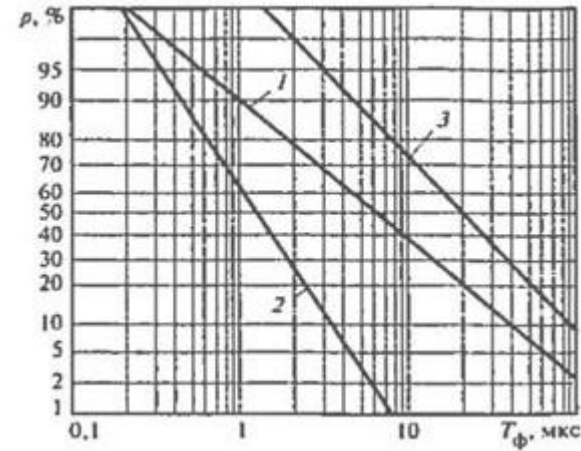
Повторные разряды следуют за первым и отличаются существенно более коротким фронтом $\tau \approx 0.6$ мкс, при вдвое меньшей длительности импульса. Средняя полная длительность молниевых разрядов 0.3 с

Полярность: отрицательные токи молнии преобладают

Статистические характеристики параметров молниевых разрядов



Вероятность максимального значения тока молнии:
 1. К.Бергер, 2. Е.Гарбагнатти 3. Аппроксимация $p = \exp(-I/60)$



Статистические данные о длительности фронта импульса тока молнии: 1. Первый импульс отрицательной молнии, 2 – Повторный импульс отрицательной молнии, 3 – Импульсы положительных молний

Интенсивность грозовой деятельности

В районе городов	Среднегодовая продолжительность гроз, ч	Плотность ударов молнии в землю, 1/км ² год
		n , 1/кв. км год
Анадырь, Верхоянск, Магадан, Мурманск, Южно-Сахалинск,		0,5
Норильск, Архангельск, Астрахань, Игарка	10-20	1,0
Иркутск, Казань, Калининград, Киров, Красноярск, С-Петербург, Москва, Ульяновск	20-40	2,0
Волгоград, Н-Новгород, Новосибирск, Псков, Ростов-на-Дону, Уфа, Чита, Екатеринбург, Челябинск	40-60	4,0
Брянск, Краснодар, Курск, Орел, Смоленск	60-80	5,5

Приближенные оценки грозовой интенсивности (число ударов молнии на 1 кв. км земной поверхности)

$n = (0.06 \dots 0.1) T_{\text{ч}}$, $T_{\text{ч}}$ среднегодовое число грозových часов
или

$n = (0.09 \dots 0.15) T_{\text{д}}$, $T_{\text{д}}$ среднегодовое число грозových дней

Число прямых ударов молнии (ПУМ) в объект за год
 S_p - расчетная площадь «стягивания» молнии на объект

$$N_{\text{ПУМ}} = n S_p$$

Одиночный сосредоточенный объект высотой h , $h < 150$ м

$$N_{\text{ПУМ}} = 10^{-6} n \pi r_{\text{э}}^2, \quad r_{\text{э}} = (3 \dots 3.5) h \text{ [м]}$$

Открытые наземные объекты (открытые распределительные устройства - ОРУ)

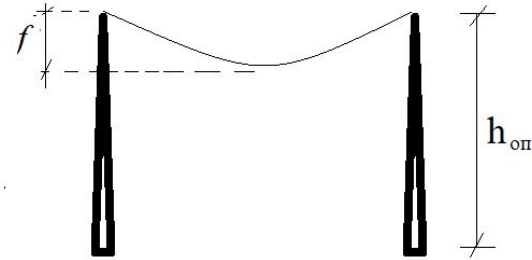
$$N_{\text{ПУМ}} = n S_p = n (l + 7h)(b + 7h) \cdot 10^{-6} \quad l, b - \text{длина и ширина территории объекта (м)}$$

h - высота молниеотводов или объекта при их отсутствии (м)

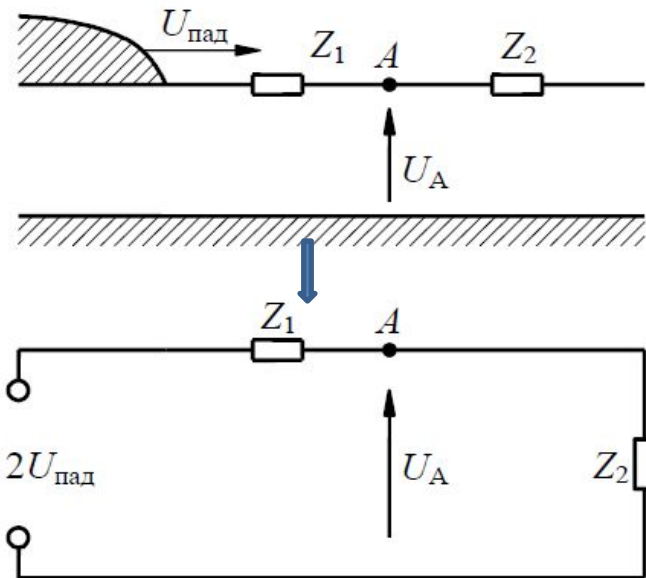
Протяженные объекты – линии электропередачи

$N_{ПУМ}^*$ - число прямых ударов молнии на 100 км длины и на 100 грозовых часов

$$N_{ПУМ}^* = (4...6)h_{ср}, \quad h_{ср} = h_{оп} - 2f/3, м$$



Отражение и преломление волн в узловых точках



$$U_{прел} = U_{пад} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha U_{пад};$$

$$U_{отр} = U_{пад} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta U_{пад};$$

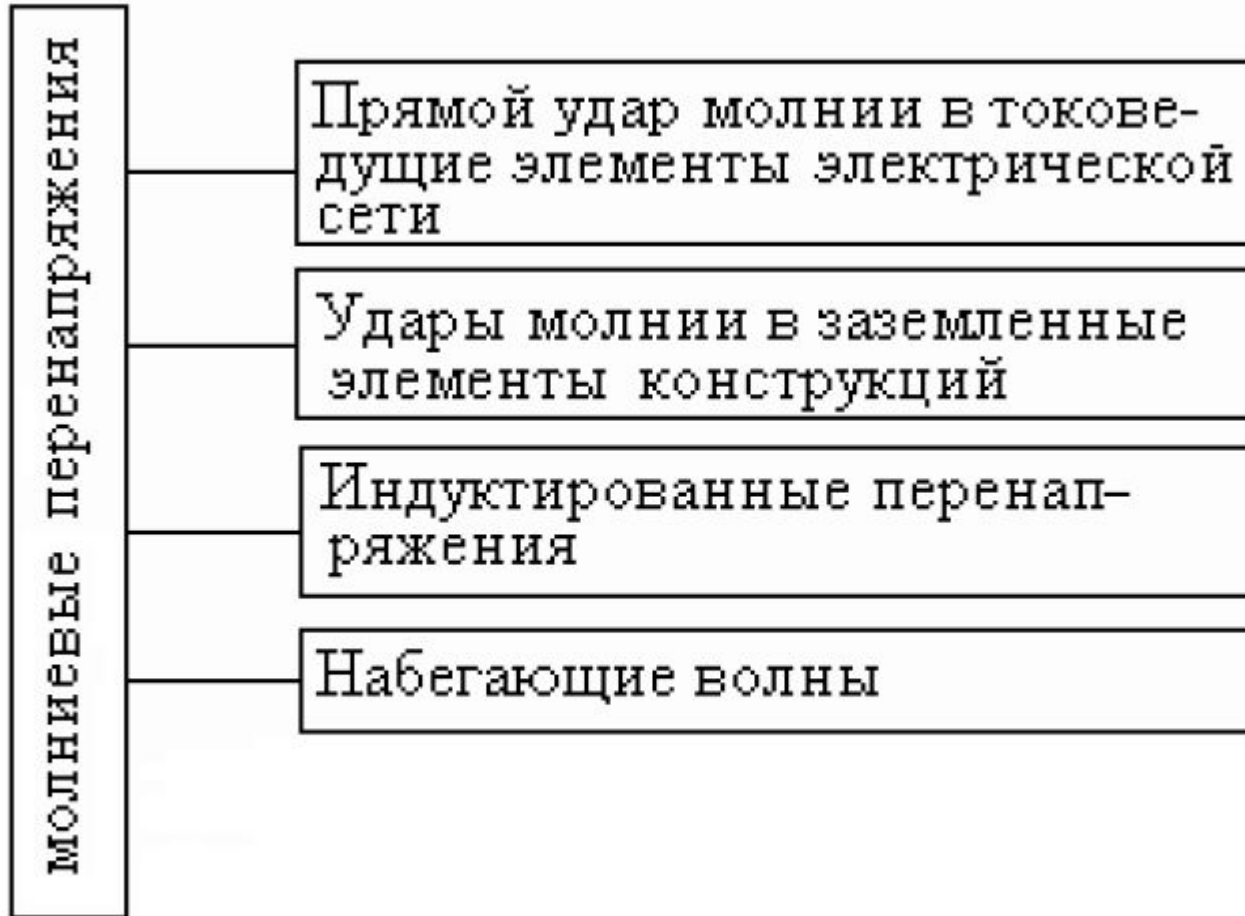
1. Конец линии (точка A) разомкнут, $Z_2 = \infty$:

$$U_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{пад} = 2U_{пад}.$$

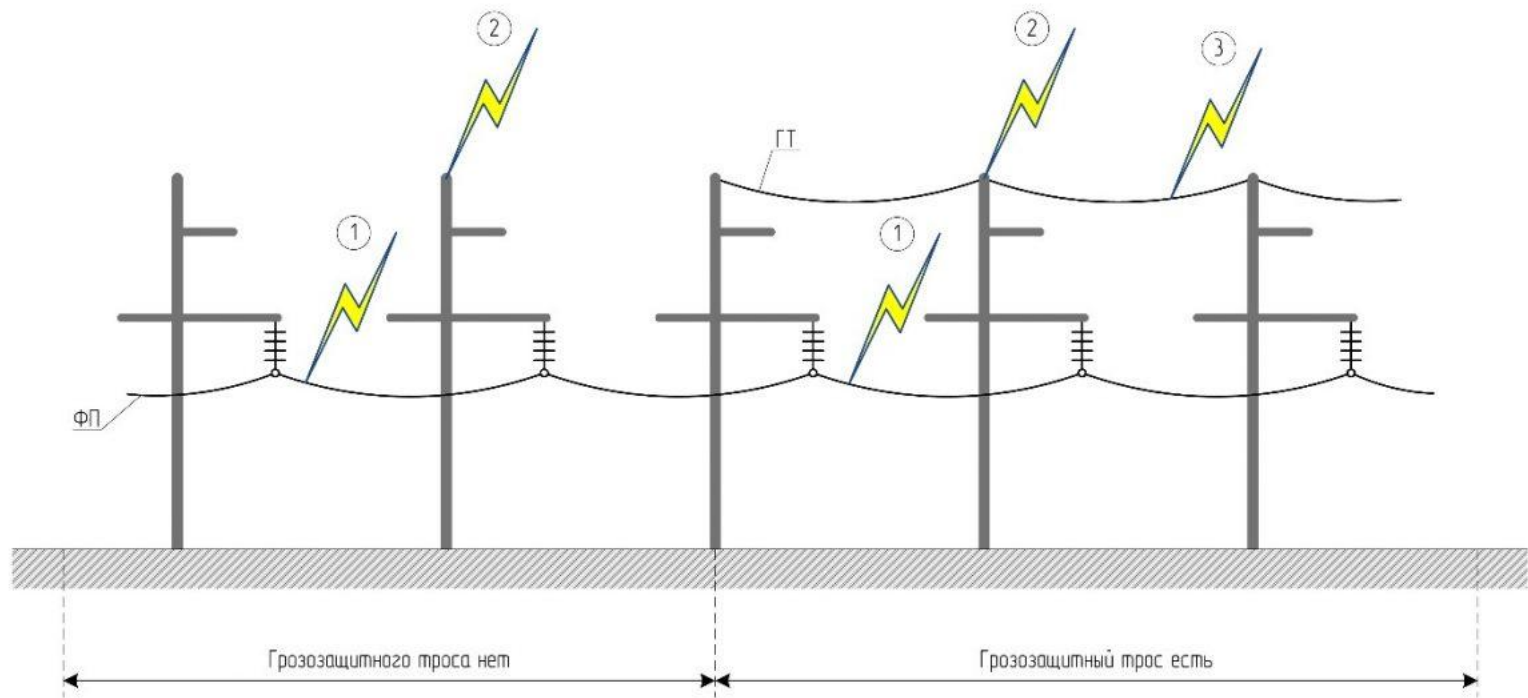
2. Конец линии замкнут на землю $Z_2 = 0$

$$U_A = 0 \quad U_{отр} = -U_{пад}$$

Классификация молниевых перенапряжений



Прямой удар молнии (ПУМ). Это наиболее опасный вид перенапряжений: ток в точке удара до 100 кА , напряжение до 10 МВ. Любая изоляция при таких параметрах будет перекрыта. Поэтому желательно обеспечить надежную защиту проводов линии и оборудования подстанций от прямых ударов молнии с помощью стержневых и тросовых молниеотводов.



Удар молнии в заземленные элементы конструкции приводит к возникновению на них кратковременных перенапряжений, которые могут вызвать *обратные перекрытия* с заземленных элементов на токоведущие. Для защиты от обратных перекрытий необходимо обеспечить малое сопротивление заземления опор, корпусов электрооборудования и молниеотводов на линиях и подстанциях

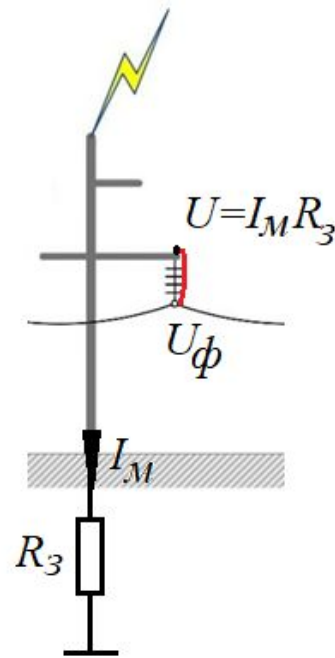
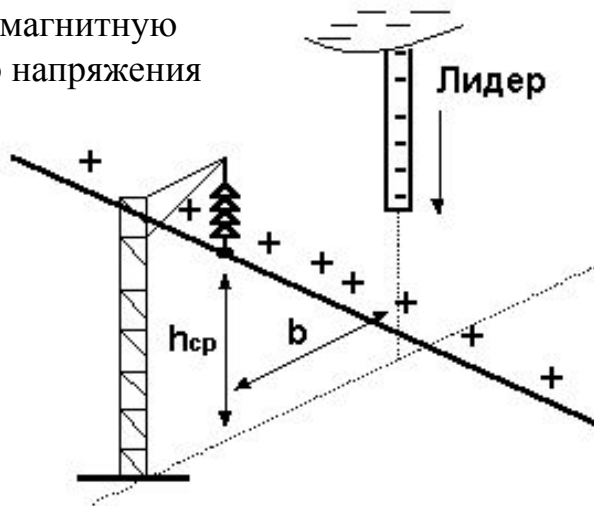


Схема обратного перекрытия изоляции при ударе молнии в опору

Индуктированные перенапряжения — результат взаимной магнитной (индуктивной) и электрической (емкостной) связи канала молнии с токоведущими и заземленными элементами электрической сети. $U_{инд} = U_{индэ} + U_{индм}$

Изменение магнитного поля главного разряда наводит в контуре опора - провод - ближняя опора - земля ЭДС, вызывающую магнитную составляющую индуктированного напряжения

$$U_{индм} = k_m I_m \frac{h_{cp}}{b}$$



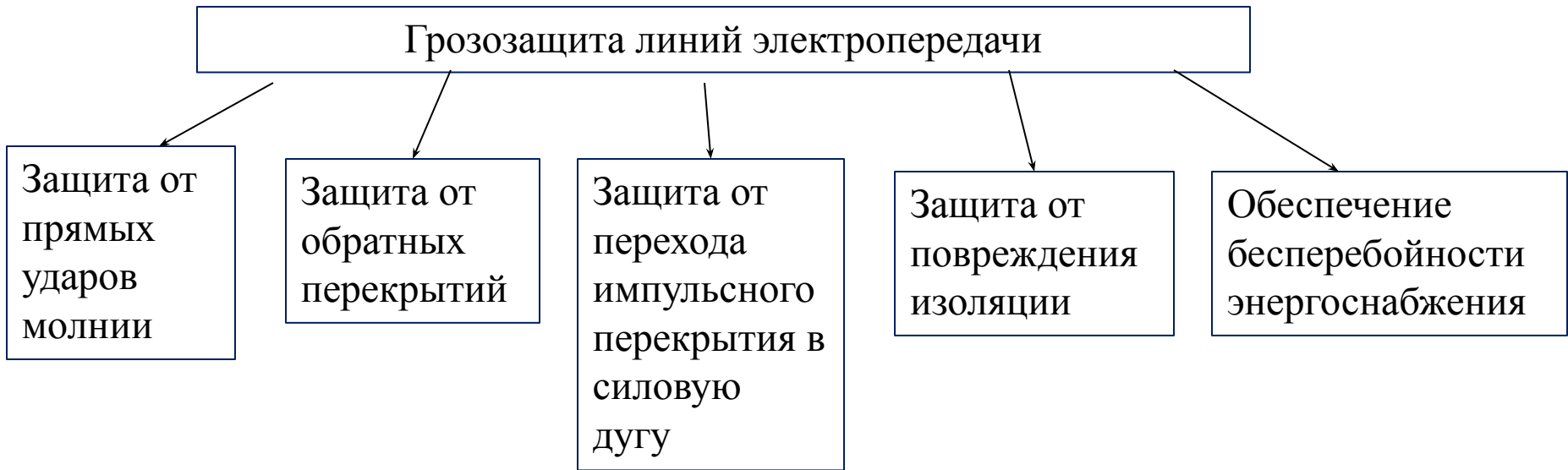
Напряжение на проводе в момент нейтрализации заряда лидера

$$U_{индэ} = k_э I_m \frac{h_{cp}}{b}$$

Распространяется по проводу в обе стороны в виде волны напряжения

$$U_{инд[B]} = (k_m + k_э) I_m \frac{h_{cp}}{b} \cong 30 I_{m[A]} \frac{h_{cp}}{b}$$

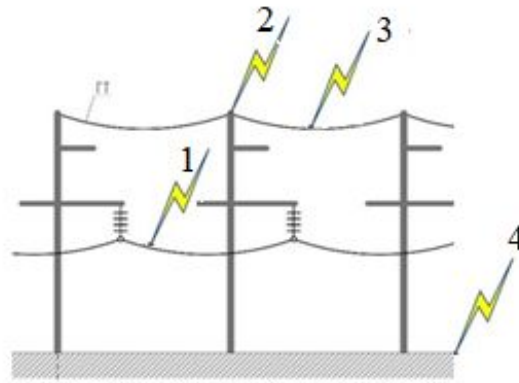
Задачи грозозащиты линий



Критерии качества грозозащиты

- 1. Уровень грозоупорности.** Наибольший расчетный ток I_m , возникающий вследствие прямого удара молнии, не приводящий к перекрытию изоляции
- 2. Кривая опасных токов молнии.** Учет влияния комбинации параметров молнии I_m и I'_m ,
- 3. Показатель надежности грозозащиты.** Число лет безаварийной работы τ

Расчетные случаи поражения линии молнией

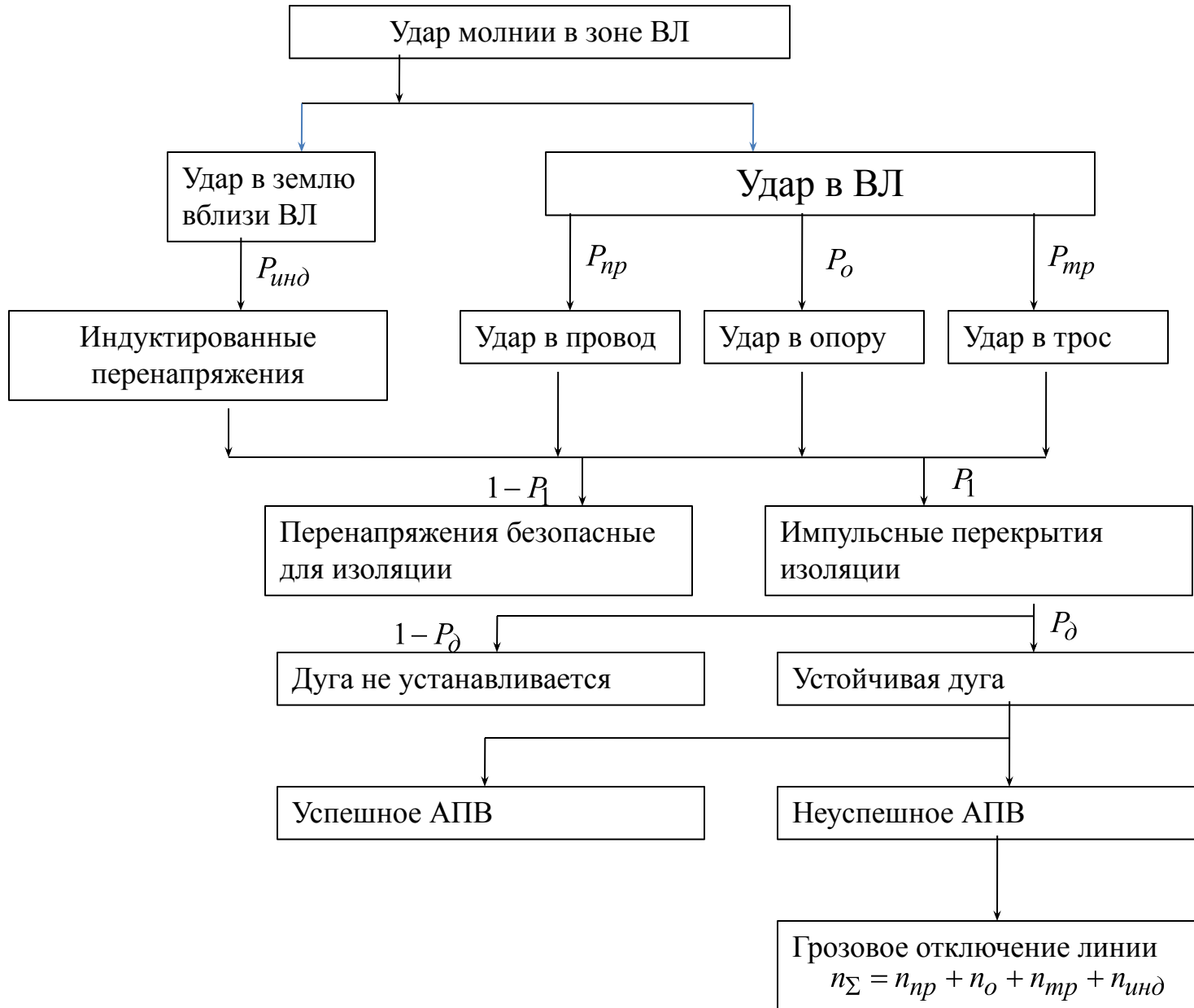


- 1) Удар молнии в провод с последующим перекрытием с провода на опору или между проводами
- 2) Удар молнии в вершину опоры с последующим перекрытием с опоры на провод
- 3) Удар молнии в пролет троса с последующими перекрытием с троса на провод или землю
- 4) Удар молнии вблизи линии, сопровождающийся появлением перекрытий вследствие индуктированных перенапряжений

Суммарное число грозовых отключений в год

$$n_{\Sigma} = n_{np} + n_o + n_{tr} + n_{инд}$$

Схема развития грозовых аварий ВЛ



Число отключений линии при ударе молнии в провод

$$n_{np} = N_{ПУМ} P_{np} P_{l\ np} P_{\partial} (1 - P_{АПВ})$$

Вероятность прорыва тросовой защиты

Вероятность перекрытия гирлянды

Вероятность зажигания силовой дуги

Вероятность успешного АПВ

Вероятность прорыва молнии проводам сквозь тросовую защиту

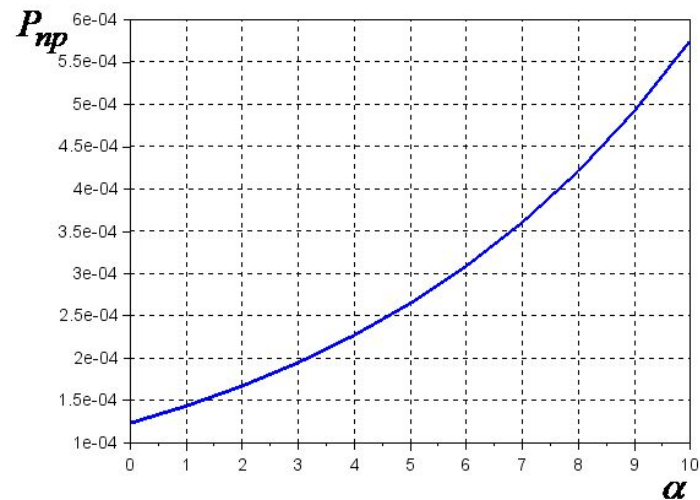
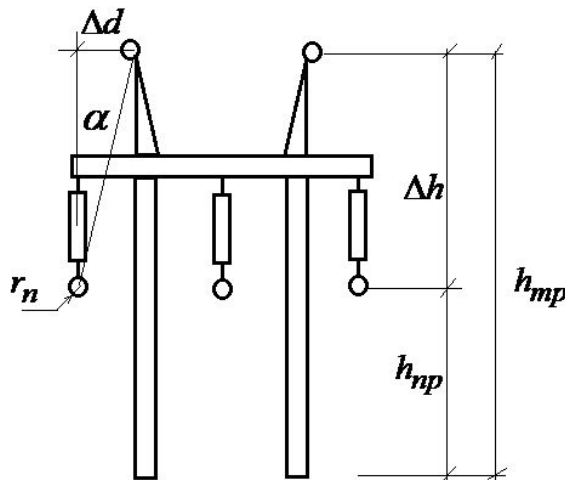
(по опытным данным)

$$P_{np} = \exp\left(\frac{1}{D} \left(3.2 \frac{\Delta d}{\Delta h}\right) \sqrt{\frac{h_{mp}}{\Delta h} - \frac{9}{D}}\right)$$

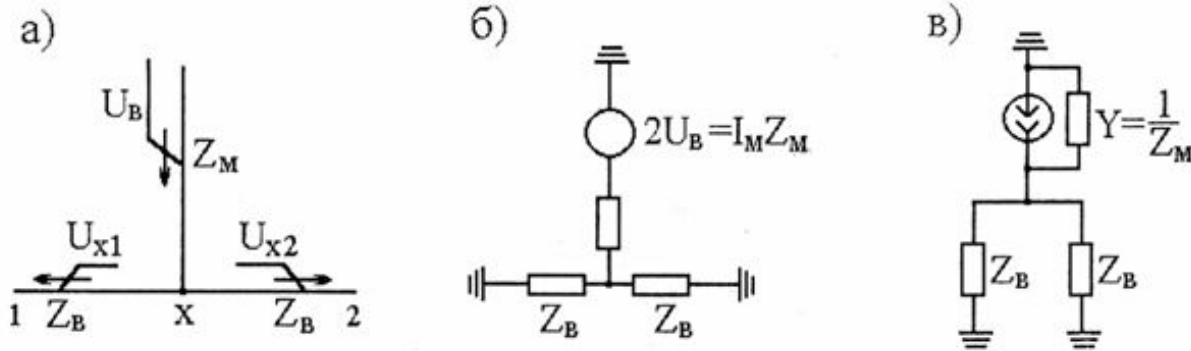
$$D = 1 + \frac{U_{n[kB]}}{100\Delta h} \left(0.75 \frac{h_{mp}}{\Delta h} \frac{Q}{Q + Q_0}\right)$$

$$Q_0 = 200^{1+0.1 \cdot U_{n[kB]}}$$

$$Q = \frac{U_{n[kB]}}{\ln \frac{2h_{mp}}{r_{np}}}$$



Вероятность перекрытия гирлянды при прорыве молнии

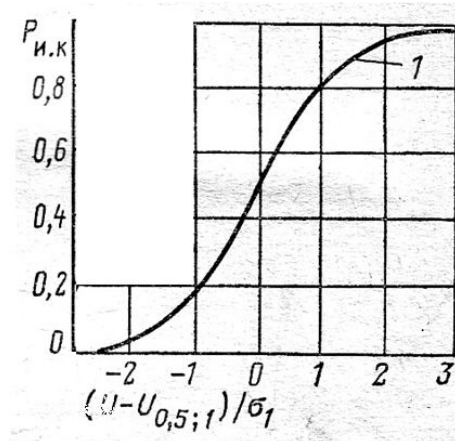


Эквивалентная схема для расчета величины напряжения на проводе при прорыве молнии сквозь тросовую защиту

Волновое сопротивление канала молнии $Z_M = 140(1 + 240/I_M[\text{kA}])$, Ом I_M - расчетный ток молнии

Волновое сопротивление провода $Z_6 = k \cdot 60 \ln \frac{2h_{np}}{r_{II}}$ б, $k = 0.9$ (учет короны)

$$Z_9 = \frac{Z_M Z_6 / 2}{Z_M + Z_6 / 2} \quad P_l = P(I_M Z_9)$$



$P(U)$
- закон распределения разрядных напряжений гирлянды

Грозоупорность $I_{M np} = U_{имп} / Z_9$

$U_{имп}$ - импульсная электрическая прочность изолирующей подвески

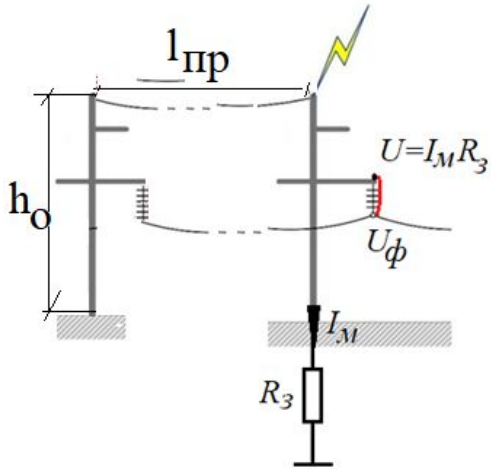
Вероятность установления силовой дуги

Из опыта эксплуатации $P_{\partial} = 1.6U_{\text{раб}}[\text{kV}] / l_{\text{пер}}[\text{см}] - 0.06$ $U_{\text{раб}}$ - эффективное значение рабочего напряжения вдоль пути перекрытия
 $\text{if } P_{\partial} < 0.1 \quad P_{\partial} = 0.1$ $l_{\text{пер}}$ - суммарная длина пути импульсного перекрытия

Вероятность успешного АПВ

Сети 3 ... 35 кВ	$P_{\text{АПВ}} = 0.5$
Сети 110 ... 500 кВ	$P_{\text{АПВ}} = 0.7-0.8$

Число отключений воздушной линии при обратных перекрытиях с опоры на провод



$$n_o = N_{ПУМ} P_{он} P_{l_{op}} P_{\partial} (1 - P_{АПВ})$$

$P_{он}$ - вероятность попадания молнии в опору или трос вблизи опоры

$$P_{он} \approx \frac{4h_o}{l_{np}}$$

$P_{l_{op}}$ - вероятность обратных перекрытий = вероятность появления параметров молнии, при которых напряжения на изоляции превысит импульсную электрическую прочность

При $\tau_{\phi} \gg h_o / c$ опора замещается индуктивностью

$$L_o = L'_o h_o, \quad L'_o = 0.5 - 0.7 \text{ мкГн/м}$$

Индуктивность заземлителя

$$L_{3u} \ll L_o$$

Эффект отвлечения тока в грозотрос

$$I_{он} = \chi I_M, \quad \chi < 1$$

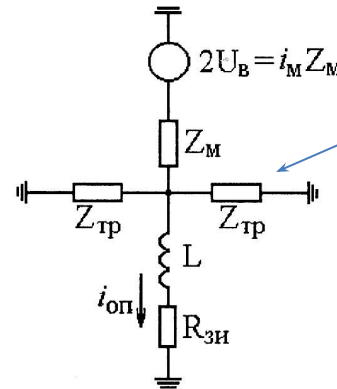
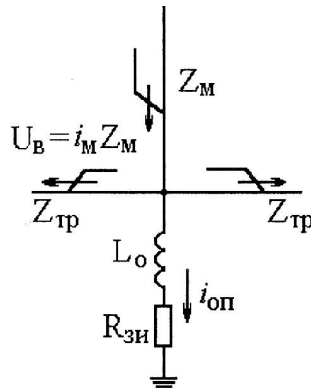
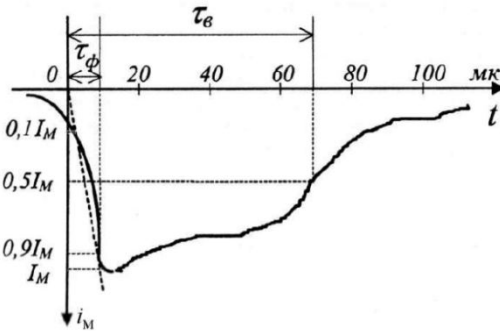


Схема замещения для расчет тока опоры при ударе молнии в ее вершину до прихода отраженных волн!!!!

$$\chi = \frac{Z_M \cdot (R_{3u} \parallel Z_{mp} / 2)}{[Z_M + (R_{3u} \parallel Z_{mp} / 2)] \cdot R_{3u}} = \frac{Z_M \parallel Z_{mp} / 2 \parallel R_{3u}}{R_{3u}}$$

$$l_{np} = 300 - 600 \text{ м} \quad t_{отр} = \frac{2l_{np}}{c} = 2 - 4 \text{ мкс}$$

На фронте импульса $t < \tau$ напряжение в вершине опоры

$$U_o = \chi I_M R_{3u} + \chi I'_M L_o, \quad I'_M = I_M / \tau_{\phi}$$

Обычно $\chi = 0.8 - 0.95$

С учетом магнитной связи канал разряда молнии – петля: трос-опора

$$U_o = \chi R_{uz} I_M + I'_M (\chi L_o + M_{oM}), \quad M_{oM} = M'_{oM} h_{on}, \quad M'_{oM} \approx 0.2 \text{ мкГн/м}$$

Условие обратного перекрытия гирлянды:

Напряжение приложенное к гирлянде изоляторов превышает разрядное напряжение, зависящее от времени приложения напряжения τ

$$U_o + U_{раб} \geq U_{разр}(\tau)$$

$$\chi R_{uz} I_M + I'_M (\chi L_o + M_{oM}) = U_o$$

$$\chi R_{uz} I_M + I'_M (\chi L_o + M_{oM}) > U_{разр}(I_M, I'_M) - U_{раб}$$



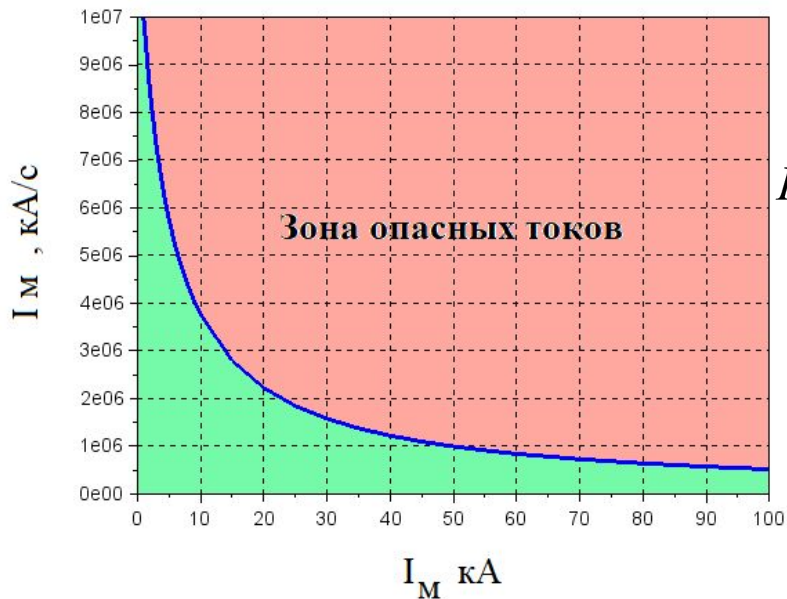
Физические факторы, учитываемые при при более строгом анализе процесса удара молнии в вершину опоры или грозотрос:

- Образование короны на тросе
- Отраженные от соседних опор волны напряжения и тока
- Изменение (рост) во времени длины канала главного (обратного) разряда и его влияние на электромагнитную связь грозотроса и молнии

Аппроксимация кривой опасных волн $(I_M - I_{M \min}) I'_M = A$

Две точки для определения параметров A , $I_{M \min}$ берутся при $\tau_{\phi 1} = 2 \text{ мкс}$, $\tau_{\phi 2} = 10 \text{ мкс}$

$$I_{M \min} = \frac{I_{M1} I'_{M1} - I_{M2} I'_{M2}}{I'_{M1} - I'_{M2}} \quad A = \frac{I_{M1} - I_{M2}}{I'_{M1} - I'_{M2}} I'_{M1} I'_{M2}$$



Вероятность перекрытия гирлянды при

$$P_{1 \text{ on}} = P(I_M, I'_M) = \sqrt{1 + \pi \sqrt{abA}} \exp(-a I_{M \min} - 2\sqrt{abA})$$

$$a = 0.04 \text{ 1/кА} \quad b = 0.08 \text{ мкс/кА}$$

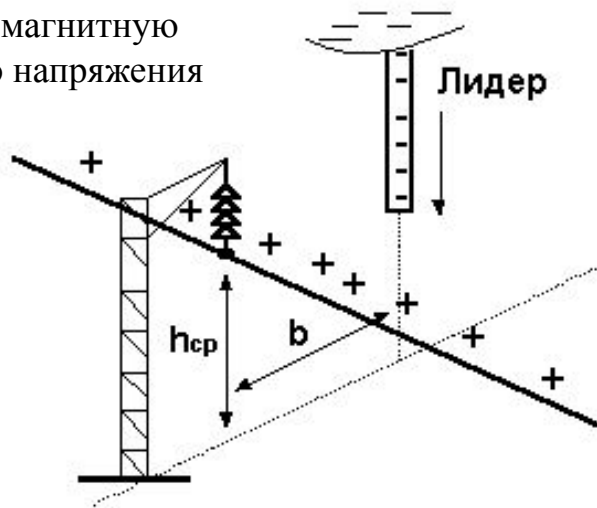
Отключения при ударе молнии вблизи линии

Индуктированные перенапряжения — результат взаимной магнитной (индуктивной) и электрической (емкостной) связи канала молнии с токоведущими и заземленными элементами электрической сети.

$$U_{инд} = U_{индэ} + U_{индм}$$

Изменение магнитного поля главного разряда наводит в контуре опора - провод - ближняя опора - земля ЭДС, вызывающую магнитную составляющую индуктированного напряжения

$$U_{индм} = k_m I_m \frac{h_{cp}}{b}$$



Напряжение на проводе в момент нейтрализации заряда лидера

$$U_{индэ} = k_э I_m \frac{h_{cp}}{b}$$

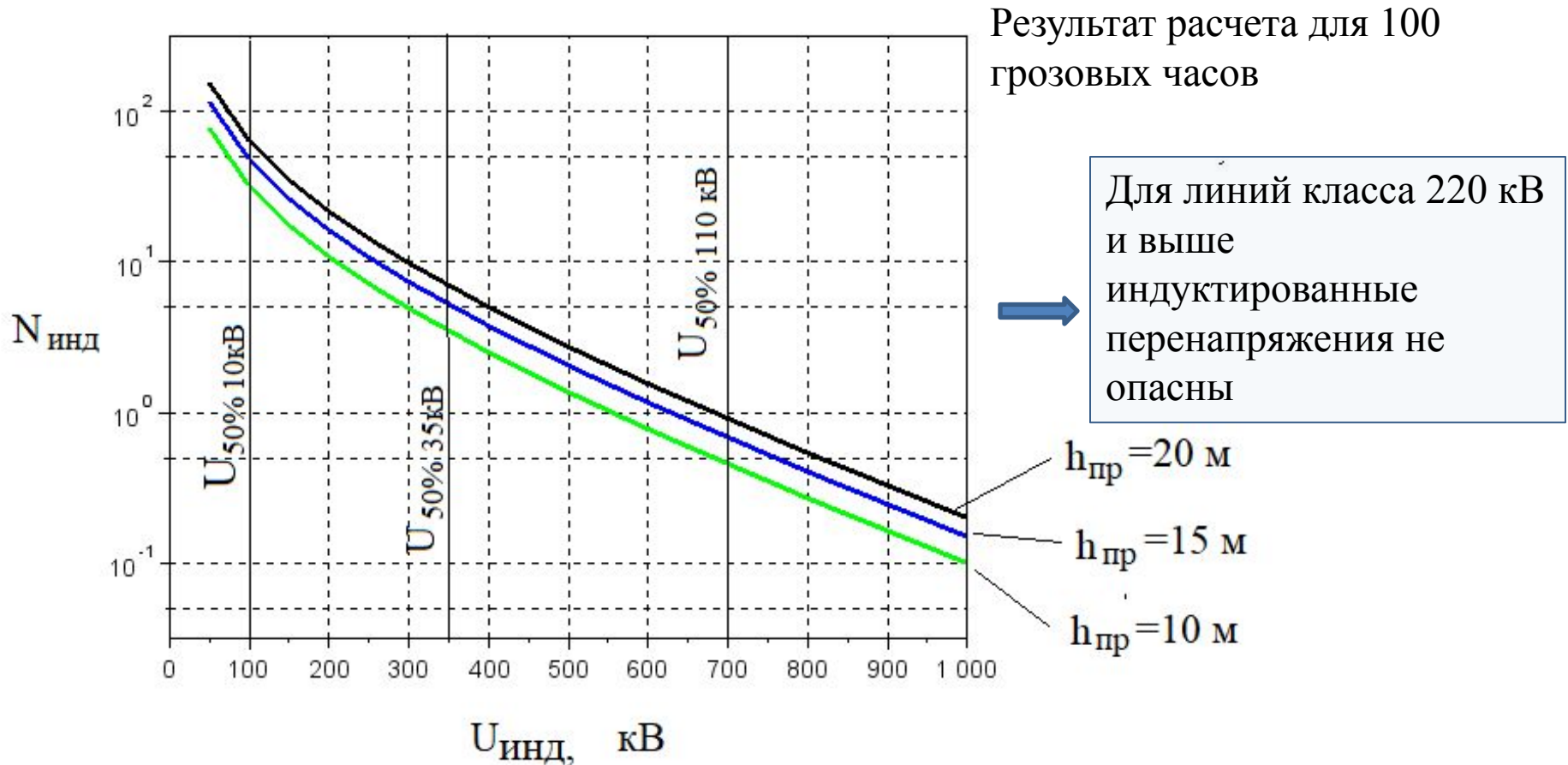
Распространяется по проводу в обе стороны в виде волны напряжения

$$U_{инд[B]} = (k_m + k_э) I_m \frac{h_{cp}}{b} \cong 30 I_{m[A]} \frac{h_{cp}}{b}$$

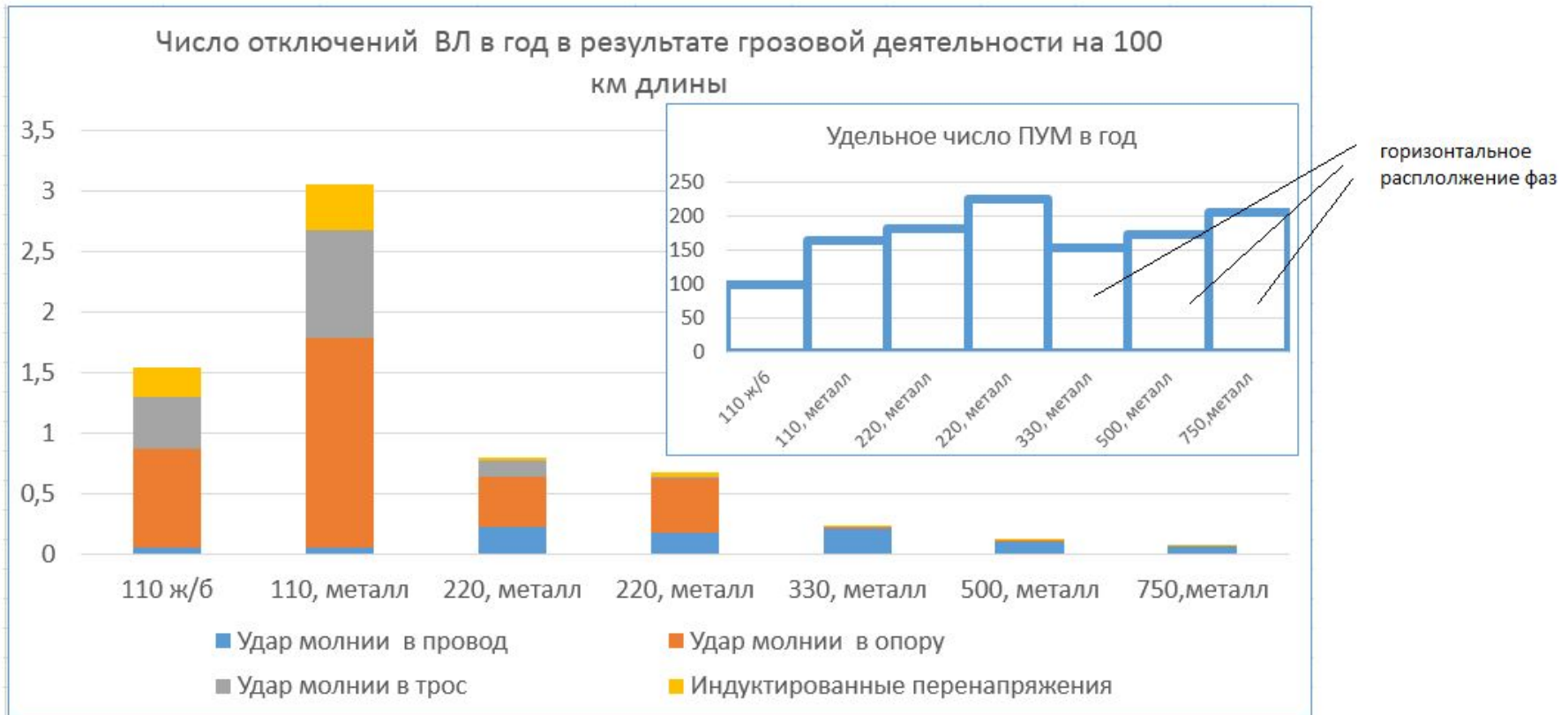
Число отключений от индуцированных перенапряжений $n_{инд} = N_{инд} P_{\partial} (1 - P_{АПВ})$

По опытным данным полное число случаев появления на линии индуцированных перенапряжений с превышающих $U_{инд}$ за T грозовых часов

$$N_{инд} = \frac{4.68 T_{ч} h_{пр} [м]}{U_{инд}} \exp(-U_{инд} / 260)$$



Расчеты числа отключений по описанным выше методикам согласуются с опытом эксплуатации



Средства обеспечения надежной грозозащиты воздушных линий высокого и сверхвысокого напряжения

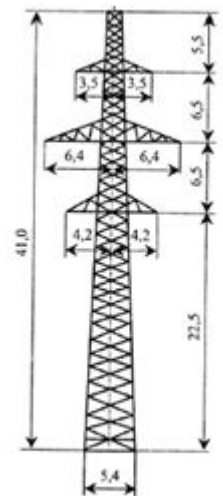
-подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты

-снижение импульсного сопротивления заземления опор $R_3 < 10-20 \text{ Ом}$

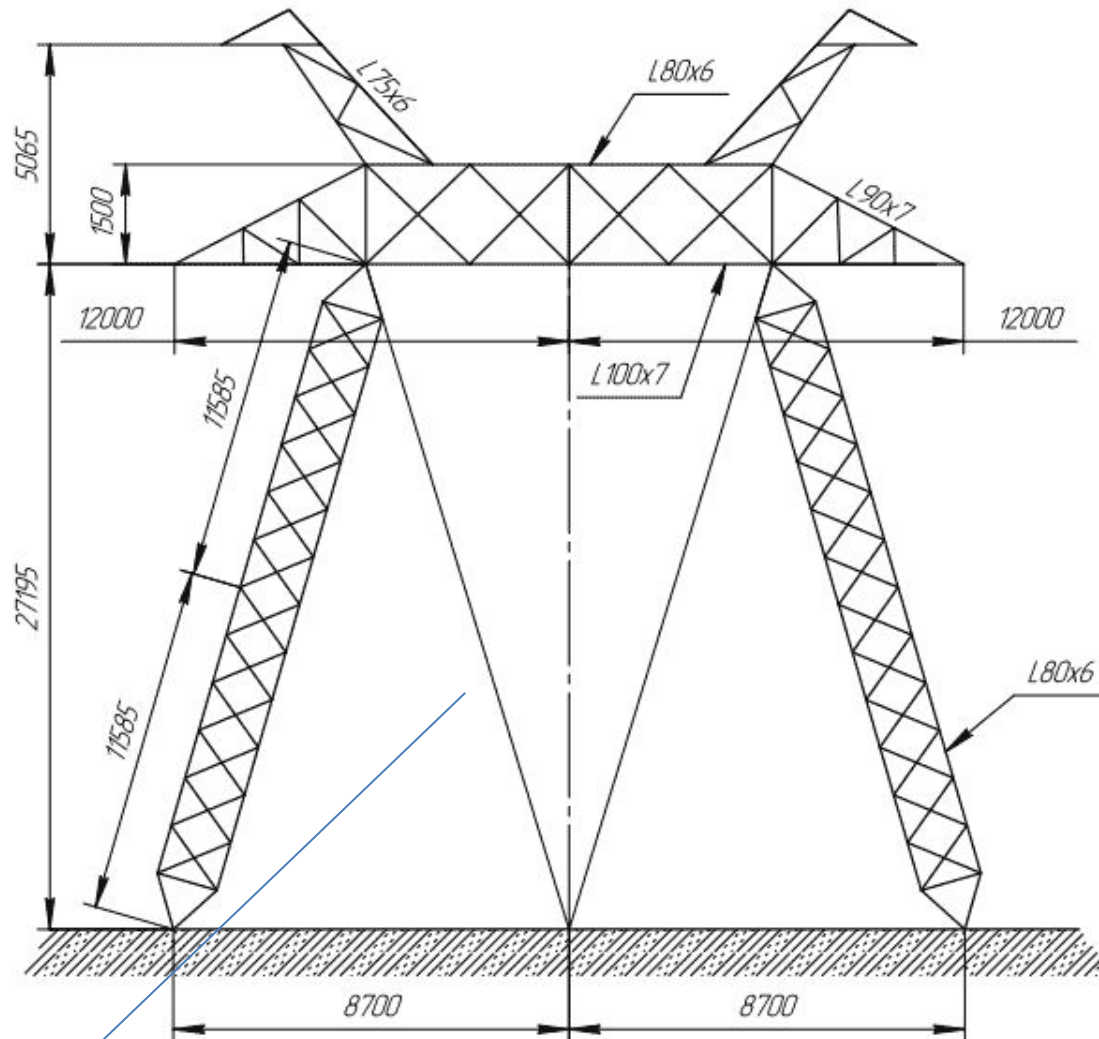
-повышение импульсной электрической прочности изоляции (диэлектрические опоры и траверсы)

-применение автоматического повторного включения АПВ

Наибольшая поражаемость имеет место на двухцепных ВЛ с опорами башенного типа



Оптимальная расположение проводов и тросов линий СВН



Оттяжки увеличивают число путей отвода тока молнии, снижая сопротивление опоры

В каких случаях можно отказаться от применения грозотроса ВЛ 110 кВ?

- слабая интенсивность грозовой деятельности $T < 20$ час/год

- высокое удельное сопротивление грунта, при котором грозотрос неэффективен и высока вероятность обратного перекрытия

- местность с большими гололедными отложениями на проводах и тросах – риск обрыва троса

- агрессивная внешняя среда, вызывающая ускоренную коррозию троса

- горная местность с наличием возвышение местности для приема молнии

- линии на деревянных опорах вследствие высокой импульсной прочности их изоляции

Характеристики грозозащиты ВЛ 110–750 кВ

Номинальное напряжение кВ	110	110	220	220	330	500	750
Материал опор	Ж/бетон	Металл	Металл	Металл	Металл	Металл	Металл
Марка проводов	АС-120	АС-150	АСО-330	АСО-330	2АСО-400	3АСО-400	4АСУ-400
Количество и тип изоляторов на опоре	8ПС6-Б	8ПС6-Б	14ПС6-Б	14ПС6-Б	22ПС6-Б	28ПС12-А	2×4ПС12-А
Защитный угол троса α , град.	31,2	20,7	29,0	24,2	22,6	22,7	24,7
Импульсное сопротивление заземления опор $R_{зм}$, Ом	20	15	15	10	10	10	10
Удельное число прямых ударов молнии в год при $T_v=100$ ч и длине линии $\ell=100$ км – $N_{пум}$, уд/100 км 100 ч	100	165	182	227	153	174	207
Удельное число отключений линии в год при ударе молнии в провод $n_{пр}$, 1/год	0,06	0,06	0,23	0,18	0,22	0,11	0,063
Удельное число отключений линии в год при ударе в опору n_o , 1/год	0,81	1,73	0,41	0,45	0,002	<0,001	<0,001
Удельное число отключений линии в год при ударе в трос $n_{тр}$, 1/год	0,43	0,89	0,13	<0,01	<0,001	<0,001	<0,001
Удельное число отключений линии в год вследствие индуктированных перенапряжений $n_{инд}$, 1/год	0,25	0,38	0,03	0,04	0,003	<0,001	<0,001
Удельное число грозовых отключений линии в год n_{Σ} , 1/год	1,55	3,06	0,80	0,68	0,23	0,11	0,066

Характеристики грозозащиты ВЛ 6–35 кВ

Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	6	6	35	35
Материал опор	Дерево	Ж/бетон	Дерево	Металл
Марка проводов	АС-50	АС-70	АС-95	АС-120
Количество и тип изоляторов на опоре	ШС10-А	ШС10-А	2ПС6-Б	3ПС6-Б
Импульсное сопротивление заземления опор $R_{зи}$, Ом	40	40	30	20
Удельное число прямых ударов молнии в год при $T_v=100$ ч и длине линии $l=100$ км – $N_{ПУМ}$, уд/100 км 100 ч	55	50	66	96
Удельное число отключений линии в год при прямых ударах молнии $n_{ПУМ}$, 1/год	3,6	13,0	0,55	7,9
Удельное число отключений линии в год при индуктированных перенапряжениях $n_{инд}$, 1/год	0,001	7.3	0,001	1.3
Удельное число грозовых отключений линии $n_{\Sigma}=n_{ПУМ}+n_{инд}$, 1/год	3.6	20,0	0,55	9,2

