

# Грозозащита воздушных линий электропередачи



- **Воздушная линия электропередачи (ВЛЭП)** является самым протяженным элементом электрической системы. Это и наиболее распространенный элемент системы, который наиболее часто подвергается ударам молнии. Статистика аварий в энергосистемах показывает, что **75-80 % аварийных отключений воздушных линий электропередачи связаны с грозовыми**



# Физика разряда молнии



- **Молния** - разновидность газового разряда при очень большой длине искры. Общая длина канала молнии достигает нескольких километров, причем значительная часть этого канала находится внутри грозового облака.
- Для возникновения грозы необходимы, во-первых, сильные восходящие потоки воздуха и, во-вторых, требуемая влажность воздуха в пределах грозовой зоны.
- Восходящие потоки воздуха возникают вследствие нагрева прилегающих к поверхности земли слоев воздуха и термически обусловленного теплообмена этих слоев с охлажденным воздухом на большой высоте.
- В облаке образуется несколько изолированных друг от друга скоплений зарядов (в нижней части облака скапливаются преимущественно заряды отрицательной полярности), молния бывает обычно многократной, т.е. состоит из нескольких единичных разрядов, развивающихся по одному и тому же пути.
- Точный механизм разделения зарядов в грозовом облаке все еще остается во многом неясным. Однако наблюдения показывают, что разделение зарядов совпадает с замерзанием капель воды в облаке.

# Допустимое число отключений воздушных линий электропередачи в результате ударов

## МОЛНИИ

Технико-экономический анализ показывает, что **выполнить воздушные линии электропередачи абсолютно грозозащищенной нельзя.** Приходится сознательно идти на то, что воздушные линии электропередачи какое-то ограниченное число раз в год будет отключаться. **В задачу грозозащиты линий электропередачи входит снижение до минимума**

**Допустимое число отключений воздушной линии электропередачи в год** определяется из условий:

- а) надежного электроснабжения потребителей,
- б) надежной работы выключателей, коммутирующих воздушных линий электропередачи и рассчитывается по форм 
$$N_{\text{откл доп}} = N_{\text{доп}} \frac{1}{1 - \beta_{\text{АПВ}}},$$

где  $N_{\text{доп}}$  - число допустимых перерывов в электроснабжении по линии в год  $N_{\text{доп}} \leq 0,1$  при отсутствии резервирования и  $N_{\text{доп}} \leq 1$  при наличии резервирования),  $\beta$  - коэффициент успешности АПВ, равный 0,8-0,9 для линий 110 кВ и выше на металлических и железобетонных опорах

- Автоматическое повторное включение (АПВ) может удерживать линию в работе, так как случаи повреждения изоляции на опорах дугой достаточно редки. В этом случае грозовое поражение не будет сопровождаться перерывом в электроснабжении. При неуспешном АПВ произойдет полное отключение линии электропередачи.
- Следует отметить, что частое применение АПВ усложняет эксплуатацию выключателей, требующих в этом случае внеочередной ревизии. Исходя из этого, допускается иметь  $N_{\text{доп.откл}} = 1 - 4$  в зависимости от типа выключателей. Для особо важных линий это число отключений должно быть уменьшено.



## Ожидаемое число грозовых отключений воздушной линии электропередачи

Ожидаемое число грозовых отключений линии в первую очередь определяется интенсивностью грозовой деятельности в районе прохождения трассы линии.

Ориентируясь на средние цифры, принято считать, что **на 1 км земной поверхности за один грозовой час приходится 0,067 удара молнии**. С учетом того, что линия собирает на себя все удары с полосы шириной  $6h$  ( $h$  - средняя высота подвеса провода или троса), число  $N$  поражений молнией линии длиной  $l$  за год равно

$$N = 0,067 \times n \times 6h \times l \times 10^{-3},$$

где  $n$  - число грозовых часов в году.

Число перекрытий изоляции воздушных линий электропередачи определяется по формуле

$$N_{\text{пер}} = N \times P_{\text{пер}},$$

где  $P_{\text{пер}}$  - вероятность перекрытия изоляции



Не всякое импульсное перекрытие изоляции сопровождается отключением линии, так как для отключения необходим переход импульсной дуги в силовую. Вероятность перехода зависит от многих факторов, и в инженерных расчетах ее принято определять через градиент рабочего напряжения вдоль пути перекрытия  $E_{\text{сп}} = U_{\text{раб}} / l_{\text{пер}}$ , кВ/м.



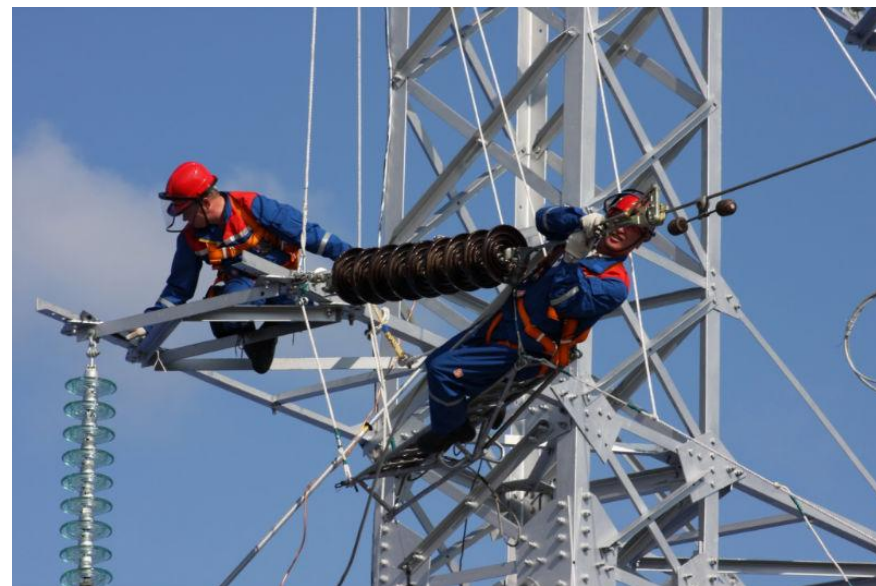
В инженерной практике обычно используется удельное число отключений линии поткл, т. е. число отключений линии длиной 100 км, проходящей в районе с числом грозовых часов в году

$$n_{\text{откл}} = 1,2h \cdot P_{\text{пер}} \cdot \eta.$$

Для линий на деревянных опорах с длинными воздушными промежутками вероятность перехода в импульсную дугу  $h$  определяется по формуле  $\eta = (1,5E_{\text{ср}} - 4) \cdot 10^{-2}$

Для линий на металлических и железобетонных опорах  $h = 0,7$  при напряжении линии до 220 кВ и  $h=1,0$  для номинальных напряжений 330 кВ и выше. Умножая  $N_{\text{пер}}$  на коэффициент  $\eta$ , можно подсчитать ожидаемое число грозовых отключений линии в год

$$N_{\text{откл}} = N \cdot P_{\text{пер}} \cdot \eta.$$

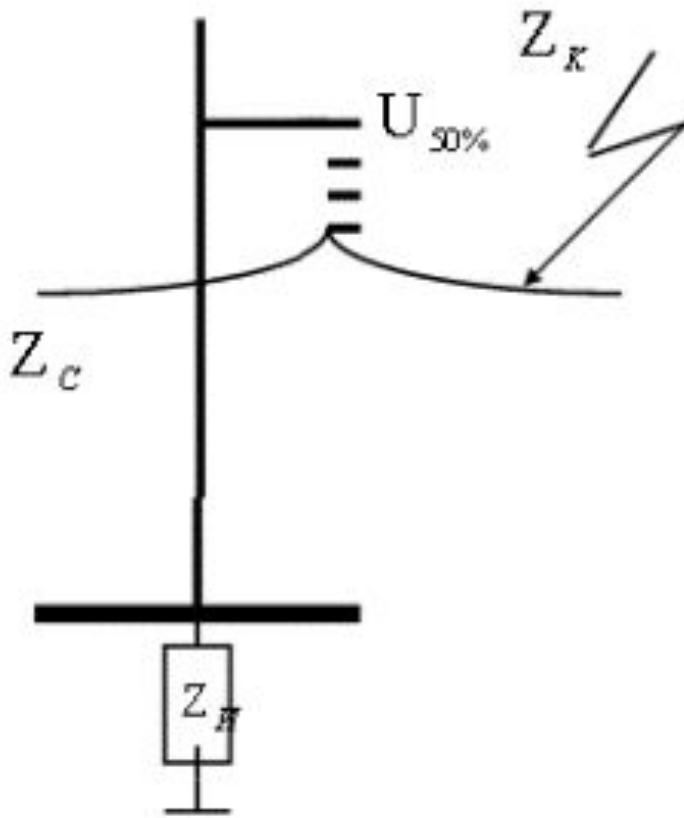


## Для уменьшения числа грозových отключений линии можно:

- уменьшить вероятность перекрытия изоляции при ударах молнии, что обычно достигается на воздушных линиях электропередачи с металлическими опорами подвеской тросовых молниеотводов и обеспечением малого импульсного сопротивления заземления опор и тросов,
- удлинять путь перекрытия с малым градиентом рабочего напряжения, что снижает коэффициент  $h$  перехода импульсной дуги в силовую. Последнее реализуется на воздушных линиях электропередачи с деревянными опорами.



# Влияние исполнения грозозащиты



Воздушные линии электропередачи на металлических (железобетонных) опорах без грозозащитного троса. При поражении провода в месте удара включается сопротивление, равное половине волнового сопротивления провода  $Z$ .

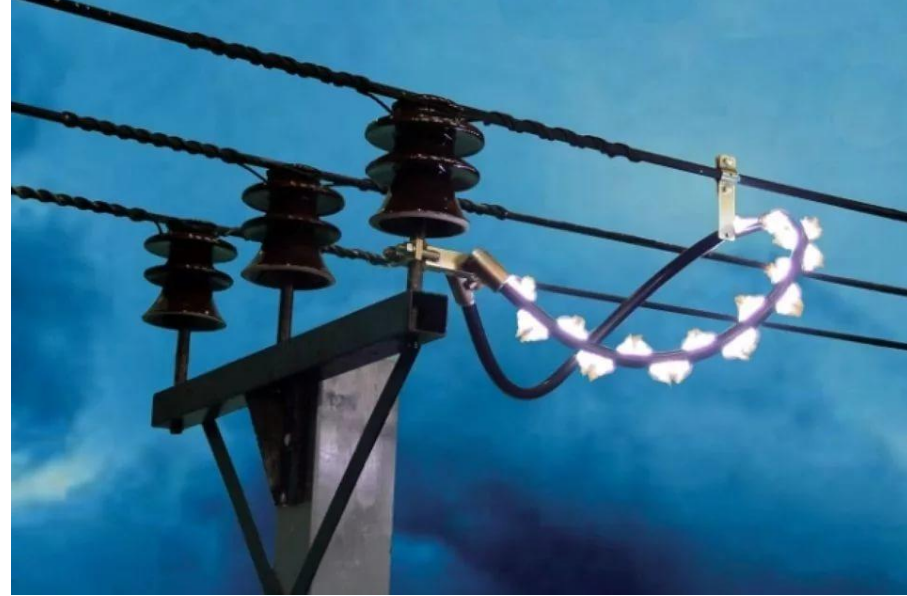
# Молниезащита воздушных линий напряжением до 1000 В

Защита ВЛ до 1000 В от прямых ударов молнии не требуется. Однако сами линии, будучи соединены с электрооборудованием внутри зданий, могут служить каналом для заноса высоких потенциалов при прямых ударах молнии в линию, а также наводимых в проводах вследствие электростатической и электромагнитной индукции при близких грозовых разрядах.

**Перенапряжения** могут достигать сотен тысяч вольт и вызывают пробой изоляции проводов и электрооборудования и пожары. Они опасны для жизни людей, находящихся в зданиях и сооружениях, которые питаются электроэнергией по воздушной линии.

Подводка воздушных линий наружного освещения, силовой сети напряжением до 1000 В, радиотрансляционных линий и сигнализации к прожекторным мачтам, дымовым трубам, градирням и другим высокогабаритным зданиям и сооружениям не допускается. Здесь следует использовать кабели.

- Для защиты от грозовых перенапряжений воздушные линии в населенной местности с одно- и двухэтажной застройкой, не экранированные дымовыми трубами котельных, высокими деревьями, зданиями и т. п., должны иметь заземляющие устройства. Сопротивление заземлений — не более 30 Ом. Расстояния между заземлениями для районов со среднегодовым числом



- Для районов, где среднегодовое количество часов гроз более 40, заземления устраивают через каждые 100 м. Кроме того, заземляющие устройства выполняют:
  - на опорах — с ответвлениями к вводам в общественные здания, и помещения, где может находиться большое количество людей (школы, клубы, ясли, больницы, столовые, спальные корпуса пионерлагерей и т. п.) или представляющие большую хозяйственную ценность (животноводческие помещения, склады, мастерские и пр.);
  - на конечных опорах линий, имеющих ответвления к вводам в здания любого назначения. К указанным заземляющим устройствам необходимо присоединить крюки и штыри деревянных и железобетонных опор, а также арматуру последних.
- И в том и в другом случае на опорах рекомендуется также устанавливать вентильные разрядники.
- В сетях с заземленной нейтралью для заземления от атмосферных перенапряжений следует использовать заземляющие устройства повторных заземлений нулевого провода.

Основной количественной характеристикой разряда молнии является амплитуда тока молнии. Воздушные линии электропередач (ВЛ) в районах со средней продолжительностью грозовой деятельности (20–30 часов в год) поражаются разрядами молнии 15–20 раз в год на 100 км длины. Токи молнии изменяются в широких пределах – от единиц до сотен килоампер. Средний расчетный ток молнии составляет 15 кА. При разряде молнии в землю могут поражаться различные объекты, в частности, воздушные линии электропередачи, подстанции, станции. Протекание тока молнии через объект вызывает возникновение волны напряжения молнии, которая может пробить и разрушить изоляцию электротехнических устройств. При расчетах импульсной электрической прочности пользуются стандартной волной напряжения.

# **Защита от прямых ударов**

## **МОЛНИИ**

Для защиты объектов от поражения молнией используются молниеотводы. В зависимости от защищаемого объекта применяют стержневые (подстанции) или тросовые (ВЛ) молниеотводы. Необходимым условием эффективной работы молниеотводов является их хорошее заземление. Наибольшие грозовые перенапряжения возникают при прямом ударе молнии (ПУМ) в линию или подстанцию. В месте удара возникает кратковременное (импульсное) напряжение в миллионы вольт, т. е. выше импульсной электрической прочности изоляции электропередач и электрооборудования. Для обеспечения надежной работы электрической сети необходимо осуществить ее эффективную и экономичную грозозащиту.

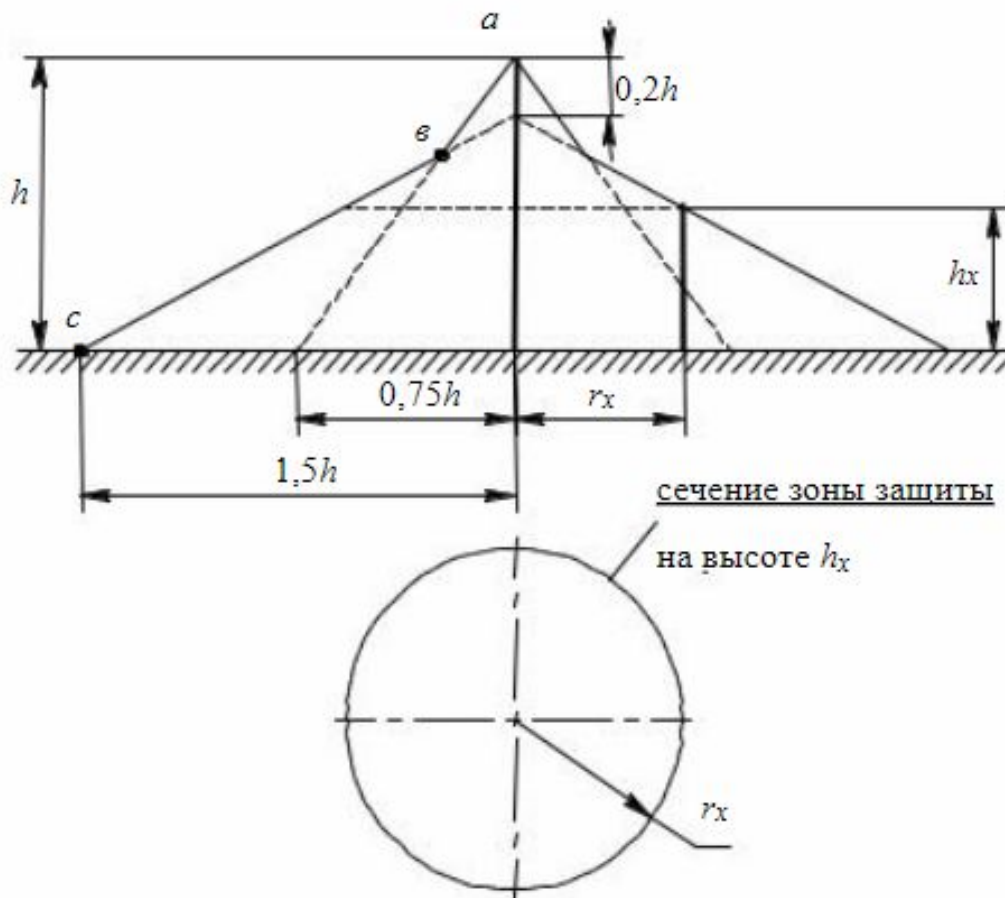
Чтобы быть защищенным от ПУМ, объект должен полностью находиться внутри пространства, которое представляет собой зона защиты молниеотвода.

Зоной защиты молниеотводов называется пространство вокруг молниеотвода, попадание в которое разрядов молнии маловероятно.

# Зона защиты стержневого молниеотвода

Поверхность, ограничивающая зону защиты стержневого молниеотвода, может быть представлена ломаной линией (рис. 4.3)

Отрезок  $ав$  – часть прямой, соединяющей вершину молниеотвода с точкой поверхности земли, удаленной на  $0,75h$  от оси молниеотвода. Отрезок  $вс$  – часть прямой, соединяющей точку молниеотвода на высоте  $0,8h$  с точкой поверхности земли, удаленной на  $1,5h$ . Точка  $в$  находится на высоте  $2/3h$ .



на высоте  $h_x < 2/3h$

$$r_x = 1,5h \left(1 - \frac{h_x}{0,8h}\right)$$

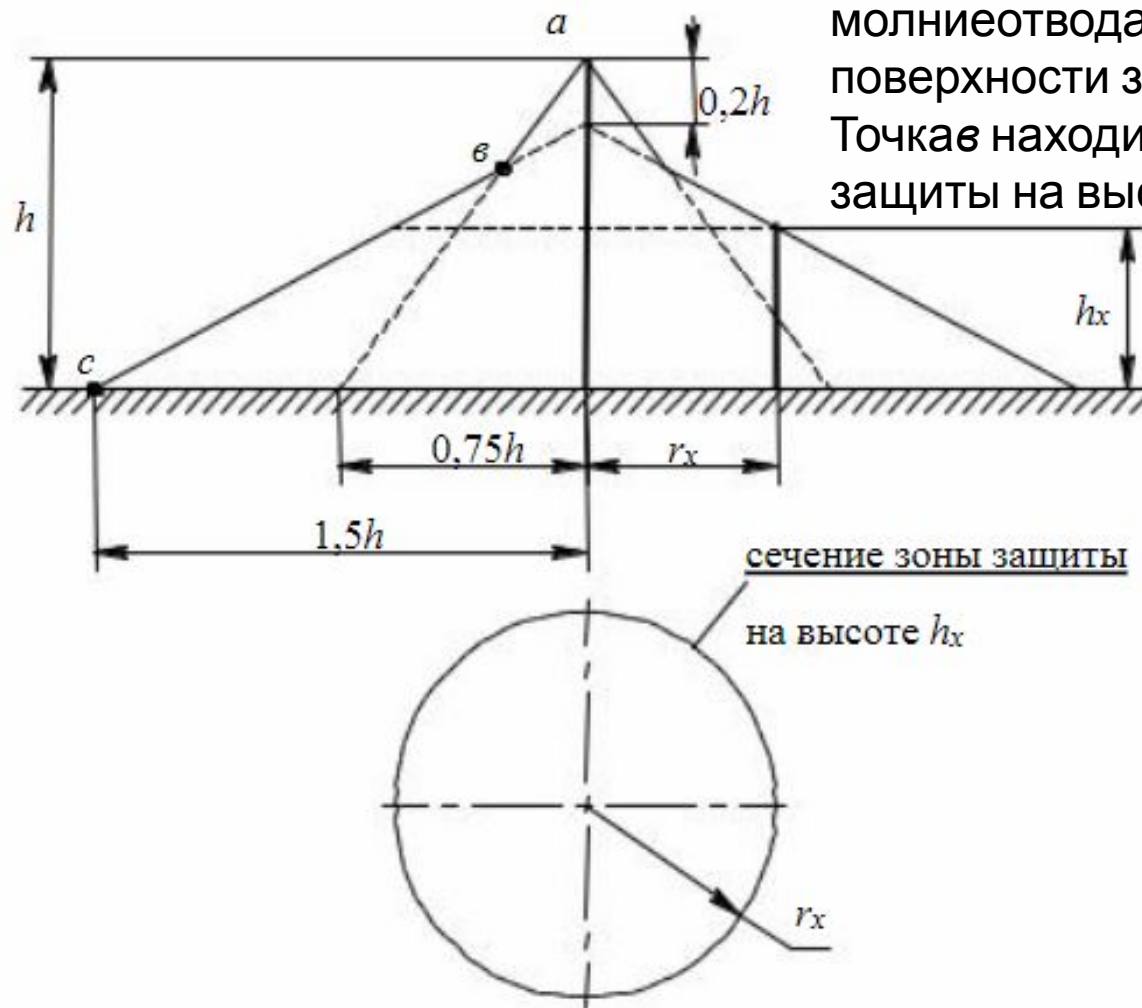
а на высоте  $h_x > 2/3h$

$$r_x = 0,75h \left(1 - \frac{h_x}{h}\right)$$

Рис. 4.3. Построение зоны защиты стержневого молниеотвода

Зона защиты двумя молниеотводами имеет большие размеры, чем сумма защиты двух одиночных молниеотводов (рис. 4.4).

Отрезок  $ав$  – часть прямой, соединяющей вершину молниеотвода с точкой поверхности земли, удаленной на  $0,75h$  от оси молниеотвода. Отрезок  $вс$  – часть прямой, соединяющей точку молниеотвода на высоте  $0,8h$  с точкой поверхности земли, удаленной на  $1,5h$ . Точка  $в$  находится на высоте  $2/3h$ . Радиус защиты на высоте  $h_x$



$$r_x = 1,5h \left( 1 - \frac{h_x}{0,8h} \right)$$

а на высоте  $h_x > 2/3h$

$$r_x = 0,75h \left( 1 - \frac{h_x}{h} \right)$$

Рис. 4.3. Построение зоны защиты стержневого молниеотвода



Зона защиты двумя молниеотводами имеет большие размеры, чем сумма защиты двух одиночных молниеотводов

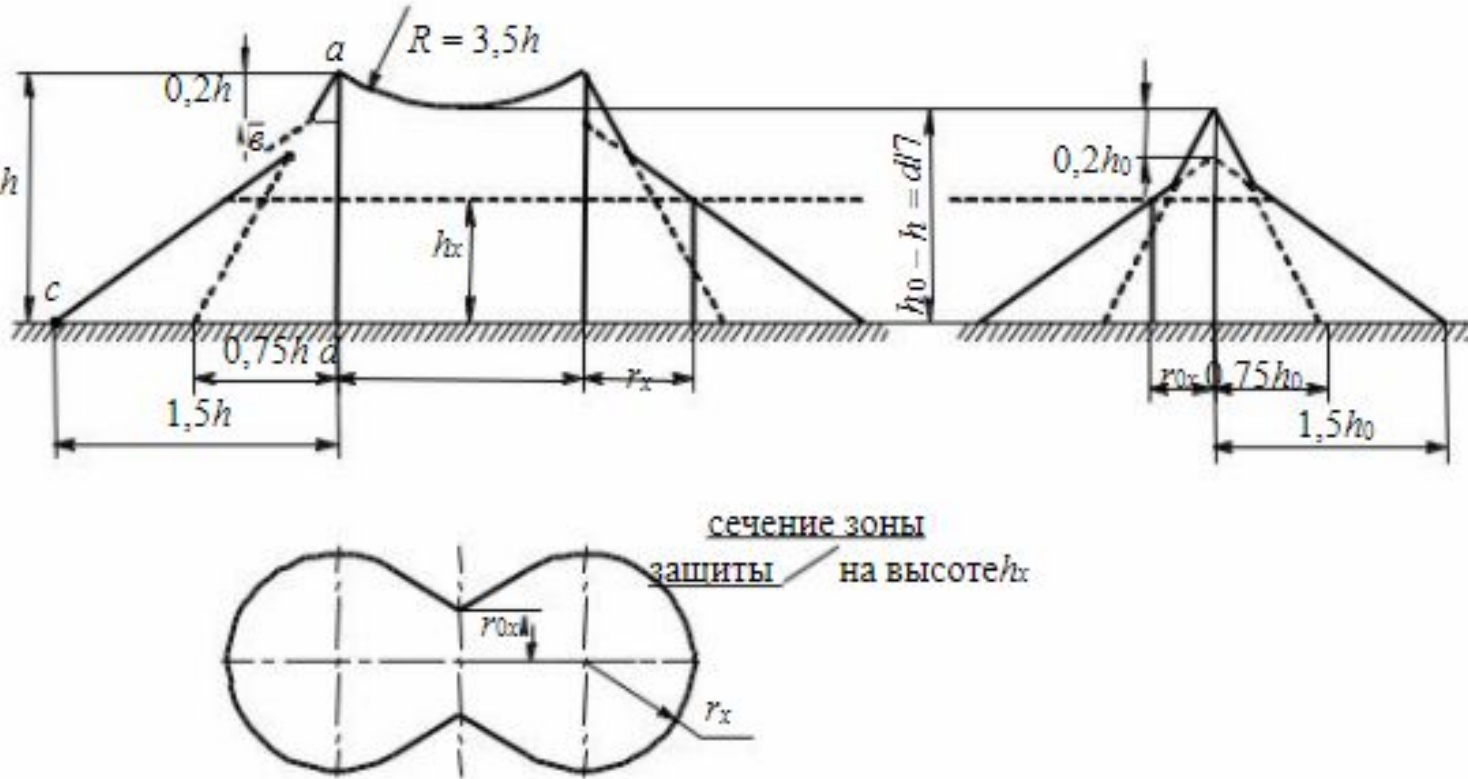


Рис. 4.4. Зона защиты двух стержневых молниеотводов

Открытые распределительные подстанции располагаются на большой территории. Их приходится защищать несколькими молниеотводами. Зона защиты определяется тем же путем, что и зона защиты двух молниеотводов.

# Заземление крюков и штырей

В сетях с заземленной нейтралью крюки и штыри фазных проводов на железобетонных опорах, а также арматура этих опор должны быть присоединены к заземленному нулевому проводу (см. рис. 1).

Это делается для того, чтобы возникшие при грозовых разрядах перенапряжения вызвали перекрытие с провода на крюк и заряд ушел в землю по нулевому проводу через ближайшие защитные повторные заземления нулевого провода. При этом величина перенапряжения снижается до 30—50 кВ, уменьшается опасность пробоев и перекрытий изоляции в зданиях, присоединенных к воздушной линии.

Крюки и штыри на деревянных опорах заземлять не нужно (за исключением указанных выше опор с заземлениями от перенапряжений). В сетях с изолированной нейтралью крюки и штыри фазных проводов на железобетонных опорах, а также арматура этих опор должны быть заземлены. Сопротивление заземления не более 50 Ом, Заземляющие и нулевые защитные проводники из стали должны иметь диаметр не менее 6 мм.

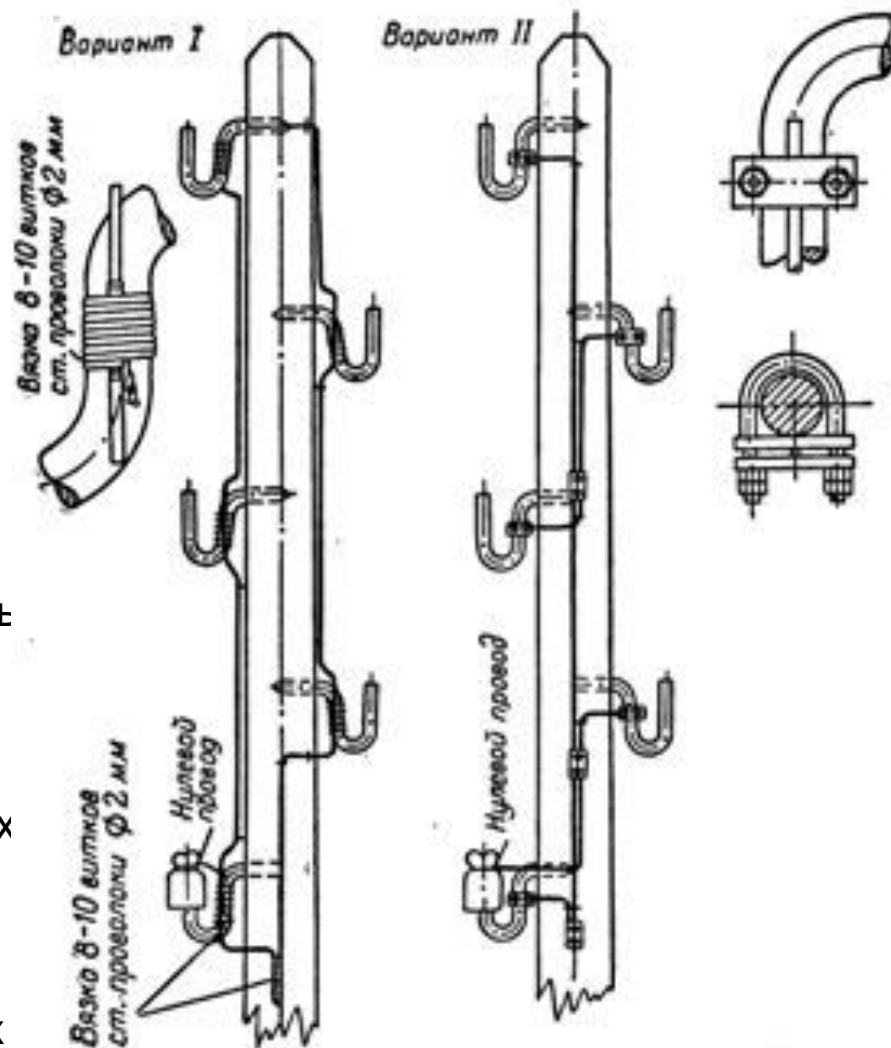


Рис.1. Заземление крюков ВЛ 0,4 кВ

# Вентильные разрядники

Для снижения перенапряжений в проводах воздушных линий применяют низковольтные вентильные разрядники типа РВН-0,5 отечественного производства и аналогичные импортные (например GZ a-0,66). Разрядники — очень эффективное средство снижения перенапряжений. Набегающая с линии импульсная волна перенапряжения отводится в землю, остающееся напряжение не превышает 3—3,5 кВ, что практически безопасно для электрооборудования.

Разрядник РВН-0,5 для наружной и внутренней установки (рис. 2) состоит из единичного искрового промежутка и последовательно соединенного с ним рабочего сопротивления (резистора), закрытых фарфоровой герметической крышкой и сжатых цилиндрической пружиной. Герметизация осуществлена с помощью озоностойкого резинового

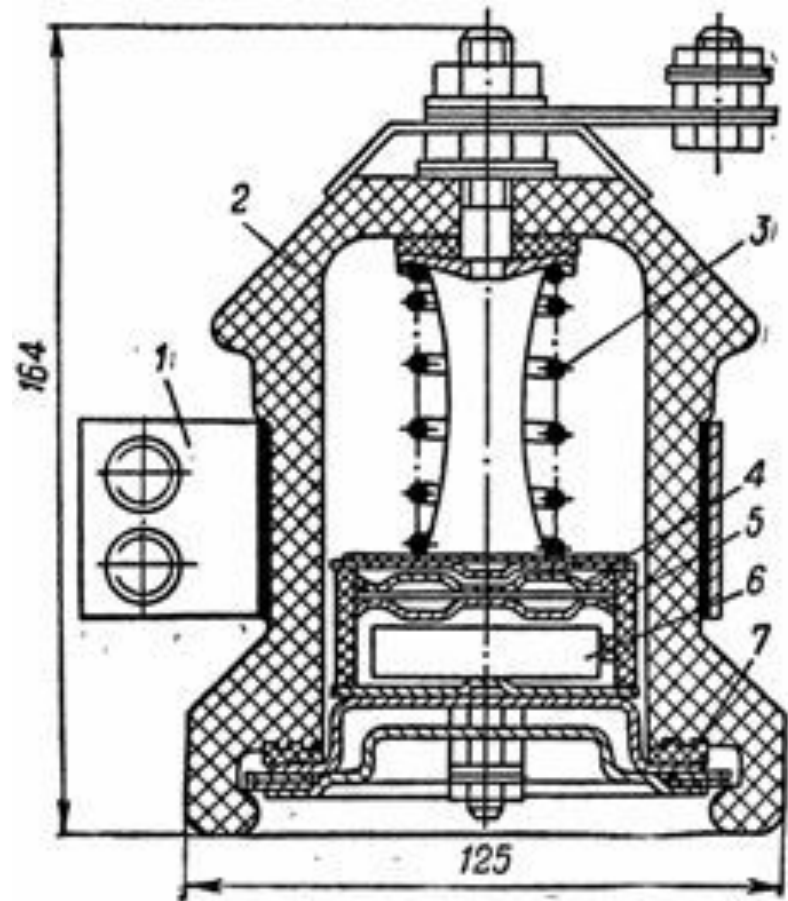


Рис. 2. Вентильный разрядник РВН-0,5: 1 — хомут для крепления; 2 — изолятор; 3 — пружина; 4 — одиночный искровой промежуток; 5 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 6 — диск рабочего резистора; 7 — герметизирующее резиновое кольцо

- Разрядник присоединяется к фазному проводу и заземленному спуску. Защитное действие его заключается в том, что при появлении перенапряжения происходит пробой искрового промежутка, протекающий через разрядник импульсный ток вследствие нелинейной характеристики рабочего сопротивления снижает величину волны перенапряжения до безопасного для оборудования значения 3—5 кВ. Искровой промежуток подобран таким образом, что пробивается всякий раз, как только напряжение на защищаемом участке превысит допустимую величину.
- Следующий за пробоем искрового промежутка разрядника ток, протекающий под действием напряжения промышленной частоты (так называемый сопровождающий ток), прерывается искровым промежутком при первом переходе через

## Зона защиты тросового молниеотвода

Тросовые молниеотводы используются в основном для защиты проводов ВЛ. В связи с этим пользуются не зонами защиты, а углами защиты, т. е. углами между вертикальной линией, перпендикулярной тросу, и линией, соединяющей провод и трос (см. рис. 4.5).

Линии длиной до 1000 км (ВЛ 500 кВ) поражаются молнией не менее 200 раз в грозовой сезон. Поэтому для ВЛ защита с помощью тросовых молниеотводов приобретает основное значение. Опыт эксплуатации ВЛ показывает, что угол защиты должен быть 20–25° (см. рис. 4.5).

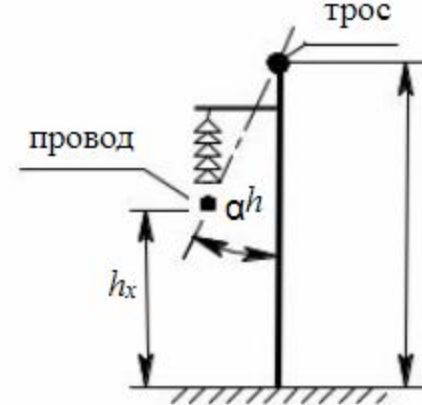


Рис. 4.5. Зона защиты тросового молниеотвода

Сопротивление заземления опор с глухозаземленной нейтралью должно быть менее 5 Ом, а с изолированной нейтралью – менее 10 Ом.

Грозозащита подстанций, кроме защиты от прямых ударов молнии, должна включать в себя следующие виды защит:

- 1) от перекрытий при ударах молнии в заземленные конструкции подстанций, т. е. от обратных перекрытий с заземленных элементов на токоведущие части оборудования:

Для выполнения первого требования необходимо сопротивление заземления подстанции делать малым. Для напряжения выше 1000 В сопротивление заземления подстанции  $R_3 \approx 0,5 \text{ Ом}$ . Уменьшение  $R_3$  – наиболее эффективный путь защиты от обратных переключений.

Для выполнения второго требования применяются вентильные разрядники (РВ) и ограничители перенапряжения (ОПН). Вентильный разрядник обладает пологой вольт-секундной характеристикой (ВСХ). Это позволяет ему защищать оборудование в широком диапазоне изменений длин волн, набегающих с линии (рис. 4.6).

Для эффективной защиты необходимо, чтобы:

1) остающееся напряжение на рабочем сопротивлении РВ не превышало допустимого;

2) крутизна набегающей на подстанцию волны была ограниченной. Для выполнения этих условий все линии, подходящие и отходящие от подстанции, оборудуются тросовой защитой длиной 2–3 км – защитные подходы. Углы защиты выполняют менее  $20^\circ$  и даже отрицательные.

Наличие защищенных подходов исключает прямой удар молнии в провод, что уменьшает токи через РВ и, следовательно, остающееся напряжение на рабочем сопротивлении РВ.

**ПРЕЗИНТАЦИЯ ОКОНЧЕНА**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**