

**ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ И
СТАНЦИЙ
ОТ НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
С ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

На подходе к ПС или электрической станции грозовые волны возникают при прорыве молнии на провода или при обратных перекрытиях линейной изоляции при ударах молнии в опоры или тросы.

При прорывах на проводах могут появляться **срезанные** и **полные** волны. *Полные волны более опасны*, так как срезанные быстрее затухают за счет потерь энергии на импульсную корону. При обратных перекрытиях на проводах возникают волны с отвесным фронтом, опасные для междувитковой внутренней изоляции трансформаторов (автотрансформаторов) и реакторов.

При воздействии набегающих с ВЛ волн атмосферных перенапряжений схема РУ ведет себя, как сложный колебательный контур, в котором подстанционное оборудование участвует своими входными емкостями, а ошиновка - отрезками длинной линии с распределенными параметрами.

При переходном процессе в сложном колебательном контуре ПС в отдельных ее точках могут появляться перенапряжения, превышающие импульсную прочность изоляции оборудования.

Задача грозозащиты ПС состоит в снижении значений перенапряжений на ПС за счет использования защитных аппаратов с нелинейными вольтамперными характеристиками (ограничителей перенапряжений или вентильных разрядников) и уменьшения числа опасных набегающих волн путем повышения грозоупорности ВЛ на подходе к ПС.

Особенностью перенапряжений на подстанции является их существенная зависимость от крутизны фронта и амплитуды набегающей волны. Остающееся напряжение на защитном аппарате зависит только от амплитуды воздействия, слабо меняясь благодаря пологой вольтамперной характеристике его нелинейных сопротивлений.

Для обеспечения молниезащиты подстанций от проходящих по линии волн грозových перенапряжений необходимо применять следующие мероприятия:

- Выбор одного или нескольких трехфазных комплектов ОПН или разрядников, у которых пробивное и остающееся напряжение ниже допустимого уровня перенапряжений на интервал координации ΔU_k ;
- Защита подходов линий от прямых ударов молнии на определенной длине l_p , при которой обеспечивается достаточное сглаживание фронта набегающих волн и снижение тока в ОПН или разрядниках;
- Определение такого количества ОПН или разрядников и мест их установки, при котором расстояние между любым из защищаемых объектов и ближайшим к ним защитным аппаратом l_p не превышает безопасной величины, зависящей от схемы подстанции, длины защищенного подхода линии и интервала координации.

Выбор схемы молниезащиты подстанции сводится к нахождению оптимального с точки зрения критериев молниезащиты соотношения между указанными параметрами.

Опыт расчетов молниезащиты показывает, что в типовых схемах разрядник способен обеспечить молниезащиту оборудования подстанции при удалении от него не более чем на 30 – 150 м, причем меньшие значения соответствуют тупиковым подстанциям и разрядниками старых типов, а большие - проходным подстанциям и ОПН.

Защищенный подход линии

Необходимое ограничение крутизны фронта набегающей волны достигается благодаря наличию защищенного подхода линии электропередачи. Волна при движении по линии деформируется за счет импульсной короны и потерь в проводах и земле таким образом, что время фронта волны увеличивается приблизительно пропорционально длине пробега. Увеличение длительности фронта волны $\Delta\tau_\phi$ (в микросекундах) при пробеге по участку линии длиной l_n (в км) можно определить по эмпирической формуле:

$$\Delta\tau_\phi = l_n \eta^{(-)},$$

где $\eta^{(-)}$ – коэффициент деформации фронта волны вследствие импульсной короны, показывающий, на сколько микросекунд удлиняется фронт волны при пробеге одного километра линии.

$$\eta^{(-)} = 3,33 \left(\sqrt{1 + 0,6 \left(\frac{U}{U_k} - 1 \right)^{2/3}} - 1 \right).$$

Средства молниезащиты и требуемая длина защищенного тросом подхода, определяемая затуханием волн при распространении по проводам за счет импульсной короны и потерь в земле, *зависят* от класса номинального напряжения ВЛ и схемы ПС. *Наиболее опасные воздействия на изоляции ПС* возникают при ударах молнии в ближайшие опоры и прорывах на провода в первых пролетах.

Защита подхода линии должна включать следующие мероприятия:

- Подвеску грозозащитных тросов даже в случае их отсутствия на других участках линии с обязательным заземлением на каждой опоре;
- Снижение угла тросовой защиты до 20° путем подвески второго троса или изменения конструкции опоры на подходах;
- Заземление тросов на каждой опоре подхода;
- Снижение сопротивления заземления опор на подходе до 10 – 20 Ом.

Кроме этого, при расположении проводов линии на разных высотах рекомендуется на подходе перейти к опорам с горизонтальным расположением проводов, имеющим меньшую индуктивность.

Можно выбрать такую длину защищенного подхода линии, при которой удлинение фронта волны будет таким, что любая волна, возникшая вне зоны защищенного подхода, после пробега по защищенному подходу станет безопасной для подстанции. Критическая (минимальная) длина защищенного подхода, удовлетворяющая этому условию, может быть рассчитана по формуле:

$$l_{кр} = \frac{\tau_{кр}}{\eta^{(-)}}$$

где $\tau_{кр}$ – критическое значение длительности опасных волн.

Защиту подхода нельзя сделать абсолютно надежной. Сохраняется некоторая вероятность прорыва молнии на провода линии, обратных перекрытий в зоне защищенного подхода. Часть волн не успевает за время пробега удлинить свой фронт до безопасной величины и вызывает опасные перенапряжения. Их число будет зависеть от надежности молниезащиты подхода линии и его длины.

При наибольшей критической длине защищенного подхода будет наибольшим число опасных волн, возникающих вследствие поражения линии в зоне защищенного подхода, поэтому стремятся, чтобы длина подхода $l_{кр}$ не превышала предельного значения, указанного в табл.

Таблица – Предельные значения длин защищенного подхода линий

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	35	110	220	330	500
Длина подхода, км	1 – 2	1 – 3	2 – 3	2 – 4	2,5 – 3

Если величина $l_{кр}$ превышает указанное значение, целесообразно изменить число или расположение защитных аппаратов на подстанции или найти более удачный вариант схемы молниезащиты.

Средства защиты РУ от набегающих грозовых волн

Основным средством снижения перенапряжений на изоляции электрооборудования РУ являются ОПН. Необходимое количество и схема расстановки ОПН определяются на основании расчета молниезащиты ПС.

Главный фактор, определяющий расположение ОПН на подстанции, - это линейная и подстанционная защита. Как правило, защита подстанции может быть обеспечена, даже если отходящие линии не защищены. Подстанционная защита снижает вероятность высоких напряжений и крутых фронтов волн, возникающих в результате ударов молнии с большими амплитудами тока внутри подстанции. Однако следует учесть, что большинство ударов будет направлено в линии, эти удары создадут волны, бегущие по линии и достигающие подстанции. Если линии защищены, волны, приходящие на подстанцию, менее опасны, чем волны, приходящие с незащищенных линий. Соответственно, амплитуда токов ОПН будет ниже, что приводит к более низкому остающемуся напряжению ОПН и лучшей защите оборудования.

Рекомендации по выбору места установки ОПН в РУ

Защита электрооборудования от грозových и коммутационных перенапряжений должна соответствовать рекомендациям ПУЭ [16].

Места установки ОПН определяются функциональным назначением соответствующего ограничителя:

- в цепи трансформатора, автотрансформатора или шунтирующего реактора - для защиты от грозových и коммутационных перенапряжений при их включении или отключении;
- на конце линии - для защиты от коммутационных перенапряжений при ее включении или отключении и ограничения набегающих на РУ волн грозových перенапряжений.

Координационное выдерживаемое напряжение при грозовом импульсе может быть определено по эмпирической формуле, которая учитывает фундаментальные характеристики поведения грозового перенапряжения на подстанциях:

$$U_{кв} = U_{зз} + \frac{A}{N} \frac{L_o}{L_{\partial n} + L_a},$$

где $L_a = R/r$ - длина воздушной линии перед подстанцией, которая позволяет получить норму ударов молнии, равную приемлемой норме повреждений. Правая дробь, умноженная на A/N , пропорциональна крутизне представительной падающей волны;

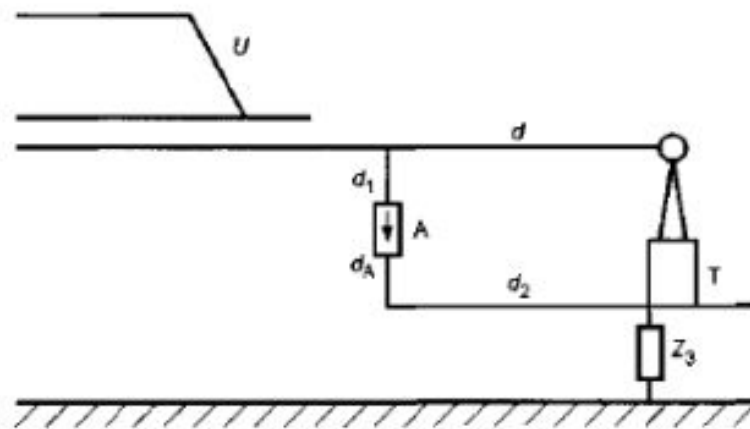
$U_{кв}$ - координационное выдерживаемое напряжение грозового импульса оборудования;

A - напряжение, учитывающее деформацию фронта волны из-за импульсной короны при пробеге по воздушной линии, подсоединенной к подстанции, определяется по таблице 7.2;

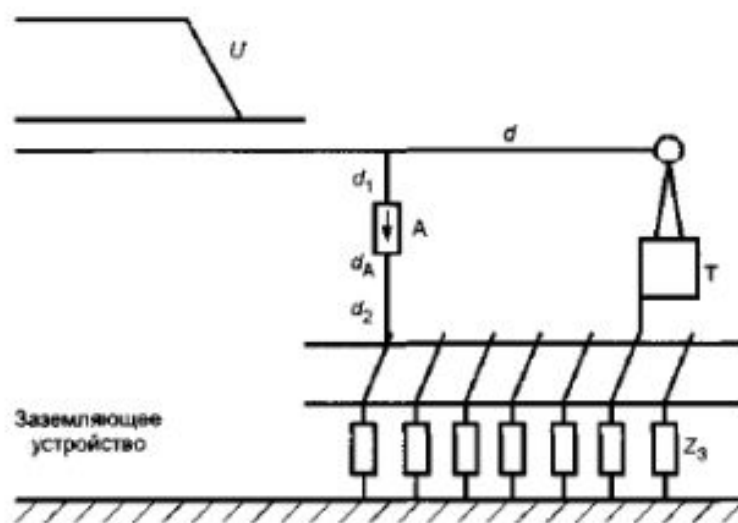
$U_{зз}$ - уровень защиты ОПН от грозовых импульсов;

N - число линий, подключенных к подстанции ($N = 1$ или $N = 2$);

L_o - общая длина $d + d_1 + d_2 + d_A$, определяемая по рис.



а)



б)

Рисунок – Схема присоединения ОПН к защищаемому объекту:
 а) установки без контура заземления (распределительные сети);
 б) установки с контуром заземления (подстанции)

Для распределительных линий нормы простоя, как правило, более сравнимы с приемлемыми нормами повреждений, т.е. длина воздушной линии мала и ею можно пренебречь. Тогда формула (7.4) упрощается:

$$U_{кв} = U_{зг} + \frac{A}{N} \frac{L_o}{L_{дл}}.$$

Таблица 7.2 – Значение коэффициента A для воздушных линий

Воздушная линия	A , кВ
Распределительные линии (междуфазные перекрытия):	
- с заземленными траверсами (перекрытие на землю при низком напряжении);	900
- линии на деревянных опорах (перекрытие на землю при высоком напряжении)	2700
Линии электропередачи (однофазное перекрытие на землю):	
- одиночный провод;	4500
- <i>расщепление</i> на два провода;	7000
- <i>расщепление</i> на четыре провода;	11000
- <i>расщепление</i> на шесть или восемь проводов	17000

При выборе нормированного выдерживаемого напряжения грозового импульса защитная зона ОПН может быть оценена по формуле

$$L_z = \left[\left(\frac{U_{нв}}{1,15} \right) - U_{зг} \right] (L_{опн} + L_a),$$

где L_z - защитная зона;

$U_{нв}$ - нормированное выдерживаемое напряжение грозового импульса.

Формула показывает, что для данной подстанции защитная зона увеличивается:

- с увеличением разницы между нормированным выдерживаемым напряжением и уровнем защиты;
- со снижением нормы простоя воздушной линии перед подстанцией, указывая, таким образом, на влияние улучшенной защиты заземленными тросами и сниженного сопротивления фундамента опор;
- с увеличением приемлемых норм повреждений, что указывает на возможность защиты оборудования, однако с более высокой нормой повреждения.

В таблице приведены примеры рассчитанных защитных зон при типичном значении нормы повреждения защищенного оборудования равном 0,25 % в год.

Таблица - Примеры рассчитанных защитных зон для ОРУ

U_{max} , кВ	$U_{зг}$, кВ	Выдерживаемое напряжение, кВ		$L_{дп}$, м	A , кВ	Защитная зона L_z , м					
		$U_{нв}$	$U_{кв}$			$r=0,1$ $N=2$	$r=0,5$		$r=2$		$r=6$ $N=2$
							$N=1$	$N=2$	$N=1$	$N=2$	
24	80	125	109	100	2700	-	-	-	2,4	4,8	3,0
				200	900	-	-	-	10,4	20,8	15,5
123	350	550	478	300	4500	160	23	46	12,0	24	-
420	900	1425	1239	400	11000	180	28	56	16	32	-

Примечание: r приведено в единицах (1) на 100 км и на год;

U_{max} - наибольшее напряжение оборудования

Защита подстанций с кабельным подключением

Если в РУ производится замена вентильного разрядника на ОПН, то переход от расстояний от вентильных разрядников (РВ) до защищаемого оборудования, нормируемых ПУЭ, к расстояниям до ОПН можно оценить по формуле:

$$L_{опн} = L_{рв} (U_{исп} - U_{опн}) / (U_{исп} - U_{рв}),$$

где $U_{исп}$ - испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе, кВ;

$U_{опн}$, $U_{рв}$ - остающееся напряжение на ОПН и РВ, кВ при токе 10 (5) кА;

$L_{опн}$ - расстояние от защищаемого оборудования до ОПН, м;

$L_{рв}$ - расстояние от защищаемого оборудования до РВ, нормируемое ПУЭ, м.

Допускается установка ОПН на место заменяемых разрядников, если значения остающихся напряжений этих ОПН при токе 10 кА отличаются не более, чем на 1,5% от соответствующих параметров разрядника.

Надежность молниезащиты электрических станций подстанций

Надежность молниезащиты электрических станций и подстанций включает надежность защиты от прямых ударов молнии и от набегающих волн перенапряжений.

Надежность защиты станций и подстанций от прямых ударов молнии

Надежность защиты ОРУ станций и подстанций от прямых ударов молнии характеризуется числом случаев перекрытия изоляции при прорывах молнии через зону защиты молниеотводов и обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотводы в год. Обратные перекрытия при ударах молнии в молниеотводы необходимо учитывать только для ОРУ 35-150 кВ.

Это число может быть определено по формуле:

$$N_{ПУ} = p_0 (a_m + 2R_{эка}) (b_m + 2R_{эка}) (\eta_{пр} p_a p_{пр} + \eta_{он} p_{он}) \cdot 10^{-6},$$

где a_m , b_m - длина и ширина территории ОРУ, м;

В качестве показателя надежности ПС используется средняя повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов непосредственно в ЗРУ или ОРУ:

$$T_{п.у.} = \frac{1}{N_{п.у.}}$$

Система молниезащиты ПС должна обеспечить в зависимости от класса ее номинального напряжения $T_{п.у.}$ не ниже значений, указанных в таблице

Таблица – Нормируемая средняя повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов непосредственно в ЗРУ или ОРУ

$U_{ном.}$, кВ	35	110	220	330	500	750	1150
$T_{п.у.}$	500	700	1000	1500	2000	2500	3000

Надежность молниезащиты РУ станций и подстанций от набегающих волн перенапряжений

Надежность молниезащиты ПС оценивается средним числом случаев появления опасных для подстанционной изоляции грозовых импульсов в год.

Опасность могут представлять только грозовые импульсы, возникающие при ударе молнии в ВЛ в пределах опасной зоны $l_{o.з}$. Часть этих импульсов небольшой амплитуды или с малой крутизной фронта и небольшой длительности не вызывают повреждения или перекрытия изоляции оборудования подстанций.

Оценка надежности молниезащиты РУ станций и подстанций состоит в определении доли опасных импульсов среди поражающих ВЛ в пределах опасной зоны. Среднее число опасных грозовых перенапряжений от набегающих волн на каком-то аппарате или на подстанции в целом (т.е. перенапряжений, превышающих допустимые значения) за год может быть определено по формуле:

$$N_{Н.В} = N \cdot N_{Г.ч} l_{o.з} n_{вл} (1 - k_з) (p_a \psi_{пр} + \delta_{оп} p_{оп} \psi_{оп}) \cdot 10^4,$$

где $N_{НВ}$ - среднее число опасных перенапряжений, возникающих на защищаемом аппарате или на ПС в целом в течение года;

N - число грозových ударов в ВЛ длиной 100 км при 100 грозových часах в год;

$N_{Г.ч}$ - число грозových часов в год;

$l_{о.з}$ - длина опасной зоны, км;

$n_{вл}$, k_s - число отходящих ВЛ и коэффициент их взаимного экранирования;

Pp_a - вероятность прорыва молнии на провода;

$\delta_{оп}$ - доля грозových ударов в опоры и прилегающие участки троса, отн. ед.;

$p_{оп}$ - вероятность обратного перекрытия линейной изоляции;

$\psi_{пр}$, $\psi_{оп}$ - доли опасных для изоляции ПС импульсов, соответственно, при прорыве молнии на провода и при обратных перекрытиях изоляции ВЛ, возникающих в пределах опасной зоны, отн. ед.

В качестве показателя надежности ПС используется средняя повторяемость опасных перенапряжений, возникающих на защищаемом аппарате или на ПС в целом, (в годах):

$$T_{Н.В.} = \frac{1}{N_{Н.В.}}$$

Рекомендуемые показатели надежности молниезащиты наиболее дорогого и ответственного подстанционного оборудования (силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) в зависимости от класса номинального напряжения ПС оцениваются значениями, приведенными в таблице

Таблица – Нормируемая средняя повторяемость опасных перенапряжений, возникающих на защищаемом аппарате или на ПС в целом, (в годах)

$U_{ном}$, кВ	35	110	220	330	500	750	1150
$T_{Н.В.}$, годы	200-300	300-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1500