

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ГРОЗОЗАЩИТЕ ВЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Гайворонский А.С.

Рассматриваются методические аспекты, касающиеся выполнения грозозащиты ВЛ с применением линейных разрядников на примере конкретных проектных решений по защите ВЛ 330 и 500 кВ, эксплуатируемых без тросов, и защите двухцепных ВЛ 110 кВ в районах с плохо проводящими грунтами.

Введение.

Линейные разрядники (ЛР) являются новым радикальным средством грозозащиты ВЛ. Общие вопросы их применения рассмотрены в [1]. Области применения ЛР, где это наиболее актуально, включают защиту бестросовых ВЛ, в том числе на больших переходах, и защиту ВЛ в районах с плохо проводящими грунтами при больших сопротивлениях заземления опор. Обоснование проектных решений по грозозащите с применением линейных разрядников предусматривает определение рациональной схемы защиты, выбор конструкции и определение требований к характеристикам ЛР.

В настоящем докладе рассматриваются методические аспекты, касающиеся выполнения грозозащиты ВЛ с применением линейных разрядников на примере конкретных проектных решений по защите ВЛ 330,500 кВ, эксплуатируемых без тросов, и защите двухцепных ВЛ 110 кВ в районах с плохо проводящими грунтами.

Обоснование схемы защиты.

Выбор схемы защиты - мест установки ЛР на линии (на опорах и на фазах) производится на основании данных о характеристиках грозопоражаемости ВЛ исходя из условия обеспечения требуемой надежности защиты. Характеристики грозопоражаемости ВЛ определялись путем компьютерного моделирования по программе LIGHTNING, основанной на модели ориентировки лидера молнии [2].

Расчетные характеристики грозопоражаемости ВЛ 330, 500 кВ приведены в табл.1. Основные закономерности заключаются в следующем.

Число грозовых отключений ВЛ без грозозащитных тросов возрастает в 40-100 раз по сравнению с исходным вариантом защиты с тросами. Основная доля отключений обусловлены ударами молнии в крайние фазы. Отключения, вызванные ударами молнии в среднюю фазу, составляют около 15%.

Существенную роль играет защитное действие опор ВЛ, которое снижает число ударов молнии в фазные провода примерно на 30-40%. С увеличением длины пролета число ударов в фазные провода возрастает, что обусловлено снижением доли ударов, перехватываемых опорами.

Удары молнии неравномерно распределяются по длине пролета. Благодаря защитному действию опор удары молнии в участки пролетов вблизи опор на расстоянии 50 м практически исключаются. В зависимости от длины пролета доля таких ударов составляет от 3 до 15%.

Расчетные характеристики грозопоражаемости двухцепных ВЛ 110 кВ на опорах башенного типа при сопротивлениях заземления опор ~100 Ом приведены в табл.2. Грозовые отключения ВЛ в этом случае обусловлены ударами молнии в трос (опору) и последующими

обратными перекрытиями изоляции. При больших сопротивлениях заземления опор (~100 Ом) практически каждый удар молнии в линию приводит к перекрытию изоляции с вероятностью не менее 85%. Отключения ВЛ из-за прорывов молнии через тросовую защиту (прямые удары в провод) маловероятны.

Таблица 1

Характеристики грозопоражаемости ВЛ 330, 500 кВ

Характеристика	Значение		
	500 кВ	330 кВ	
	ПБ-4	ПБ330-1	П22
<i>С грозозащитными тросами</i>			
Число ударов молнии, 1/100км/год:			
- в трос;	31,80	19,70	28,60
- в фазный провод;	0,11	0,17	0,34
Число отключений, 1/100км/год	0,07	0,12	0,34
<i>Без грозозащитных тросов</i>			
Число ударов молнии, 1/100км/год:			
- в крайние фазы;	11,20	5,90	11,30
- в среднюю фазу;	2,10	0,96	1,39
- общее	13,30	6,86	12,70
Число отключений, 1/100км/год	10,80	6,50	12,30

Таблица 2

Характеристики грозопоражаемости ВЛ 110 кВ

Наименование характеристики	Значение для ВЛ:	
	на опорах П 110-4, П 110-2	на опорах ПБ 110-2
Число ударов молнии, 1/100 км/год:		
• в трос	9,75	7,41
• в фазный провод	0,150	0,03
Удельное число грозовых отключений, 1/100 км/год:		
• от ударов в провод;	0,15	0,03
• от ударов в трос (при $R_3 = 100$ Ом);	8,30	6,30
• суммарное	8,45	6,33
Доля двухцепных отключений, %	>50	

На основании полученных характеристик грозопоражаемости были определены показатели надежности – ожидаемое число грозовых отключений для различных вариантов выполнения схем защиты с применением ЛР. При выборе схемы расстановки ЛР на линии необходимо учитывать следующее. Зона защиты ЛР при ударах молнии в провод при уровне надежности 0,9 составляет порядка 200 м. Таким образом, для обеспечения эффективной защиты при длине пролета 300 м и более необходима установка ЛР на каждой опоре. При длине пролета менее 200 м допустима односторонняя защита - установка ЛР только на одной опоре пролета. Зона защиты ЛР при ударах молнии в трос (защита от обратных перекрытий) ограничивается местом его установки. То есть ЛР защищает изоляцию только на той опоре, где он установлен. В этом случае, независимо от длины пролета, необходима установка ЛР на каждой опоре.

Рекомендуемые схемы защиты в зависимости от области применения и назначения ЛР приведены в табл.3. Они представляют компромиссное решение между надежностью защиты и затратами на ее реализацию.

Рекомендуемые схемы защиты

Область применения (назначение ЛР)	Схема защиты (расстановка ЛР на линии)	Число грозовых отключений, 1/100 км/год
<i>Защита ВЛ 330, 500 кВ без тросов</i>	<ul style="list-style-type: none"> • на каждой опоре • на крайних фазах • односторонняя защита коротких пролетов <200 м 	1,5
<i>Защита двухцепных ВЛ 110 кВ с тросом при сопротивлении заземления опор ~ 100 Ом</i>	<ul style="list-style-type: none"> • на каждой опоре • на трех фазах 1 цепи 	1 цепь – нет 2 цепь – 9,0
<i>Защита двухцепных ВЛ 110 кВ без троса при сопротивлении заземления опор ~ 100 Ом</i>	<ul style="list-style-type: none"> • на каждой опоре • на трех фазах 1 цепи • на верхней фазе 2 цепи 	1 цепь – нет 2 цепь - ≤ 5

Выбор конструкции ЛР.

В настоящее время применяются ЛР двух типов [1]. Первый тип – это разрядники с внешним искровым промежутком, отделяющим нелинейное сопротивление от провода. Второй тип – разрядники без искрового промежутка, то есть с прямым подключением нелинейного сопротивления к проводу (линейные ОПН).

Выбор типа (конструкции) ЛР определяется условиями их применения.

Для защиты ВЛ без тросов при нормальных сопротивлениях заземления опор предпочтительны ЛР без искрового промежутка (линейные ОПН). В этих случаях основную роль играют прямые удары молнии в фазные провода и при установке линейных ОПН обеспечивается более равномерное распределение энергии разряда молнии между ОПН на соседних опорах (достигается эффект распределенного ОПН). Это позволяет снизить требования к удельной энергоемкости ОПН по сравнению с ЛР с искровым промежутком.

Для защиты изоляции ВЛ с тросом при больших сопротивлениях заземления опор предпочтительны ЛР с внешним искровым промежутком. В этом случае основную роль играет защита изоляции ВЛ от обратных перекрытий при ударах молнии в трос или опору. При таких воздействиях распределение энергии разряда молнии между ОПН на соседних опорах не происходит и требования к удельной энергоемкости для ЛР различного типа практически одинаковы. Определяющими являются такие показатели, как стоимость, надежность работы, удобство монтажа и обслуживания. По этим показателям ЛР с внешним искровым промежутком предпочтительны по сравнению с линейными ОПН.

Токовые и энергетические воздействия на ЛР при ударах молнии в линию.

Амплитуда разрядного тока и энергия, поглощаемая ЛР при ударах молнии в линию, являются случайными величинами, зависящими от параметров импульса тока и величины заряда вспышки молнии, а также от конструктивных параметров ВЛ, места удара молнии в пролете и сопротивления заземления опор. С точки зрения энергии, поглощаемой ЛР, определяющим является суммарный заряд вспышки молнии, переносимый импульсами тока первого и последующих ударов.

Для определения токовых и энергетических воздействий на ЛР были проведены расчеты электромагнитных процессов при ударах молнии в линию с использованием комплексов программ ЕМТР и МАЭС.

Результаты расчетов применительно к установке линейных ОПН для защиты ВЛ 500 кВ без тросов представлены на рис.1-3, где показаны зависимости приведенной энергии, поглощаемой ОПН, от величины заряда (Q_m), параметров импульса тока молнии, длины пролета и координат точки удара молнии в пролете. Приведенная энергия (W^*) численно

равна удельной энергии, поглощаемой ОПН на единицу заряда. Она определялась путем пересчета полной энергии (W_{Σ}), как $W^* = W_{\Sigma} / U_{ном} / Q_M$ (здесь $U_{ном}$ – номинальное напряжение ОПН).

При неизменной величине заряда приведенная энергия существенным образом зависит от параметров импульса тока молнии: амплитуды и длительности (см. рис. 1.). То есть от того, каким способом переносится данный заряд: большим током малой длительности или же, напротив, малым током большой длительности. С уменьшением амплитуды и пропорциональным увеличением длительности импульса тока приведенная энергия снижается. Это объясняется лучшим распределением энергии между соседними ОПН на длинном импульсе и большей долей энергии, отводимой в линию при малых токах. В методическом плане это означает, что при расчетах энергии, поглощаемой ОПН, для получения не заниженных оценок следует принимать параметры расчетных импульсов тока с возможно меньшей длительностью, которая, по крайней мере, не должна превышать предельно наблюдаемых длительностей импульсов тока с вероятностью 5%.

Приведенная энергия зависит от длины пролета и места удара молнии в пролете ВЛ (см. рис.2 и 3). С увеличением длины пролета энергия возрастает. Наибольшая энергия поглощается ОПН, установленным на ближайшей к точке удара опоре пролета.

Амплитуда разрядного тока через ОПН также существенным образом зависит от места удара молнии в пролете и длины пролета. Наиболее тяжелый случай – удар молнии вблизи опоры на расстоянии 50 м (более близкие удары можно не принимать во внимание). В этом случае при длине пролета 300 м амплитуда тока через ОПН может превысить предельно допустимую величину 100 кА при токе молнии 150 кА, а при длине пролета 600 м – при токе молнии 120 кА. Наиболее легкий случай – удар молнии в середину пролета. В этом случае ток молнии симметрично распределяется между ОПН на смежных опорах пролета. Амплитуда разрядного тока через ОПН не превышает 100 кА даже при токах молнии близких к предельно наблюдаемым (200 кА) и при длинах пролетов вплоть до 600 м. Расчетные законы распределения амплитуды разрядного тока через ОПН в области малых вероятностей показаны на рис.4.

Результаты расчетов применительно к установке ЛР с внешним искровым промежутком для защиты двухцепных ВЛ 110 кВ при больших сопротивлениях заземления опор представлены на рис.5-7. Необходимо отметить следующие особенности.

При ударе молнии в линию происходит срабатывание разрядников на нескольких опорах. На пораженной или ближайшей к месту удара опоре срабатывают все три разрядника (на верхней, средней и нижней фазах) даже при относительно небольших амплитудах тока 25 кА. При этом из-за не симметрии линии первым срабатывает разрядник на нижней фазе, а наибольшая энергия поглощается разрядником на верхней фазе. Амплитуда разрядного тока не превышает 35 кА даже при предельно наблюдаемой амплитуде тока молнии 200 кА.

Режим срабатывания разрядников на соседних опорах зависит от параметров импульса тока молнии (см. табл.5, 6). При относительно небольших амплитудах тока на уровне 25 кА срабатывают только по одному разряднику на 4 соседних опорах (как слева, так и справа от пораженной опоры). При амплитудах тока, близких к 100 кА, срабатывают все разрядники на 3 соседних опорах и 1 разрядник на 4 опоре.

Наибольшая энергия поглощается ЛР на пораженной опоре. Энергия, поглощаемая ЛР на соседних опорах, существенно в 5–20 раз меньше. Следует отметить, что эффект перераспределения энергии между ЛР достигается только для разрядников на пораженной опоре. Разрядники на соседних опорах в перераспределении энергии не участвуют, и их срабатывание только увеличивает энергию, поглощаемую ЛР на пораженной опоре.

С увеличением сопротивления заземления опор приведенная энергия возрастает. В наибольшей степени это проявляется при значениях сопротивления заземления в диапазоне 50 – 100 Ом. При больших значениях сопротивления заземления (в диапазоне 100-200 Ом и более) возрастание энергии не столь значительно.

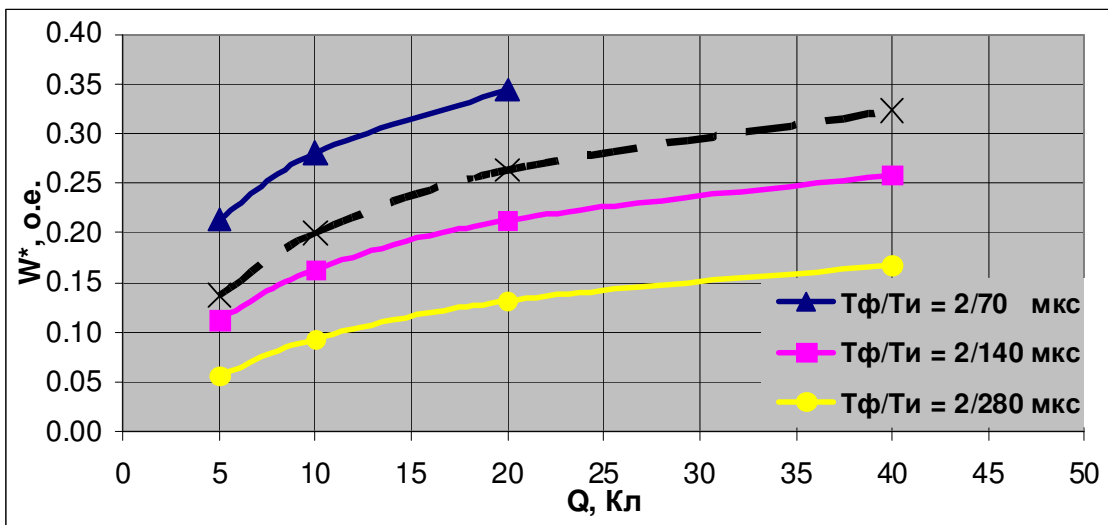


Рис.1. Зависимость приведенной энергии от величины заряда и параметров импульса тока молнии

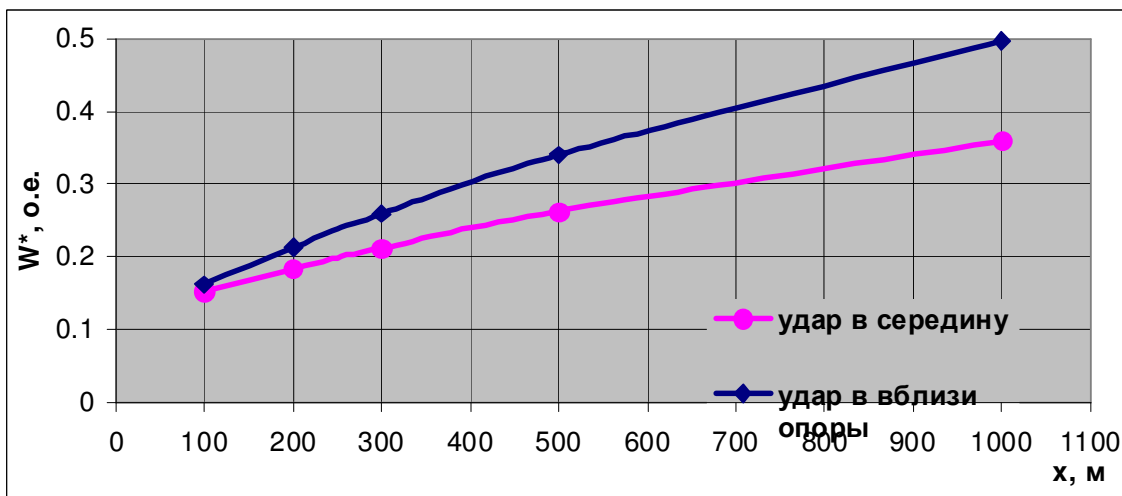


Рис.2. Зависимость приведенной энергии от длины пролета ($T_{\phi}/T_{и} = 2/140$ мкс, $I_M = 100$ кА)

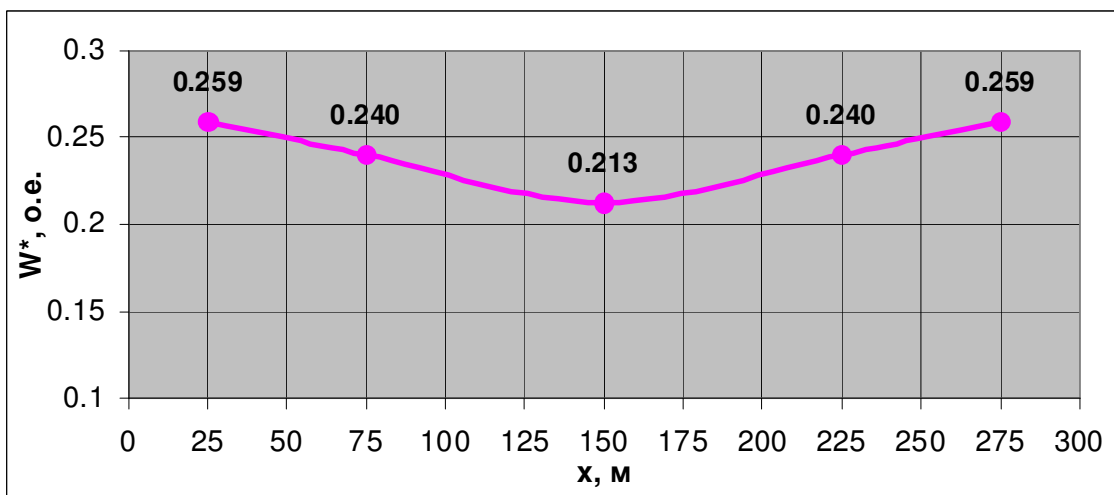


Рис.3. Зависимости приведенной энергии от места удара в пролете ($L_{np} = 300$ м, $T_{\phi}/T_{и} = 2/140$ мкс, $I_M = 100$ кА)

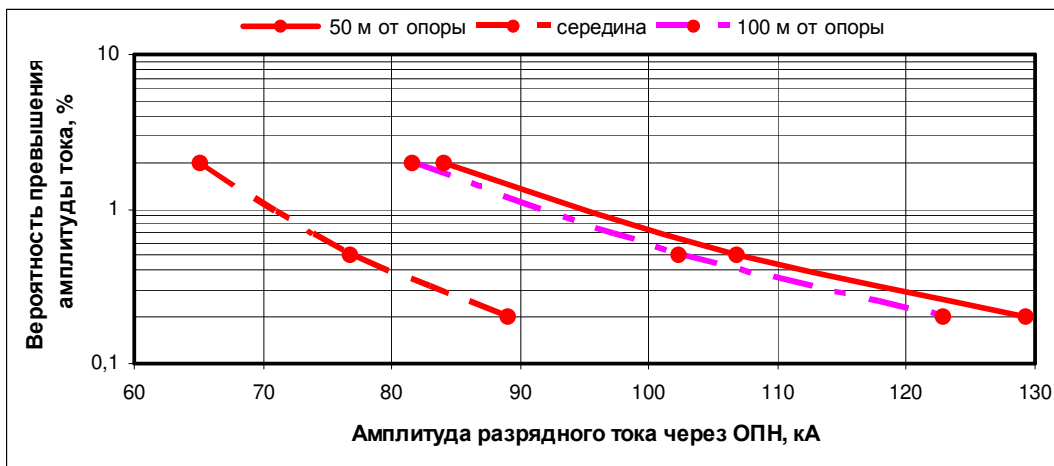


Рис. 4. Законы распределения амплитуды разрядного тока через ОПН

Таблица 5

Ток молнии 25 кА, разряд 5 Кл.

Номер опоры		1	2	3	4	5
Срабатывание	С	●	○	○	○	○
разрядников на	В	●	○	○	○	●
фазах	А	●	●	●	●	○
Максимальная энергия, поглощаемая разрядником, кДж		8,5	0,6	1,1	1,3	1,7

Таблица 6

Ток молнии 100 кА, разряд 20 Кл.

Номер опоры		1	2	3	4	5
Срабатывание	С	●	●	●	●	●
разрядников на	В	●	●	●	●	○
фазах	А	●	●	●	●	○
Максимальная энергия, поглощаемая разрядником, кДж		150,0	6,5	10,8	19,0	38,0

Условные обозначения: ● / ○ – срабатывание/несрабатывание разрядников на фазах;
А, В, С – нижняя, средняя и верхняя фазы соответственно.

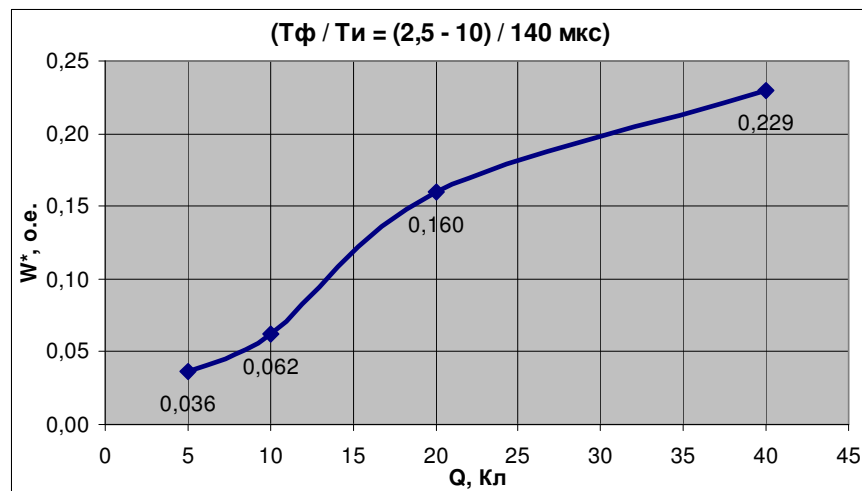


Рис. 5. Зависимость энергии, поглощаемой ЛР, от заряда вспышки молнии
($T_{\phi}/T_{и} = (2,5 \div 10)/140$ мкс)

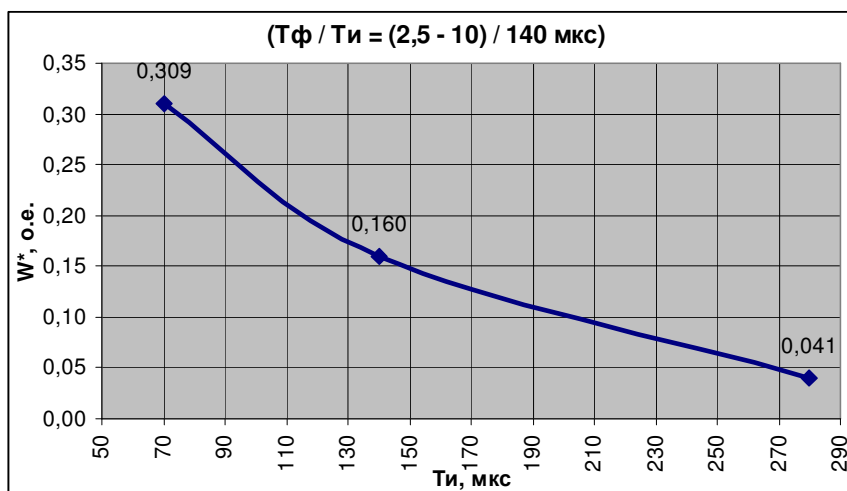


Рис. 6. Зависимость энергии от параметров импульса тока молнии ($Q = 20$ Кл)

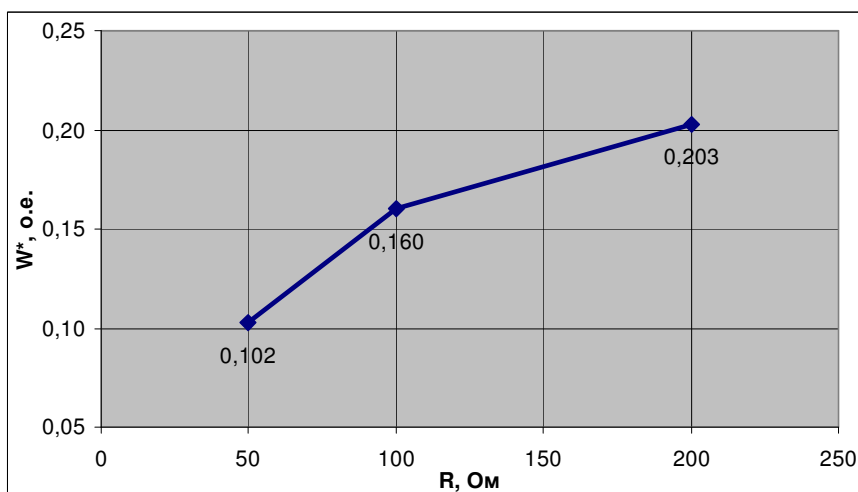


Рис. 7. Зависимость энергии от сопротивления заземления опор ВЛ (импульс тока 100 кА, 10/140 мкс)

Выбор пропускной способности (удельной энергии) ЛР.

Пропускная способность выбирается исходя из условия обеспечения надежной работы ЛР при ударах молнии в линию. Показателем надежности является поток отказов – допустимое число повреждений ЛР в год, вызванных ударами молнии.

Ожидаемое число повреждений ЛР ($N_{повр}$) определяется как

$$N_{повр} = N_{уд} \times P_{повр}, \quad (1)$$

где $N_{уд}$ – число ударов молнии в защищаемый участок линии в год, $P_{повр}$ – вероятность повреждения ЛР при ударе молнии.

Вероятность повреждения ЛР определяется как:

$$P_{повр} = P(W_{ЛР} > W_H),$$

где $W_{ЛР}$ – энергия, поглощаемая ЛР при ударе молнии, W_H – предельно допустимая (нормированная) энергия, которую может поглощать ЛР без риска для повреждения. Энергию, поглощаемую ЛР, можно представить в виде:

$$W_{ЛР} = W^* \times U_{н.р.} \times Q_M,$$

где Q_M – заряд вспышки молнии, $U_{н.р.}$ – наибольшее рабочее напряжение ЛР. С учетом этого выражение для вероятности повреждения ЛР запишется в виде:

$$P_{повр} = P(Q_M > Q_{доп} = W_{i.доп} / W^*), \quad (2)$$

где $W_{н.уд}$ – нормированная удельная энергоемкость ОПН.

Выражения (1), (2) в неявном виде устанавливают связь между удельной энергоемкостью и потоком отказов ЛР. Расчет производится следующим образом.

1. При данном значении потока отказов по выражению (1) определяется допустимая вероятность повреждения ЛР.

2. При известном законе распределения Q_m по выражению (2) определяется некоторая критическая величина заряда вспышки молнии $Q_{крит.}$, отвечающая допустимой вероятности повреждения ЛР ($P_{повр.}$).

3. При данной величине $Q_{крит.}$ рассчитывается приведенная энергия (W^*) и определяется соответствующая ей величина удельной энергоемкости, на которую должен быть рассчитан ЛР.

Расчетная модель переноса заряда вспышки молнии для определения приведенной энергии принимается следующей:

- первый удар – импульс тока 2/140 мкс с зарядом Q_1 ;
- последующие удары – 2 импульса тока 2/140 мкс с зарядом $Q_2 = 0,25 Q_1$.

Величина критического заряда при данной вероятности превышения определяется на основе статистических данных о параметрах разрядов молнии, приведенных в [3].

Энергия, поглощаемая ЛР при данной величине заряда (Q_1, Q_2), определяется на основании расчетных зависимостей, приведенных выше. Суммарная приведенная энергия определяется, как $W_{сум}^* = W^*(Q_1) + 2W^*(Q_2)$.

Расчетные зависимости потока отказов от удельной энергии, которую способны поглощать ЛР без риска для повреждения, приведены на рис. 8,9.

Поток отказов для линейных ОПН рассчитан для участка линии 330, 500 кВ без троса длиной 100 км при числе ударов молнии в защищаемый участок – 15 в год. В соответствии с расчетными данными приемлемые показатели надежности – не более 0,2-0,3 повреждений в год могут быть обеспечены при удельной энергии, которую способен поглощать ОПН без риска для повреждения, равной 10-12 кДж/кВ (по отношению к номинальному напряжению ОПН).

Поток отказов для ЛР с внешним искровым промежутком рассчитан для участка линии 110 кВ длиной 80 км при числе ударов молнии в защищаемый участок – 7,2 в год. Согласно расчетным данным приемлемые показатели надежности – не более 0,1 повреждения в год могут быть обеспечены при удельной энергии, которую способен поглощать ЛР без риска для повреждения, равной 6 - 7 кДж/кВ. При этом нормированная удельная энергия ЛР должна составлять 3-3,5 кДж/кВ (по отношению к наибольшему рабочему напряжению ЛР).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гайворонский А.С. Линейные разрядники. Радикальное средство грозозащиты ВЛ. Новости электротехники, №2(38), 2006.
- [2] Гайворонский А.С., Карасюк К.В. Новые методические принципы оценки грозоупорности воздушных линий электропередачи высших классов напряжения. Научный вестник НГТУ, №2(5), 1998.
- [3] K. Berger, R.B Anderson H. Kroninger. Parameters of Lightning Flashes, Electra, №41, 1975.