

Оценка грозоупорности двухцепных воздушных линий 110 кВ без молниезащитного троса с применением мультикамерных разрядников нового поколения

О данным ПАО Россети, одной из главных причин аварийных отключений ВЛ 110 кВ и выше является воздействие молнии. Для молниезащиты ВЛ 110 кВ в компании «АО «НПО «Стример» разработано инновационное средство – мультикамерные разрядники закрытого типа РМКЗ-110. В данной работе проведена расчётная оценка интенсивности аварийных отключений двухцепных ВЛ 110 кВ, эксплуатируемых без молниезащитного троса, возникающих в следствие молниевых перенапряжений. При помощи математического моделирования с использованием статистического метода Монте-Карло определены параметры и количество импульсных воздействий, используемых при испытаниях разрядников на отключающую способность. В заключении приведены результаты расчёта, позволяющие определить эффективность молниезащиты двухцепных ВЛ 110 кВ при различных схемах расстановки РМКЗ-110.

Введение

Передача электроэнергии потребителям на линиях 110 кВ зачастую осуществляется на двухцепных опорах для уменьшения габарита трассы воздушной линии. Для надежного обеспечения электроснабжения ВЛ 110 кВ в обязательном порядке оборудуются молниезащитными тросами (МЗТ). Однако в нашей стране большой процент МЗТ уже выработал свой ресурс, что существенно снижает надёжность его эксплуатации. Проблему также усугубляют дополнительные негативные факторы в виде гололёдообразования и коррозии, которые часто приводят к обрывам МЗТ и его падению на фазные провода. В связи с вышеперечисленными фактами в некоторых регионах нашей страны оборванный трос не восстанавливают, предпочитая применение дополнительных средств молниезащиты на открывшихся участках ВЛ.

К устройствам, обеспечивающим защиту ВЛ без МЗТ, предъявляются высокие требования по способности выдерживать токи прямых ударов молнии (ПУМ). Если рассматривать защиту ВЛ на базе ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН), то в их классификации введён параметр – пропускная способность и аппараты для защиты от ПУМ должны обладать одним из высших её классов 4 или 5. Если говорить о защите ВЛ на базе мультикамерных разрядников (РМК), то основным параметром, характеризующем их способность выдерживать токи ПУМ является способность выдерживать давление, которое возникает в камерах во время протекания тока молнии. Для проверки используется генератор токов молнии, а параметры и число воздействий подбираются по расчётной модели.

В АО «НПО «Стример» разработан новый тип молниезащитных мультикамерных разрядников закрытого типа – РМКЗ-110 (рис. 1а) [1]. Более подробно конструкция и характеристики РМКЗ-110 описаны в [1]. Здесь же следует акцентировать внимание лишь на его отличиях от нелинейных ограничителей перенапряжения (ОПН). Несмотря на сходство внешнего вида, принципы работы РМКЗ и ОПН различаются. В отличие от варисторов,

основными рабочими элементами РМКЗ являются разрядные модули (рис. 1б), которые в своей конструкции не содержат материалов с нелинейными характеристиками. Коротко о принципе работы.

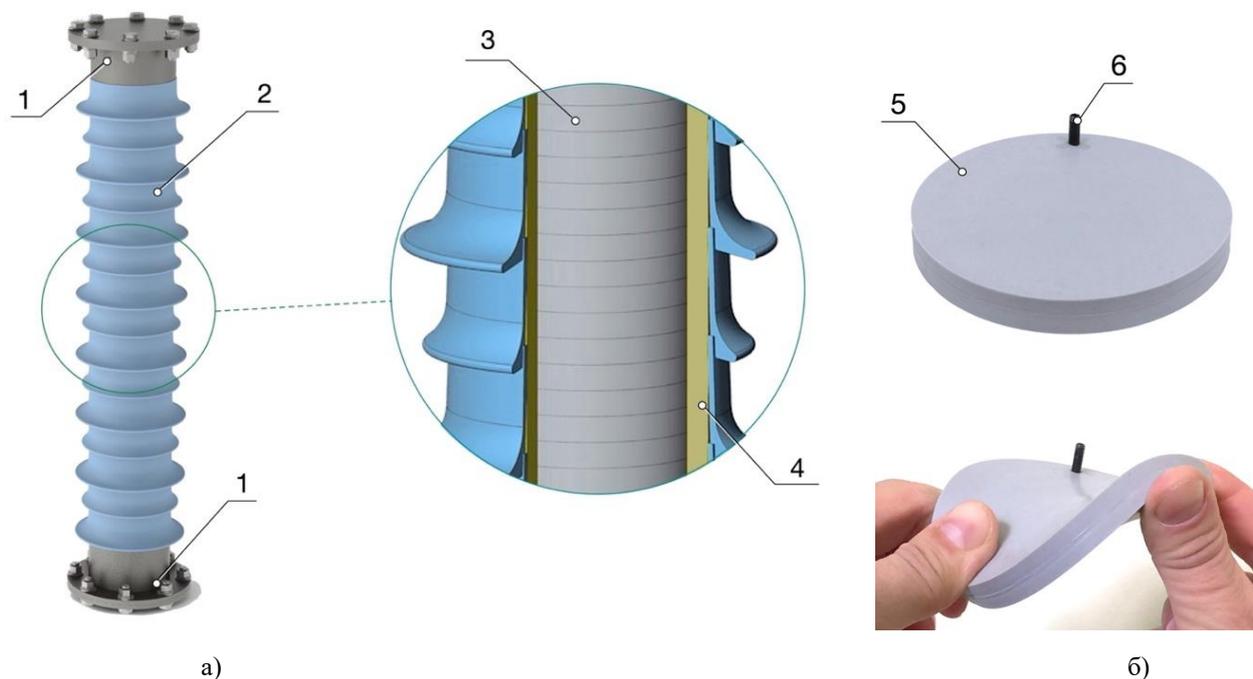


Рис. 1 - Конструкция РМКЗ-110:

- а) – РМКЗ внешний вид с разрезом; б) – единственный разрядный модуль;
 1 – верхний и нижний оконцеватели; 2 – оболочка корпуса; 3 – колонка разрядных модулей;
 4 – стеклопластиковая труба; 5 – тело разрядного модуля;
 6 – подводящий концевой электрод.

Перенапряжение, вызванное воздействием молнии, приводит к срабатыванию РМКЗ (рис 2а). После протекания тока молнии МКС разрядника препятствует возникновению тока КЗ сети за счёт суммарного падения напряжения на нескольких тысячах последовательно соединённых искровых промежутках, которое по величине существенно превосходит приложенное напряжение сети. Общее время работы РМКЗ составляет менее 1 мс, что не чувствительно для микропроцессорных и релейных защит ВЛ. Аварийного отключения не происходит.

По пропускной способности РМКЗ-110 является конкурентом ОПН самого высокого 5 класса по [3], выдерживая двадцатикратное протекание импульса тока с зарядом 2,4 Кл.

Установка РМКЗ на ВЛ 110 кВ выполняется электрически параллельно любому виду линейной изоляции с искровым воздушным промежутком между высоковольтным электродом разрядника и электродом дополнительного изолятора, соединённого с фазным проводом (рис. 2а). Наличие искрового промежутка изолирует РМКЗ от непрерывного воздействия рабочего напряжения сети, а также исключает срабатывания от внутренних сетевых перенапряжений, что благотворно сказывается на надёжности и долговечности устройства. Включение РМКЗ в

работу осуществляется только при пробое искрового промежутка вследствие возникшего грозового перенапряжения.

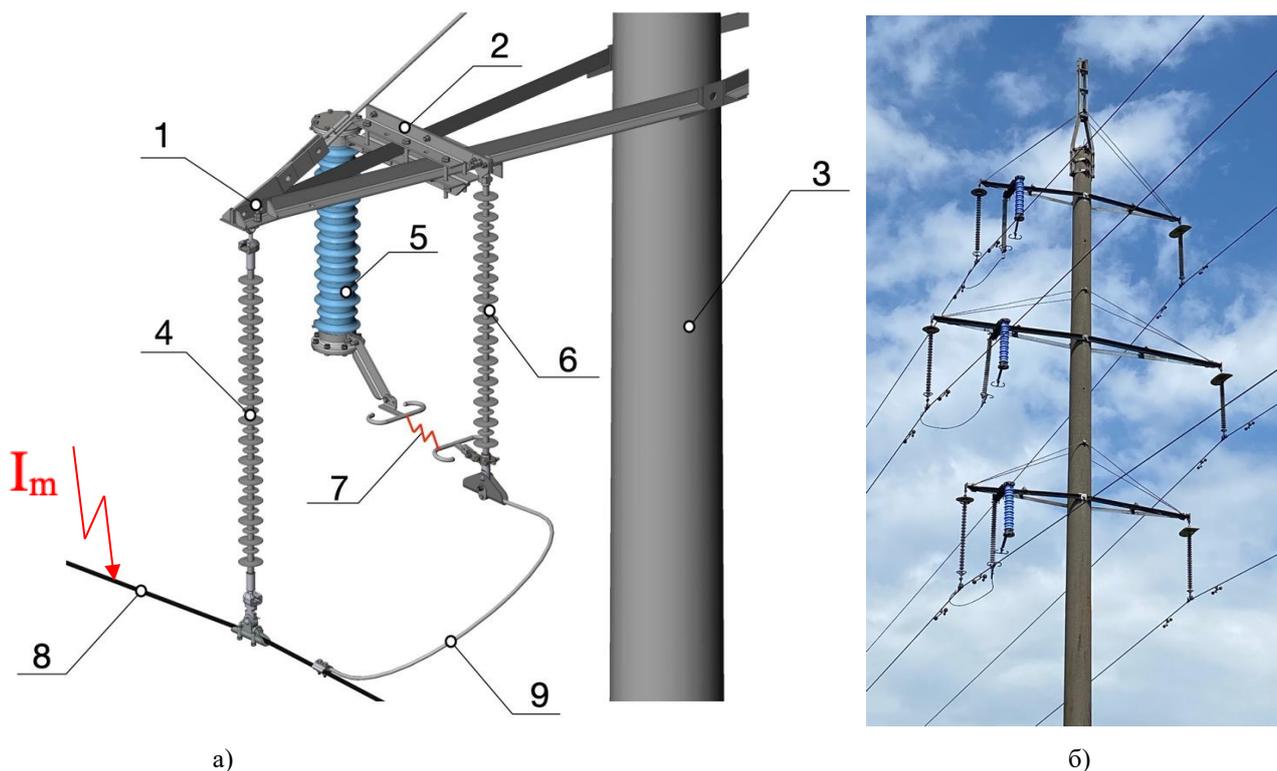


Рис.2 – РМКЗ-110 на ВЛ:

а) с позициями; б) фото на ВЛ;

- 1) траверса опоры; 2) дополнительная траверса РМКЗ-110; 3) стойка опоры; 4) линейный изолятор
5) РМКЗ-110; 6) дополнительный изолятор; 7) искровой воздушный промежуток; 8) фазный провод; 9) Шлейф для подключения РМКЗ-110; I_m – ток молнии.

Для определения необходимого ресурса срабатываний РМКЗ-110, а также выбора эффективной схемы расстановки разрядников на опоре проведена расчётная оценка в программе АТР -ЕМТР.

Расчетная методика по определению числа грозовых отключений воздушной линии электропередач 110 кВ и оценки воздействий на молниезащитные устройства

Задача по определению числа грозовых отключений ВЛ состоит включает себя следующие расчеты:

- расчет числа ударов молнии, зависящей от грозовой активности в рассматриваемом регионе и высоты опоры, определяющейся следующим выражением [2]:

$$N_{ПМ} = 0,2N_g \left(\frac{b}{2} + 5h - \frac{h^2}{15} \right) \quad (1)$$

где N_g – число ударов молний в землю, ударов/км²/год;

b – ширина линии, м;

h – средняя высота подвеса фазного проводника, м

- расчет параметров молнии;
- расчет вероятности перекрытия изоляции или срабатывания разрядника;
- расчет вероятности установления дуги;

Каждый расчет регламентируется нормативными документами [2], [3]. В них приводятся обобщенные случаи для ВЛ 110 кВ. Однако, особенности трассы, на которой проходит линия, различны, поэтому необходимо принимать это во внимание и производить расчет для каждой линии в отдельности. Для определения ежегодного числа грозовых отключений ВЛ 110 кВ подробно будет рассмотрен расчет вероятности перекрытия изоляции или срабатывания разрядника. Данный вопрос будет решен посредством математического моделирования воздушной линии 110 кВ, незащищенной грозозащитным тросом.

Для расчета вероятности перекрытия изоляции/срабатывания разрядника при ударе молнии в линию, используется программный комплекс АТР-ЕМТР, который позволяет создать модель воздушной линии на основе ее схемы замещения (рис. 3). Элементы схемы замещения представляют:

- Модель длинной линии с использованием LCC блока с уточнением геометрического расположения фазных проводов на опоре и высоту их подвеса, а также параметров проводника;
- Траверы и стойки опор в виде сосредоточенной индуктивности, учитывая размеры опоры;
- Изоляция – управляемый ключ, который замыкается при превышении импульсной прочности изоляции, соответствующей классу напряжения.
- Разрядник представляет собой нелинейный элемент с собственной ВАХ, полученной из опытных осциллограмм.

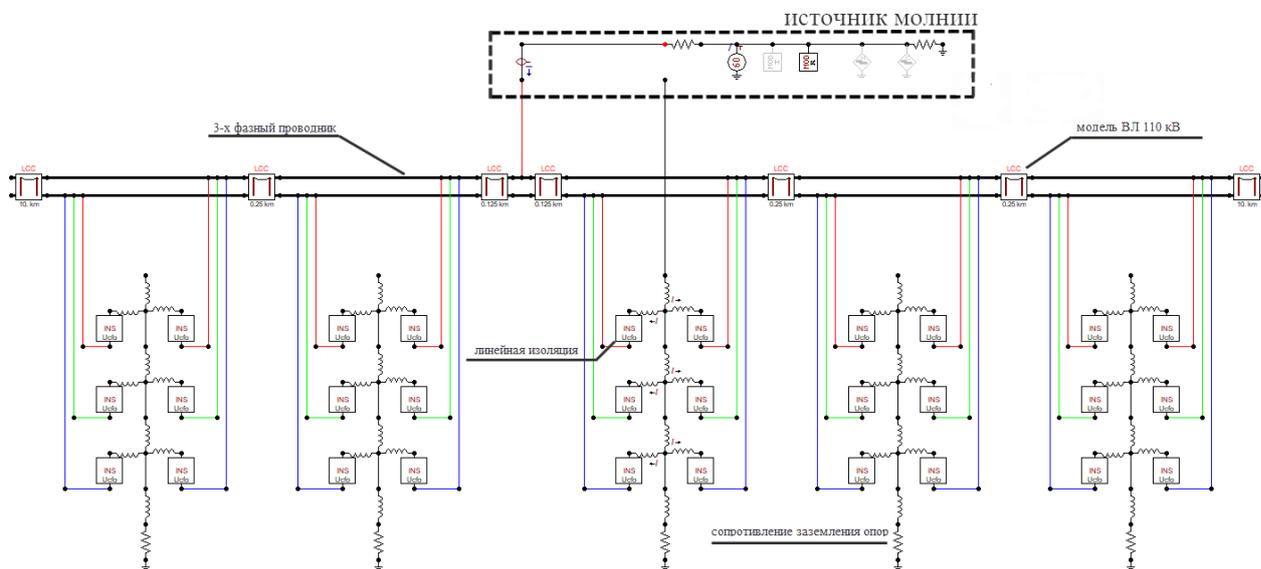


Рис. 3. Расчетная схема для реализации метода Монте-Карло

Суть метода Монте-Карло заключается в многократном расчете исходной модели ВЛ с использованием генератора случайных величин согласно заданному распределению. На основе полученных данных производится анализ вероятностных характеристик. Для его реализации в расчетную схему добавляется статистический элемент, позволяющий получать параметры

генерируемых импульсов молнии с учетом логнормального распределения. На каждом расчетном шаге удар молнии характеризуется собственными параметрами: амплитудное значение тока молнии, время фронта и длительность фронта. Параметры молнии задаются согласно рекомендациям SIGRE [3]. Фиксируется величина тока, проходящего через изоляцию или разрядник. В модели задается количество расчетных экспериментов – 5000 ударов молнии в участок опора – пролет. Часть ударов приходится в опору, часть ударов – в середину пролета (в трос – при наличии грозозащитного троса, в фазный проводник – при отсутствии троса). Из общего числа ударов фиксируется число молний, вызвавших перекрытия изоляции/срабатывания разрядников для расчета числа грозовых отключений на ВЛ.

Оценка воздействий импульсов производится серией расчетов. Расчетная схема обчисляется 5000 ударами в середину пролета и в опору. Все параметры молнии – амплитуда тока молнии и длительность до полуспада – задающиеся источники молнии, фиксируются. Далее, производится анализ параметров и оценивается уровень тока, протекающий через ближайший разрядник, к которому приведут 95% всех молний, поразивших ВЛ.

Определение числа срабатываний разрядников за весь период эксплуатации

Произведя количественную оценку воздействий на разрядник, для формирования программы испытаний необходимо определить количество срабатываний разрядника на ВЛ 110 кВ без грозотроса с помощью расчетов.

Число срабатываний разрядника $n_{\text{разр}}$ определяется суммой числа срабатываний от удара молнии в опору и числа срабатываний от удара молнии в пролет. При ударе молнии в пролет электромагнитная волна напряжения распространяется по обе стороны от места удара и однозначно приведет к срабатыванию разрядников на ближайших опорах. При попадании молнии в опору срабатывание разрядника происходит в следствие обратных перекрытий на этой опоре. Разрядники РМКЗ-110 с гашением в импульсе имеют отличительную особенность по сравнению с разрядниками с гашением в нуле. Необходимо рассматривать не только ближайшие к месту удара молнии разрядники, но и разрядники на следующих опорах, т.к. удар молнии может обеспечить и их срабатывание. С ростом сопротивления заземления количество опор, на которых происходит срабатывания разрядников увеличивается. Таким образом, общее число срабатываний одного разрядника будет складываться, как число срабатываний от ударов молнии в место, ближайшее к месту установки разрядника, а также число срабатываний, вызванных распространением волны тока от удара на дальних опорах.

Задача по определению числа срабатываний разрядников представляет собой решение задач, как при определении ежегодного числа грозовых отключений. В данном случае, стоит учитывать срок службы молниезащитного устройства. Согласно, руководству по эксплуатации разрядника РМКЗ-110 срок службы составляет 30 лет. При решении данной задачи необходимо понимать, какими воздействиями будет вызвано большинство срабатываний разрядника.

Схемы расстановки защитных аппаратов на двухцепных ВЛ 110 кВ на участках без молниезащитного троса

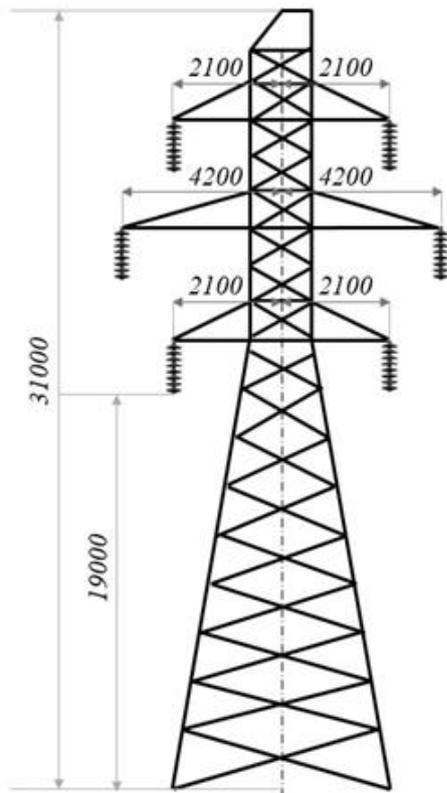


Рис. 4. Типовая опора ВЛ 110 кВ

Для анализа эффективности различных схем расстановки разрядников используются следующие входные параметры:

- Двухцепная воздушная линия 110 кВ (рис.4);
- Опора П110-4в с высотой $h=31$ м. со стандартной длиной пролета $l=250$ м.;
- Импульсная прочность гирлянды изоляторов 8хПС70Е $U_{50\%}=600$ кВ;
- Импульсная прочность разрядника $U_{50\%}=550$ кВ;
- Медианное значение максимума тока молнии и среднеквадратичное отклонение $\bar{I} = 31$ кА, $\sigma_I = 0,29$;
- Распределение ударов опора–пролет определялось исходя из длины пролета и высоты опоры по следующему выражению [2]:

$$P_{on} = \frac{4 \cdot h_{on}}{l_{np}}, \quad P_{np} = 1 - P_{on} \quad (2)$$

где h_{on} — высота опоры, l_{np} — длина пролета.

- Сопротивление заземления опор 5...50 Ом.

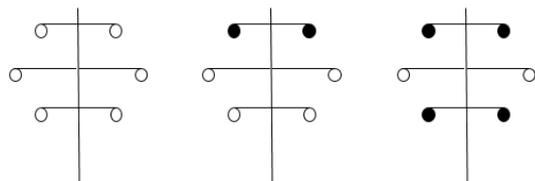
Для ВЛ, выполненных на двухцепных опорах существует два подхода к схемам расстановки защитных аппаратов. Первый подход предполагает установку разрядников на фазе каждой цепи. Эффективность от установки молниезащитных устройств по снижению числа грозовых отключений ВЛ определяется числом защитных аппаратов на опоре. При этом уровень грозоупорности при одинаковом числе разрядников будет зависеть и определяться сопротивлением заземления опор. Для участка без грозозащитного троса, проходящего на двухцепной опоре предлагаются следующие схемы расстановки разрядников (рис.5а):

1. по 2 разрядника на опору на верхнюю фазу;
2. по 4 разрядника на опору на верхнюю и нижнюю фазы;
3. по 4 разрядника на опору на верхнюю и нижнюю фазы;
4. по 6 разрядников на опору на все фазы;

Помимо защиты одновременно допускается защита только одной цепи комплектами разрядников (рис.5б). Такой вариант может сократить затраты на молниезащитные мероприятия, а также актуален, в случае, когда отключения ВЛ фиксируются чаще всего на одной цепи или на высоких сопротивлениях заземления, когда вероятность междуфазных перекрытий возрастает. Такой подход уменьшает число отключений не только на защищаемой

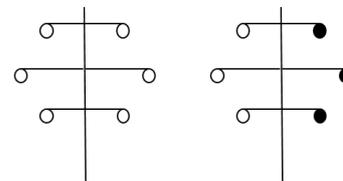
цепи, но и на второй цепи без разрядников. Здесь рассматривается один вариант схемы расстановки разрядников — с полной защитой одной цепи:

В таком подходе интересно проводить анализ отключений каждой цепи отдельно для оценки эффективности от установки молниезащитных устройств.



○ – без молниезащитных устройств
● – с молниезащитными устройствами

Рис. 5а – Двухцепная схема защиты ВЛ 110 кВ



○ – без молниезащитных устройств
● – с молниезащитными устройствами

Рис. 5б – Защита одной цепи ВЛ 110 кВ

Анализ полученных результатов

А) Результаты ежегодного числа грозовых отключений на двухцепной ВЛ 110 кВ без молниезащитного троса

На рис.6 представлена зависимость числа ежегодных отключений линии 110 кВ без грозозащитного троса на 100 км. длины при грозовой активности 100 г.ч. от сопротивления заземления при наличии молниезащитных устройств со схемой расстановки с защитой двух цепей одновременно. По представленным результатам видно, что установка 2 разрядников на опору на верхнюю фазу позволяет добиться такого же уровня грозоупорности, как и при наличии троса. Однако, эффективность такого подхода подтверждается на низких сопротивлениях заземления. С ростом сопротивления заземления увеличивается вероятность междуфазных перекрытий, и защита 2-мя разрядниками становится менее эффективной. Особое внимание стоит уделить защите 4-мя разрядниками на опоре. Исследования продемонстрировали, что данный вариант будет эффективным при установке разрядников на верхнюю и нижние фазы каждой цепи. Очередность перекрытия фаз зависит от емкостной связи между проводниками. При перекрытии изоляции на верхней фазе, следующая за ней перекроется изолятор, установленный на дальней фазе. Таким образом, устанавливая разрядники на верхнюю и среднюю фазы, защита нижней фазы не обеспечивается, что будет приводить, к отключению линии. При защите 4-мя или 6-ю разрядниками на всю ВЛ число отключений уменьшается более чем в 10 раз и практически не зависит от сопротивления заземления.

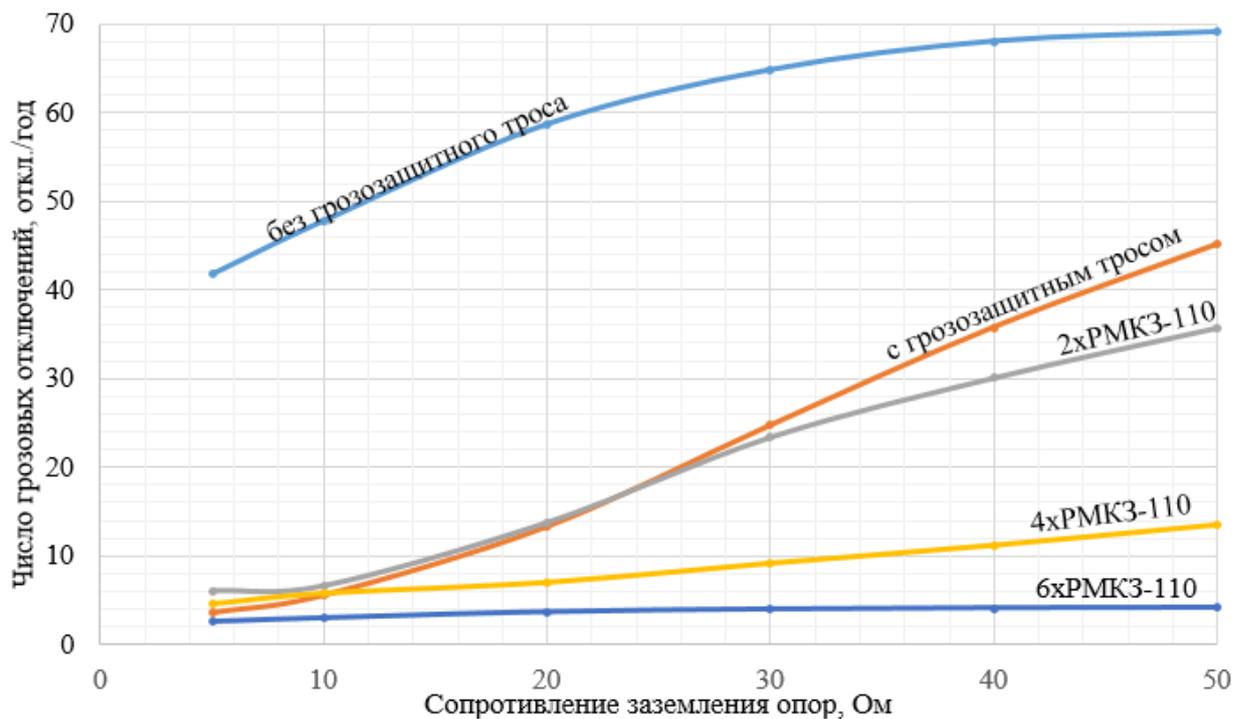


Рис. 6. Количество ежегодных грозных отключений ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор при защите двух цепей разрядниками

Рассмотрим схему защиты только одной цепи. На рис.7 приведено число отключений каждой цепи при отсутствии разрядников, а также при их наличии. Как видно, такой вариант уменьшает количество отключений защищенной цепи в более, чем 15 раз. Также наличие разрядников на одной цепи несколько снижают количество отключений на соседней цепи, не имеющей защиты. Это объясняется тем, что разрядное напряжение РМКЗ-110 примерно на 15 % ниже, чем разрядное напряжение линейной изоляции. Т.о. образовавшееся на стойке опоры импульсное перенапряжение срезается срабатыванием разрядника нижней фазы, что предотвращает обратное перекрытие линейной изоляции на незащищённой цепи.

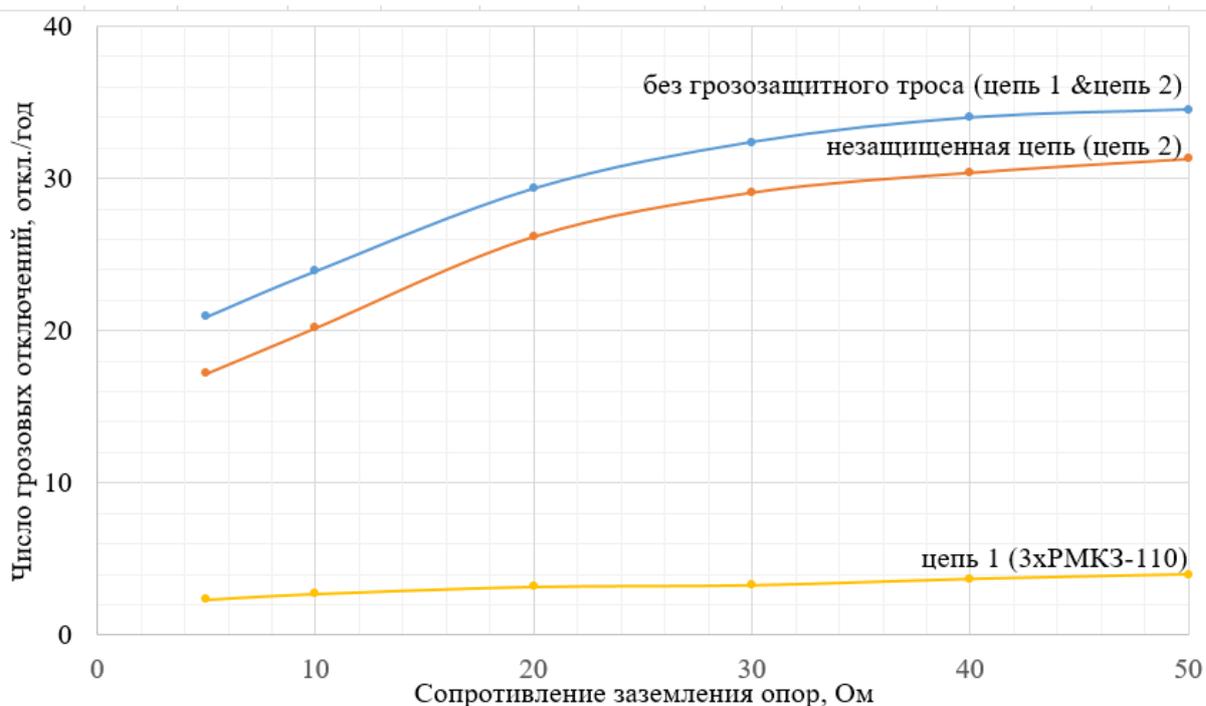


Рис. 7. Число ежегодных грозных отключений цепей ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор при защите одной цепи

Б) Результаты количественной оценки воздействий импульсов на защитные устройства

Перейдем к рассмотрению количественной оценки воздействий, приходящихся на разрядник РМКЗ-110, предназначенный для защиты от грозных перенапряжений на линиях без грозозащитного троса. Анализ расчетов по определению параметров воздействий на защитные устройства показывает, что при прямом ударе молнии через разрядник, установленный на верхней фазе протекает большой ток. Это объясняется тем, что при ударе молнии в пролет, отвода тока в землю не происходит, ввиду прямого протекания тока по проводу через разрядник. Кроме того, стоит отметить, что ток, протекающий через разрядник значительно меньше тока молнии, как по амплитуде, так и по длительности импульса до полуспада, что связано с нарастанием нелинейного сопротивления разрядника при протекании тока через него. При ударе молнии в опору, величина тока через защитный аппарат зависит от сопротивления заземления. С его ростом отвод тока в землю увеличивается, и большая часть тока протекает через устройство, что не изменяет форму импульса молнии. На рис. 8 представлена зависимость тока, протекающего через разрядник при ударе в опору и пролет в зависимости от сопротивления заземления при токе молнии 100 кА.

На рис. 9 представлено точечное распределение импульсов токов через ближайший к месту удара молнии разрядник. Из серии воздействий зафиксированы все удары молнии в пролет и опору, которые привели к срабатыванию разрядника при сопротивлении заземления 100 Ом. Для формирования программной методики испытаний необходимо рассматривать наиболее тяжелый случай эксплуатации. Именно поэтому в работе проводится анализ воздействий при сопротивлении заземления опор 100 Ом. На графике представлены характерные области ударов в пролет, характеризующиеся значительной величиной тока, проходящего через разрядник и достаточно короткими импульсами с характеристикой длительность импульса до полуспада. Удары в опору, наоборот, имеют меньшую амплитуду

тока, но значительную длительность импульса. Это связано с тем, что при ударе молнии в опору в следствие обратных перекрытий, все разрядники оказываются в одинаковых условиях и изменение формы импульса незначительно.

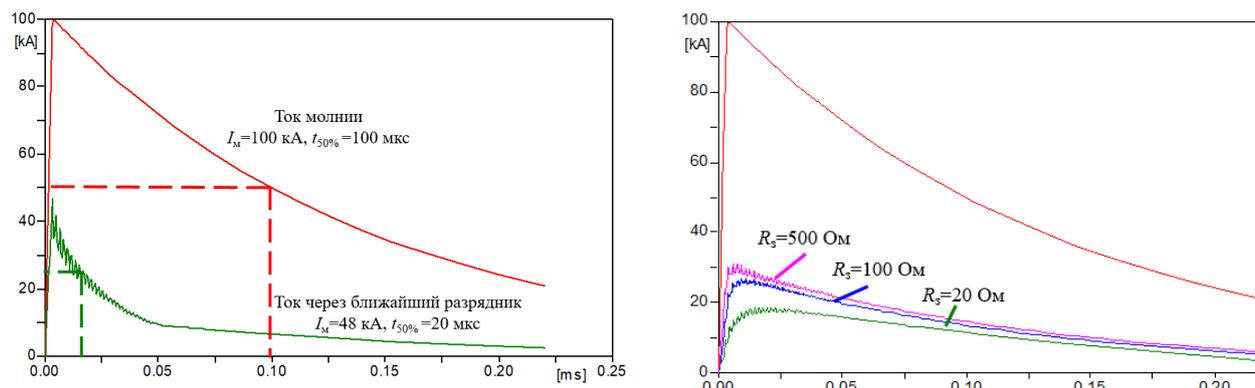


Рис. 8. Зависимость тока, протекающего через разрядник при ударе молнии в а) пролет, б) опору

В 95% случаев воздействия, приходящиеся на разрядник, установленный на верхней фазе, будут иметь параметры до 40 кА и длительностью до полуспада 150 мкс. Тем не менее, для формирования программы испытательных воздействий эту область можно разделить на несколько областей – удары в опору и удары в пролет, как показано на рис.9.

В) Результаты числа срабатываний молниезащитных устройств, установленных на ВЛ 110 кВ без троса и формирование программы испытаний разрядников

Оценка числа ударов молний на 100 км. за срок службы разрядников (30 лет) производится по формуле (1). При грозовой активности 100 г.ч., что равно 5 ударов/км²/год, для выбранной опоры получаем число попаданий молний в участок опора-пролет за 30 лет $N_{\text{Пум}} = 5,4$ уд. Таким образом, за весь срок службы около 2000-2200 молний поразит всю ВЛ, длиной 100 км. с длиной пролета 250 м. Часть из них характеризуются значительными токами, большими длительностями, что может привести к срабатыванию разрядника. По методу Монте-Карло в АТР-ЕМТР было определено какая часть всех молний приведет к срабатыванию разрядника.

В наиболее тяжелых условиях находятся разрядники, установленные на верхней фазе, так как изначально именно они пропускают через себя максимальное импульсное воздействие при ударе молнии в фазный провод. Для данных устройств рассмотрим, какая доля тока от амплитудного значения тока молнии, протекает через ближайший и дальние разрядники.

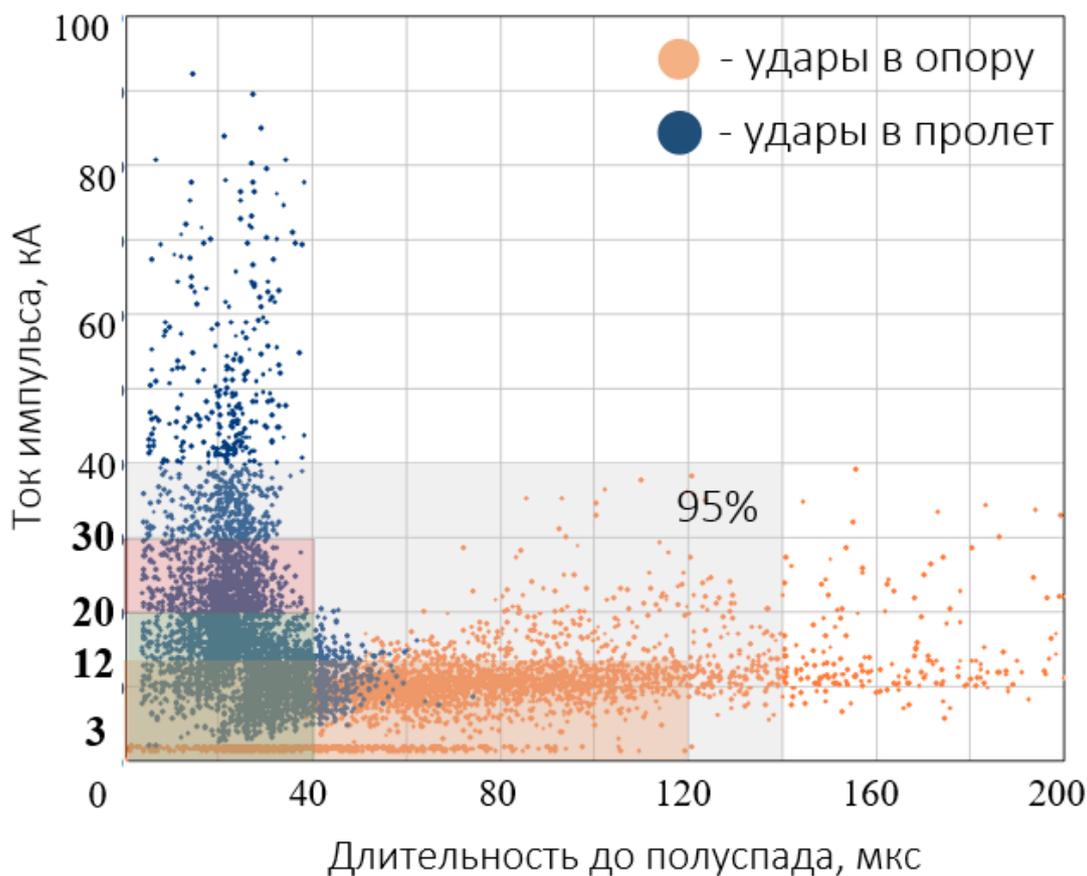


Рис. 9. Точечное распределение параметров импульса, протекающего через разрядник – тока импульса (ось Y) и длительность до полуспада (ось X) – при сопротивлении заземления опор 100 Ом.

На рис. 10 представлена диаграмма с результатами расчета числа срабатываний РМКЗ-110 каждой фазы опоры за срок эксплуатации 30 лет при грозовой активности $T_{г.ч.}=100$ г.ч. для трёх сопротивлений заземления опор: 10, 30 и 100 Ом.

Для всех случаев наблюдается срабатывание преимущественно разрядника верхней фазы А, так как при прямом ударе молнии в фазный провод, каждый удар сопровождается срабатыванием ближайшего разрядника верхней фазы. Разрядники на нижних фазах В и С имеют более низкий шанс срабатывания, так как это зависит как от тока молнии, так и от сопротивления заземления опор. С ростом сопротивления заземления опор растет число срабатываний разрядников, так как повышается шанс попадания молнии с низким критическим током, который приводит к срабатыванию молниезащитного устройства.

Выделяя самый опасный случай – сопротивление заземления опор 100 Ом для верхнего разрядника – максимальное число срабатываний разрядника РМКЗ-110 составляет около 20 раз за срок эксплуатации 30 лет при 100 г.ч.

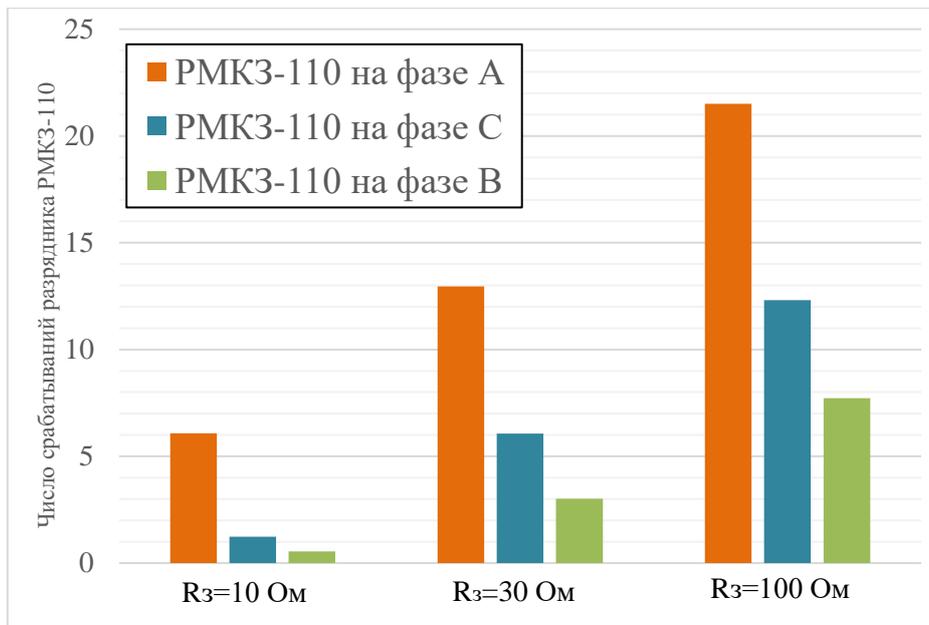


Рис. 10. Число срабатываний разрядников РМКЗ-110 на ВЛ 110 кВ без грозотроса в зависимости от сопротивления заземления опор (фаза А – верхняя, фаза В – средняя, фаза С – нижняя)

В рамках определения числа срабатываний РМКЗ-110, одновременно был проведен анализ токовых воздействий и процентное соотношение величин токов импульсов, протекающих через разрядник на верхней фазе для случая сопротивления заземления опор 100 Ом. Результаты данного анализа, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Процентное соотношение токов импульсов, протекающих через разрядник РМКЗ-110 на фазе А

| Величина тока, протекающего через РМКЗ-110 | % от общего числа срабатываний |
|--|--------------------------------|
| До 12 кА | 84% |
| 12-20 кА | 10% |
| свыше 20 кА | 6% |

Большая часть срабатываний будет вызвана током, протекающим через разрядник верхней фазы, не превышающей величину 12 кА. С учетом возможностей испытательной лаборатории компании АО «НПО «Стример» и проведенных расчетов, для защиты линий без грозозащитного троса предлагается следующая программа испытаний защитных аппаратов на отключающую способность:

- 30 кА 40 мкс – 2 воздействия;
- 20 кА 60 мкс – 2 воздействия;
- 12 кА 100-120 мкс – 2 воздействия;
- 12 кА 50 мкс – 2 воздействия;
- 3 кА 50 мкс – 2 воздействия;

Мультикамерный разрядник – РМКЗ-110, предназначенный для защиты ВЛ 110 кВ без грозозащитного троса, успешно прошел испытания на отключающую способность по программе, представленной в данной работе.

Выводы

Участки без грозозащитного троса подвергаются частым ударам молнии в фазные провода, что вызывает аварийные отключения воздушных линий. Для обеспечения требуемого уровня молниезащиты ВЛ необходимо применение специальных средств. В компании АО «НПО «Стример» для повышения грозоупорности ВЛ 110 кВ, эксплуатируемых без молниезащитного троса, разработаны новый тип разрядников - разрядники мультикамерные закрытого типа РМКЗ-110.

Приведенная в работе оценка ежегодного числа отключений с установкой молниезащитных устройств демонстрирует эффективность от грозозащитных мероприятий до 90% при выполнении всех требований эксплуатации в зависимости от числа установленных разрядников на опоре.

Для двухцепных линий электропередач существуют различные подходы к защите линии от грозовых перенапряжений. Анализ результатов показал, что на низких сопротивлениях заземления опор эффективна защита 2-мя комплектами разрядников на опоре. С его ростом увеличивается вероятность междофазных перекрытий и необходимо устанавливать большее число разрядников на опору. Один из способов мероприятий по молниезащите линии 110 кВ – монтаж разрядников только на одну цепь, что снижает количество отключений защищенной цепи более, чем в 15 раз, а также уменьшает количество отключений незащищенной цепи и общее число отключения.

При создании новых устройств молниезащиты, необходимо определить требования по стойкости к многократному протеканию токов ПУМ (пропускная способность). Для этого в данной работе проведен расчетный анализ характеристик импульсных токов, проходящих через разрядник. В 95% случаев величина протекающих через разрядник импульсных токов не будет превышать 40 кА, а длительность до полуспада – 150 мкс. Причём, из графика точечного распределения токов молнии видно, что токи распределены не равномерно. Токи с большими величинами концентрируются в области с малыми длительностями, а токи с большими длительностями концентрируются в области с малыми величинами. Поэтому в работе предложена программа испытаний разрядников импульсными токами, сгруппированными по принципу вероятности их появления.

Оценка количества срабатываний разрядника говорит о том, что за весь период эксплуатации в наиболее тяжелых условиях ($R_3=100$ Ом) разрядник сработает около 20 раз. При этом большая часть воздействий будет вызвана токами до 12 кА. Расчет количества срабатываний и оценка параметров импульсов предоставила возможность сформировать программу испытаний на отключающую способность для новых разрабатываемых молниезащитных устройств, предназначенных для защиты ВЛ 110 кВ в случае отсутствия грозозащитного троса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мультикамерные разрядники закрытого типа

Енькин Е.Ю., Сиваев А.Д., Юль А.С., Коткин Д.В. Энергетик. 2022. № 12. С. 23-27.

2. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений.

3. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410-2010.

4. Nikolay Zaretskiy, Dmitriy Kotkin, Dmitriy Belko, Evgeniy Enkin. Lightning protection of 110 kV power line with overhead grounded wire using multi-chamber open type lightning protection devices. 2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA)

5. D. Belko, N. Zaretskiy. Comparison of the analytical simplified method of the OHL lightning performance assessment with Monte Carlo method in ATP-EMTP using line lightning protection devices. 36th ICLP, South Africa.