

Д.В. Коткин
АО «НПО «Стример»
Н.Д. Зарецкий
АО «НПО «Стример»
Д.О. Белько
АО «НПО «Стример»
Е.Ю. Енькин
АО «НПО «Стример»

НЕДОСТАТКИ ТРАДИЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 КВ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИХ УСТРАНЕНИЮ

Одним из мероприятий защиты от грозовых перенапряжений для линий 110 кВ является установка грозозащитного троса. Тем не менее, его наличие не исключает перекрытий линейной изоляции, а при высоких сопротивлениях заземления опор число отключений становится соизмеримо с числом отключений на линии без молниезащитного троса. В данной работе рассматривается подход к определению уровня грозоупорности ВЛ 110 кВ с тросом с применением статистического метода Монте-Карло, что позволяет выдать рекомендации по защите линии молниезащитными устройствами от обратных перекрытий (РМКО-110). Количественная оценка воздействий молний на защитные аппараты даёт возможность определения подходящей пропускной способности создаваемых устройств.

Ключевые слова: воздушная линия, молниезащитный трос, число отключений, защитные аппараты, разрядник мультикамерный, РМКО-110.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день требованиям к обеспечению бесперебойного питания крупных потребителей уделяют особое внимание в энергетическом секторе. Бесперебойная работа нефтедобывающих хозяйств, крупных заводов и фабрик должна обеспечиваться несмотря на аварии на генерирующих предприятиях и негативные последствия атмосферных явлений. Опыт эксплуатации показывает, что 20% всех отключений на ВЛ приходится на грозовые отключения. Все воздушные линии напряжением 110 кВ и выше оборудуются молниезащитным тросом с малым углом его подвеса для исключений прорывов молнии через трос, как один из методов молниезащиты ВЛ. Эффективность тросовой защиты подтверждается при невысоких сопротивлениях заземления опор и низкой грозовой активности в регионе. В районах крайнего севера и горной местности категории грунтов вдоль всей трассы ВЛ могут быть различны. Высокое удельное сопротивление грунтов увеличивает вероятность перекрытия изоляции даже при ударе молнии с небольшими амплитудами тока, а значит, и увеличивает число отключений, вызванных ударом молнии. Таким образом, стоит задача в повышении грозоупорности ВЛ 110 кВ с тросом, трасса которых проходит на участках с плохо проводящими грунтами.

В промышленной эксплуатации для защиты линии от молниевых перенапряжений применяют защитные аппараты – мультикамерные разрядники [4]. Защита воздушных линий под тросом разрядниками необходима, прежде всего, для предприятий с непрерывным производственным процессом. При создании новых молниезащитных устройств необходимо понимать, каким воздействиям они подвергаются за весь период эксплуатации для определения коммутационного ресурса, пропускной способности и предела механической прочности. При высоких сопротивлениях заземления уровень грозоупорности линии с тросом оказывается соизмеримым с уровнем для линии, не оборудованной тросом. (рис.1). Тем не менее, защитные аппараты подвергаются меньшим воздействиям импульсов тока, и,

следовательно, нет необходимости в установке устройств, способных выдерживать воздействия токов прямых ударов молнии (ПУМ).

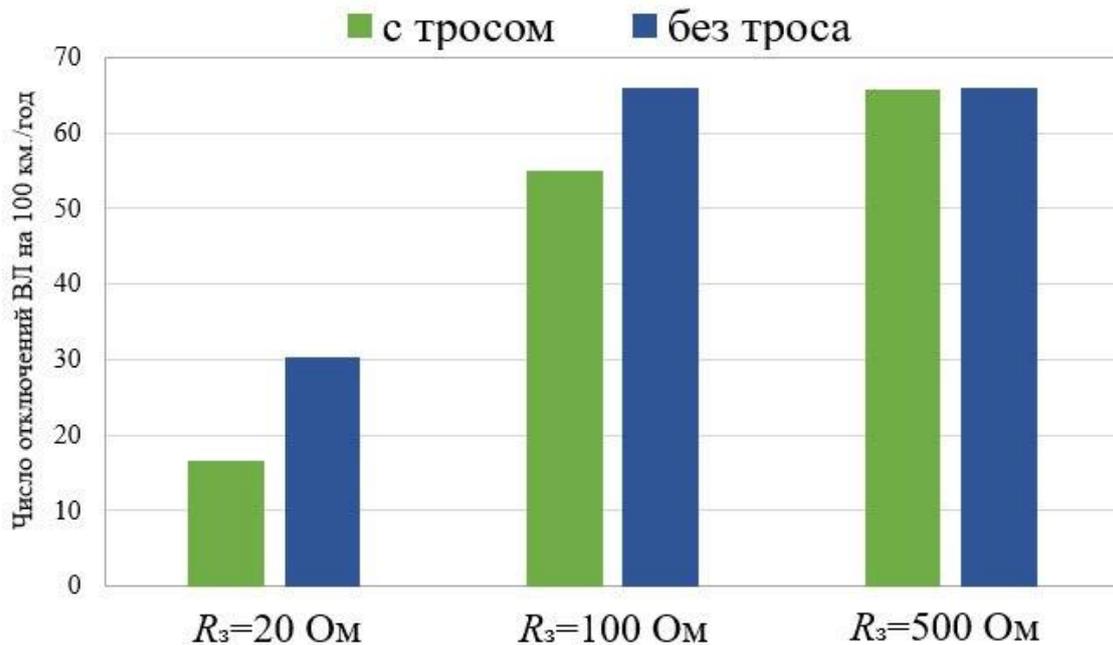


Рис. 1. Общее количество отключений ВЛ 110 кВ для величин сопротивлений заземления опор 20, 100 и 500 Ом.

РМКО-110

Разрядники нового поколения – мультикамерные разрядники закрытого типа (РМКЗ-110), разработанные в АО «НПО «Стример», предназначены для защиты воздушных линий 110 кВ от аварийных отключений, вызванных воздействием молнии. Одним из преимуществ РМКЗ-110 является способность выдерживать многократные протекания токов прямых ударов молнии, что достигается использованием прочного стеклопластикового корпуса, обеспечивающего защиту разрядного элемента от механических повреждений и негативного влияния факторов внешней среды. Кроме того, в устройстве реализован новый принцип гашения электрической дуги - импульсное гашение. Этот режим предполагает отсутствие протекания сопровождающего тока сети после срабатывания устройства от тока молнии. Отсутствие протекания сопровождающего тока сети позволяет на порядок сократить объём эрозии электродов, а следовательно, повысить ресурс и надёжность устройства, а также расширить область его применения по величине токов КЗ сети. Полное время работы разрядника составляет не более 0,5 мс, поэтому релейная и микропроцессорная защита на питающей подстанции не успевает среагировать, и ВЛ продолжает свою бесперебойную работу. Отсутствие необходимости отключать токи КЗ и использовать АПВ экономит коммутационный ресурс подстанционных выключателей и снижает затраты на их ремонт.

Большинство воздушных линий 110 кВ в России оборудованы молниезащитным тросом. При нормированном угле защиты вероятность прорыва молнии через трос составляет менее 1% [1,5]. Поэтому установка РМКЗ, способных выдерживать токи ПУМ, в таких условиях будет нерациональна ввиду избыточного запаса прочности и пропускной способности, а как следствие, и высокой стоимости. АО «НПО «Стример» предлагает инновационное решение в виде разрядника мультикамерного открытого типа – РМКО-110 (рис. 2а). Новое устройство имеет тот же принцип работы, что и РМКЗ-110, однако конструкция не предполагает наличие корпуса и рассчитана лишь на защиту воздушных линий 110 кВ от отключений при

воздействии токов молнии обратных перекрытий. Данное решение помогает в несколько раз снизить стоимость молниезащиты ВЛ относительно использования РМКЗ.



Рис. 2. Внешний вид защитных устройств: а – РМКО-110, б – РМКЗ-110.

РАСЧЁТНАЯ МЕТОДИКА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГРОЗОУПОРНОСТИ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ И ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗАЩИТНЫЕ АППАРАТЫ

Анализ грозоупорности воздушной линии с молниезащитными устройствами или без них подразумевает решение основных этапов по определению числа ударов молнии в ВЛ и параметров молнии, вероятности перекрытий изоляции/срабатывания разрядника, вероятности прорыва молнии через трос и вероятности установления дуги/гашения дуги разрядником.

Каждый из этапов регламентирован международным стандартом IEEE 1410 [2], данные которого слишком обобщены и не могут быть применены ко всем расчетным случаям. Наиболее трудозатратной является задача определения вероятности перекрытия изоляции/срабатывания молниезащитного устройства. Определение данного параметра будет реализовано с помощью метода Монте-Карло.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРЕКРЫТИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО В АТР-ЕМТР

Статистический метод Монте-Карло, реализованный в программном комплексе АТР-ЕМТР, позволяет описать процесс, происходящий на ВЛ во время удара молнии. Для этого создается математическая модель линии в виде блоков длинной линии с геометрическим

расположением проводов на опорах, которые представлены в виде сосредоточенной индуктивности, зависящей от материала конструкции. С помощью источника молнии, учитывающего логнормальное распределение параметров импульса тока молнии, и генератора случайных чисел моделируются многократные воздействия. По полученным данным вычисляются вероятностные характеристики.

Каждый удар молнии характеризуется своим амплитудным значением тока молнии, длительностью импульса и временем фронта, форма импульса принимается в соответствии с [3]. В модели задается количество расчётных экспериментов – 5000 ударов молнии в участок опора – пролёт. Часть ударов приходится в опору, часть ударов – в середину пролета (в трос – при его наличии, в фазный проводник – при отсутствии троса). Из общего числа ударов фиксируется число молний, вызвавших перекрытия изоляции/срабатывания разрядников.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЙ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕЗ МУЛЬТИКАМЕРНЫЙ РАЗРЯДНИК

Оценка воздействий импульсов производится серией расчетов. Расчетная схема обчисляется 10000 ударами в середину пролета и в опору. Все параметры молнии – амплитуда тока молнии и длительность до полуспада – задающиеся источников молнии, фиксируются. Далее, производится анализ параметров и оценивается уровень тока через ближайший разрядник. Схема для реализации метода Монте-Карло представлена на рис. 3.

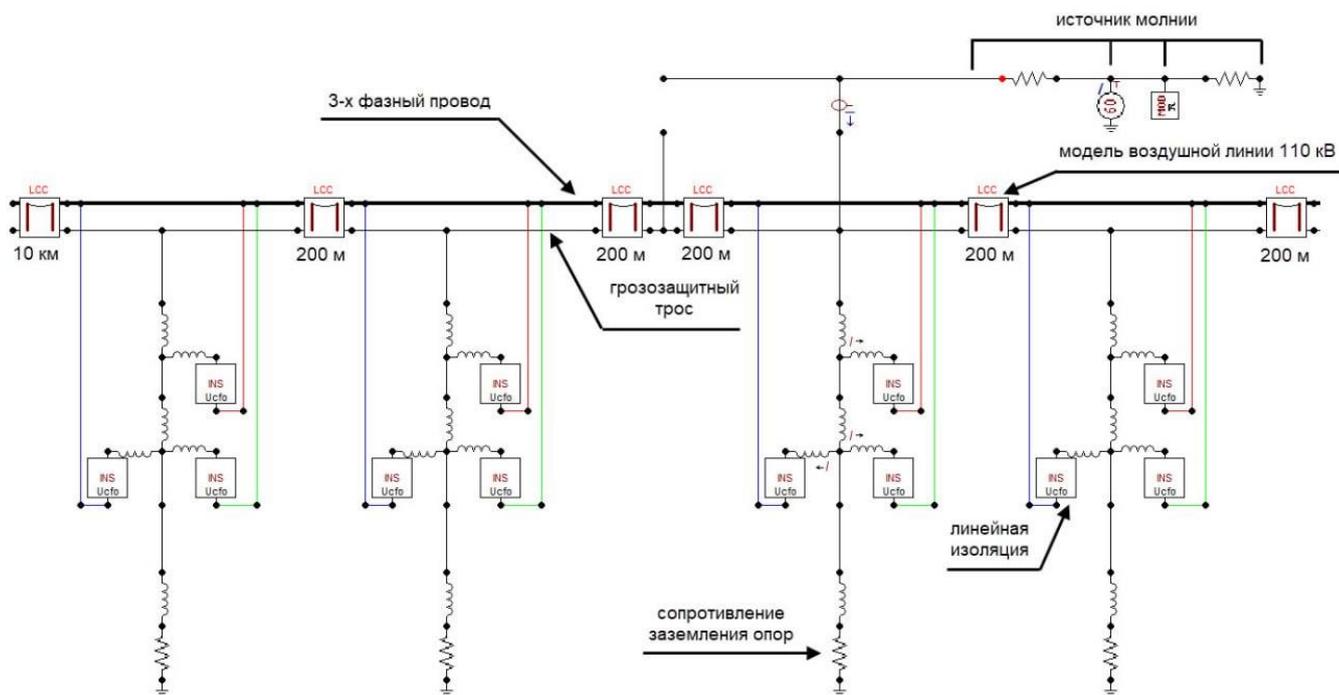


Рис. 3. Схема расчёта в АТР-ЕМТР для реализации метода Монте-Карло.

ЧИСЛО ОТКЛЮЧЕНИЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ 110 кВ С МОЛНИЕЗАЩИТНЫМ ТРОСОМ

Для определения числа грозовых отключений для ВЛ 110 кВ используются следующие входные параметры:

- Воздушная линия 110 кВ (рис.4);
- На опорах П110-1 с высотой $h=25$ м. со стандартной длиной пролета $l=200$ м.;

- Импульсная прочность гирлянды изоляторов 8хПС70Е $U_{50\%}=600$ кВ;
- Разрядник РМКО-110 представляет собой элемент с нелинейным сопротивлением, определяющееся по опытной осциллограмме ВСХ;
- Распределение параметров тока молнии определяется по [2]. Медианное значение максимума тока молнии и среднеквадратичное отклонение $\bar{I} = 31$ кА, $\sigma I = 0,29$; Распределение ударов опора – пролёт определялось исходя из длины пролёта и высоты опоры [3].

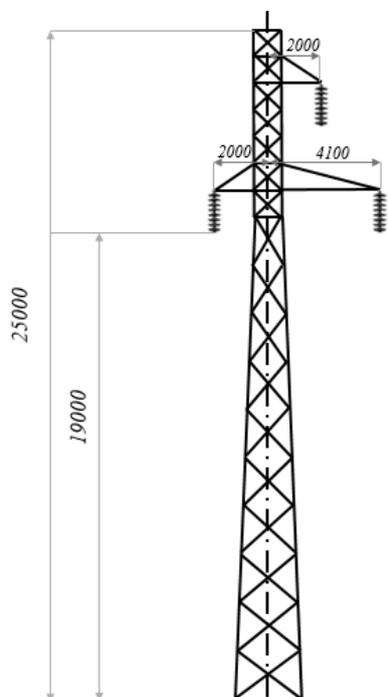


Рис. 4. Типовая конструкция промежуточной опоры П110-1.

Для ВЛ, выполненных на одноцепных опорах, 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 определяться сопротивлением заземления опор. В качестве технических решений предлагаются следующие схемы расстановки разрядников (рис. 5):

1. по 1 разряднику на опору на среднюю фазу В;
2. по 2 разрядника на опору на нижние фазы;
3. по 3 разрядника на опору на все фазы.

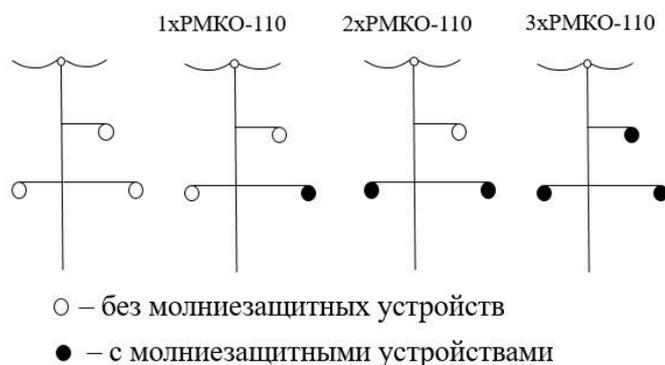


Рис. 5. Технические решения молниезащиты для воздушных линий 110 кВ, оборудованных молниезащитным тросом.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

На рис. 6 представлено число отключений воздушной линии с грозозащитным тросом для диапазона сопротивлений заземления опор 20-500 Ом при наличии и отсутствии защиты линии.

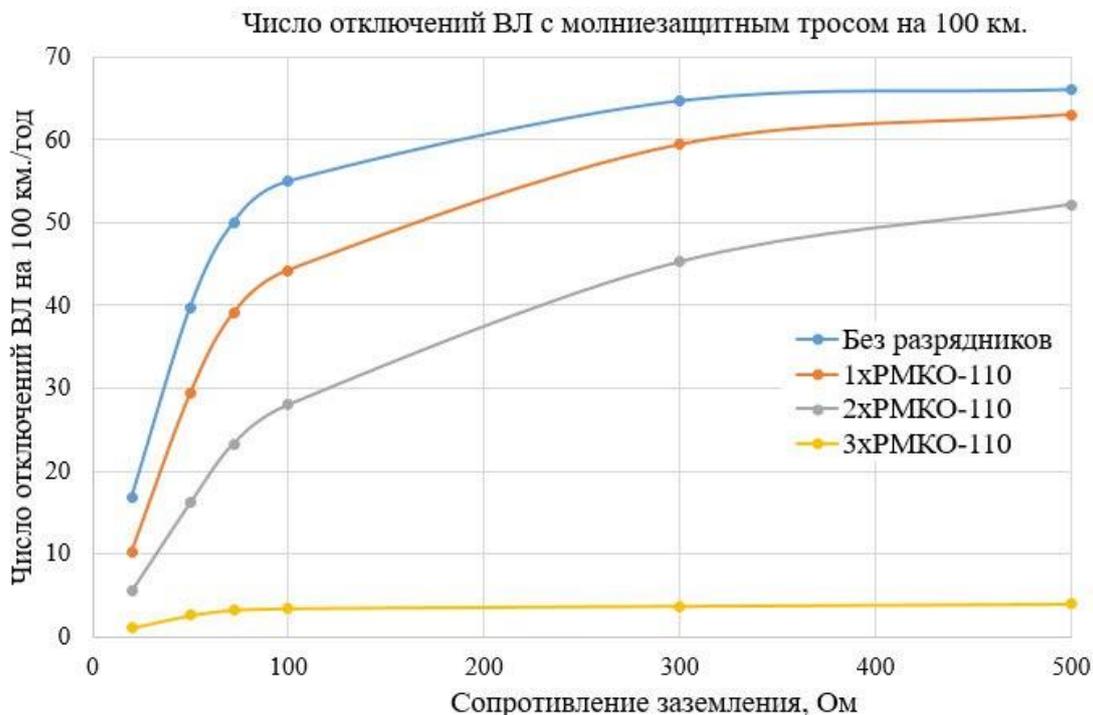


Рис. 6. Количество отключений ВЛ 110 кВ, оборудованной молниезащитным тросом, в зависимости от сопротивления заземления опор и установленных защитных устройств.

При отсутствии молниезащитных устройств на ВЛ число отключений возрастает с ростом сопротивления заземления опор. Кроме того, при сопротивлении заземления свыше 100 Ом практически любая молния с небольшим импульсом тока приведет к перекрытию изоляции. При нормированных значениях (до 20 Ом) число отключений заметно снижается при установке одного разрядника на опоре. Эффективность от установки 2-х и более разрядников на опоре подтверждается при высоких сопротивлениях заземления. В этом случае, возрастает вероятность перекрытия двух незащищенных фаз. Стоит отметить, что для таких случаев наиболее оптимальным вариантом молниезащиты является установка трех разрядников на опору, поскольку число отключений с увеличением R_z изменяется и значительно. Такой подход обеспечивает наилучший вариант защиты линии.

Анализ расчётов по определению параметров воздействия на РМКО-110 показывает, что при обратных перекрытиях ток через ближайший разрядник существенно ниже токов ПУМ. Это связано с тем, что большая часть тока стекает через опору в землю. Наибольшее воздействие приходится на ближайший к месту удара молнии разрядник. С ростом сопротивления заземления опор также увеличивается и величина тока через разрядник, поскольку отвод тока через опору затруднен.

На рис.7 представлена зависимость тока через разрядник от сопротивления заземления при токе молнии 100 кА.

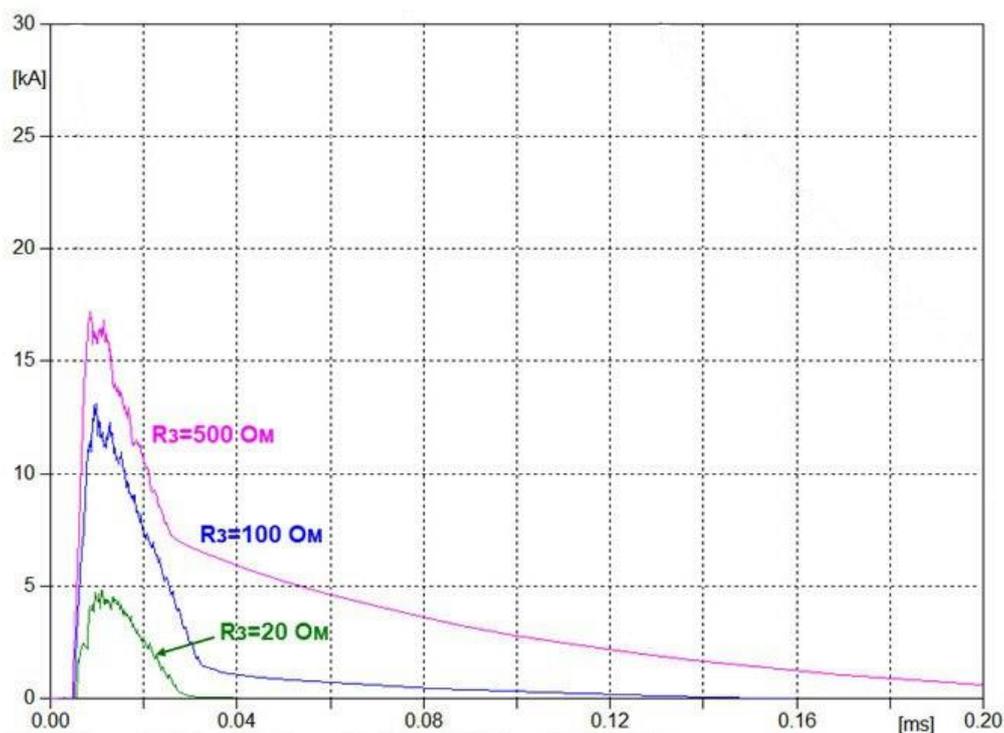


Рис. 7. Значение тока через разрядник для сопротивлений заземления 20, 100 и 500 Ом при токе молнии 100 кА 5/75.

На рис. 8 представлено точечное распределение импульсов токов через ближайший разрядник. Из серии 10000 ударов молнии зафиксированы все удары молнии в трос и в опору при вариации амплитуда тока молнии и длительности до полуспада для рассматриваемых в работе сопротивлений заземления опоры. Оценка длительности фронта производится, аналогично, для рассматриваемых сопротивлений заземления опор (рис. 9). Как и длительности до полуспада, длительность фронта зависит от сопротивления заземления опор. Средние значения длительности фронта преимущественно лежат в диапазоне 1-5 мкс.

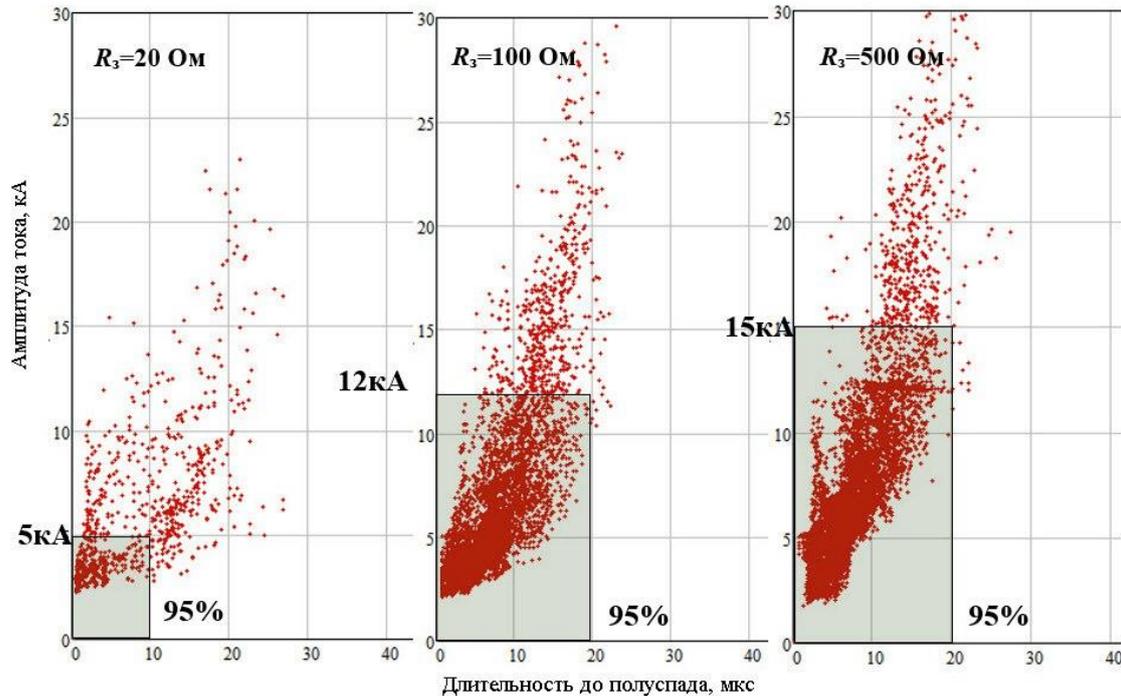


Рис. 8. Точечное распределение параметров импульсов – тока через разрядник (ось Y) и времени до полуспада (ось X) - для сопротивлений заземления 20, 100, 500 Ом.

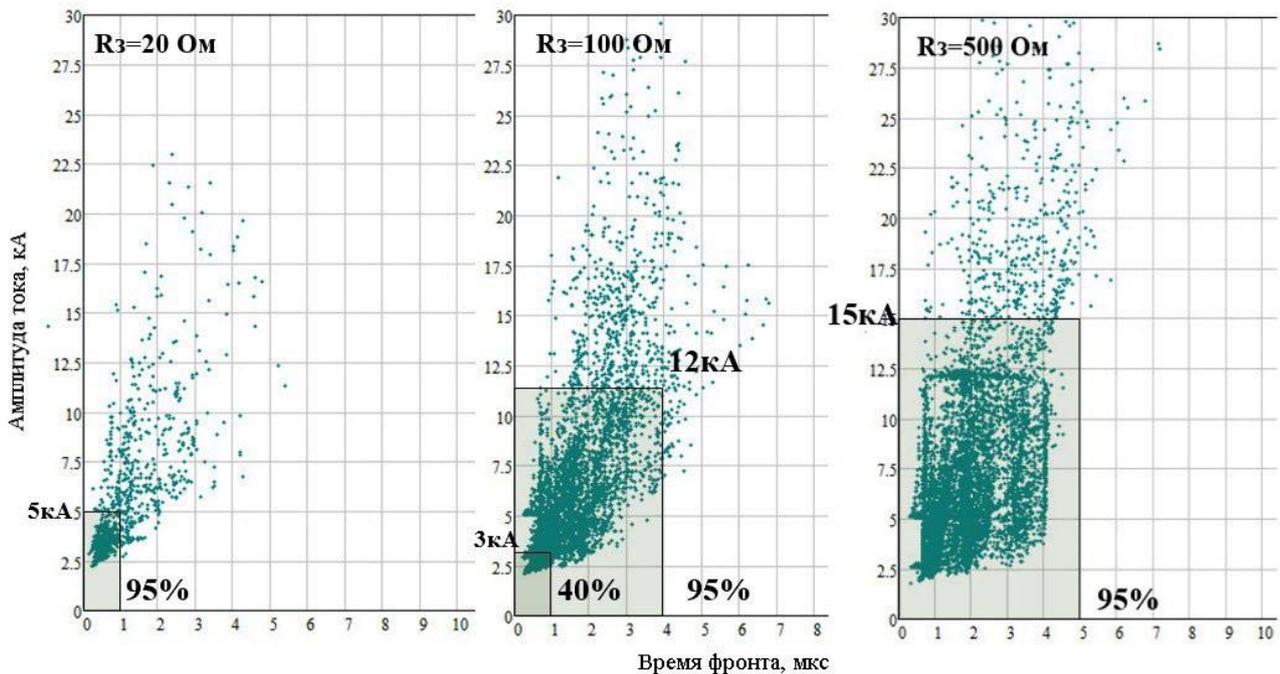


Рис. 9. Точечное распределение параметров импульсов – тока через разрядник (ось Y) и времени фронта (ось X) - для сопротивлений заземления 20, 100, 500 Ом.

Такие результаты подтверждают, необходимость создания менее требовательного молниезащитного устройства для защиты ВЛ от обратных перекрытий по сравнению с устройствами, обеспечивающими защиту от ПУМ. Кроме того, такие устройства возможно применять на линиях без молниезащитного троса на нижних фазах.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ИСПЫТАНИЯ РМКО-110

Важнейшими испытаниями, определяющими работоспособность разрядников, являются испытания на отключающую способность. Испытательная установка представляет из себя комплекс из двух компонентов: генератор Маркса, генерирующий ток молнии, и колебательный контур, имитирующий воздействие напряжения промышленной частоты (рис. 10).

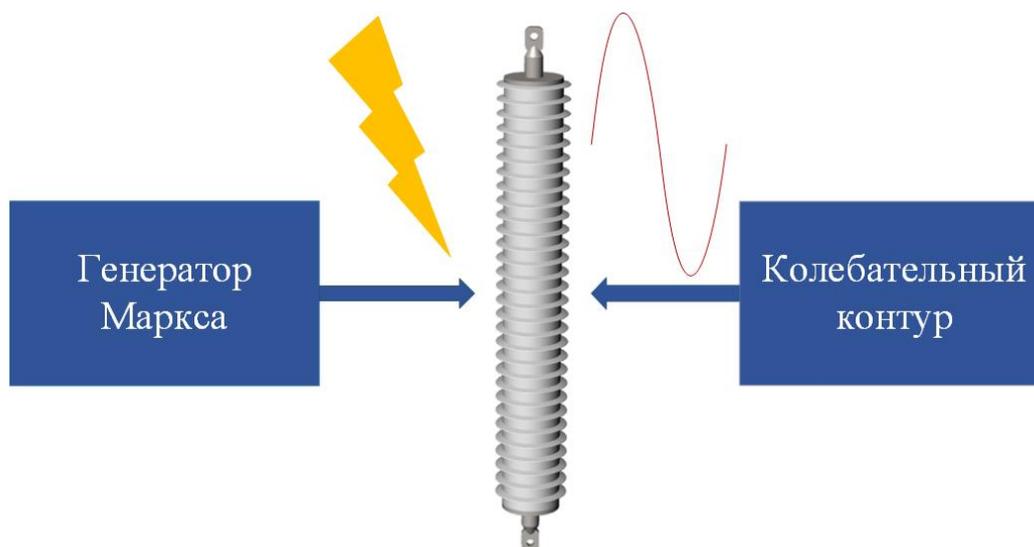


Рис. 10. Блок-схема испытательной установки.

Во время испытаний импульс тока от генератора Маркса проходит через образец одновременно с воздействием на него напряжения сети от колебательного контура. В случае успешной работы разрядник предотвращает протекание сопровождающего тока сети, обеспечивая импульсное гашение. Установка настроена таким образом, что импульсные воздействия попадают в пики напряжения для обеих полярностей первых полуволн.

Для корректной проверки работоспособности разрядника необходимо правильно определить испытательные воздействия, а именно параметры тока импульсов обратных перекрытий. Опираясь на проведенные расчёты, была предложена следующая программа:

- 4 воздействия 3 кА 1/50 (величина фронта, мкс/ длительность до полуспада, мкс);
- 10 воздействий 12 кА 4/20.

Следует отметить, что максимальное зарядное напряжение колебательного контура в нашей испытательной лаборатории составляет 28 кВ. Таким образом, количество разрядных модулей в испытательном образце сокращено пропорционально уменьшению приложенного напряжения.

Испытательный образец РМКО-110 прошёл полную программу испытаний на отключающую способность. Пример осциллограммы представлен на рис. 11.

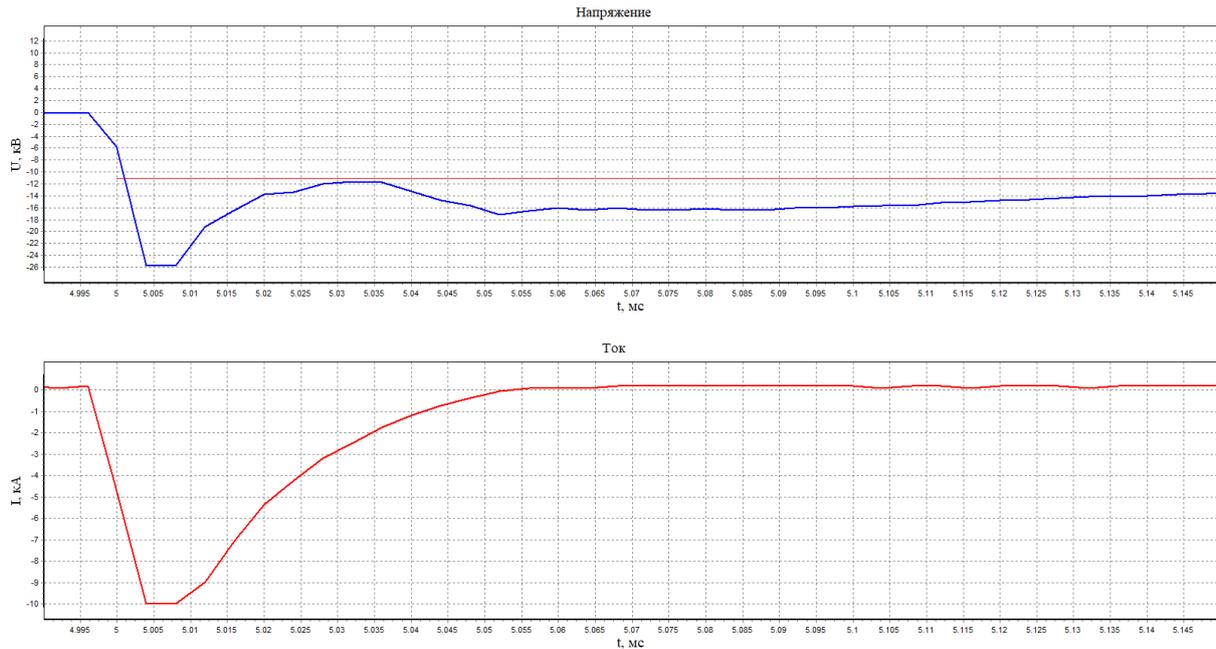


Рис. 11. Осциллограммы напряжения и тока через РМКО-110, форма импульса - 12 кА 4/20.

ВЫВОДЫ

1. Аналитический расчёт по определению числа отключений на ВЛ 110 кВ, защищённой молниезащитным тросом, демонстрирует, что трос не обеспечивает полной защиты линии от молниевых перенапряжений, а при повышенных сопротивлениях заземления опор его защитная роль исключается полностью.
2. Для решения проблемы с отключениями ВЛ вследствие атмосферных перенапряжений компания АО «НПО Стример» предлагает новое поколение молниезащитных устройств – разрядник мультикамерный открытого типа РМКО-110.
3. Количественная оценка воздействий на защитные устройства определяет параметры грозового импульса – амплитуда тока молнии, фронт импульса, длительность до полуспада. Это позволяет оценить параметры импульса, воздействующего на разрядник, и определить программу исследовательских испытаний.
4. Предложенная программа испытаний подтверждает работоспособность устройства на ВЛ 110 кВ с молниезащитным тросом.

Список используемых источников

- [1] RD 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6—1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений.
- [2] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410-2010.
- [3] 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.
- [4] Подпоркин Г.В. Грозозащита ВЛ 10 – 35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников / Г.В. Подпоркин, Е.Ю. Енькин, Е.С. Калакутский, В.Е. Пильщиков, А.Д. Сиваев // Электричество. 2010. №10. С. 11-16.
- [5] CIGRE Working Group C4.407 Lightning Parameters for Engineering Applications, August 2013.