

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ПРИМЕНЕНИЮ
МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ РАЗРЯДНИКОВ
НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Санкт-Петербург
2017

УДК 621.315.1; 621.316.9

Акционерное общество
«НПО «Стример»

Предисловие

Методические рекомендации по применению молниезащитных разрядников на воздушных линиях электропередачи разработаны по собственной инициативе компании «Стример» с целью пояснения принципов работы молниезащитных разрядников и условий их применения на ВЛ различных классов напряжения. Методические рекомендации предназначены для использования потенциальными партнерами — организациями различных форм собственности, деятельность которых в той или иной мере связана с передачей электроэнергии по воздушным линиям электропередачи и заинтересованных в обеспечении надежности этого процесса. Представляется, что данный стандарт будет полезен сотрудникам электросетевых компаний, строительных, монтажных, проектных и научно-исследовательских организаций.

Содержание

Введение	6
1. Общие понятия о молнии	9
2. Виды воздействий молнии на изоляцию ВЛ	12
2.1. Разряд молнии в фазный провод ВЛ.....	12
2.2. Разряд молнии в опору ВЛ без троса	14
2.3. Разряд молнии в трос ВЛ	15
2.4. Разряд молнии рядом с ВЛ	16
3. Требования к защите изоляции ВЛ от молниевых воздействий	20
4. Способы защиты изоляции ВЛ от грозовых перенапряжений.....	22
4.1. Искровые промежутки	22
4.2. Вентильные разрядники	24
4.3. Нелинейные ограничители перенапряжений	24
4.4. Устройства защиты от перенапряжений	26
4.5. Молниезащитные разрядники	26
4.6. Преимущества молниезащитных разрядников по сравнению с другими устройствами защиты от грозовых перенапряжений.....	27
5. Молниезащитные разрядники: принцип действия, конструкции	30
5.1. Длинно-искровые разрядники	30
5.2. Мультикамерные разрядники	44
5.3. Мультикамерные изоляторы-разрядники	53
6. Ассортимент РМЗ АО «НПО «Стример», установка РМЗ на ВЛ	57
7. Опыт эксплуатации РМЗ (разрядников молниезащитных)	71
8. Актуальные вопросы и ответы	74
Список использованной литературы	80
Приложение 1	82

Обозначения и сокращения

- ВЛ** — воздушная линия электропередачи
- ВЛ ВН** — воздушная линия электропередачи высокого напряжения
- ВЛЗ** — воздушная линия электропередачи с защищенным проводом
- ВЛ СН** — воздушная линия электропередачи среднего напряжения
- ГИРМК** — гирлянда изоляторов-разрядников мультикамерных
- ИП** — искровой промежуток
- ИПТ** — изолирующая подвеска грозозащитных тросов
- КЗ** — короткое замыкание
- ЛР** — линейный разрядник
- ЛЭП** — линия электропередачи
- МКС** — мультикамерная система
- ОПН** — нелинейный ограничитель перенапряжений
- ПС** — подстанция
- ПУМ** — прямой удар молнии
- РВ** — вентильный разрядник
- РДИ** — длинно-искровой разрядник
- РДИМ** — разрядник длинно-искровой модульного типа
- РДИП** — разрядник длинно-искровой петлевого типа
- РДИШ** — разрядник длинно-искровой шлейфового типа
- РМЗ** — молниезащитный разрядник
- УЗПН** — устройство защиты от перенапряжений
- УЗИП** — устройство защиты от импульсных перенапряжений
- [...]** — ссылка на источник в списке использованной литературы

Введение

Первую опытную линию электропередачи (ЛЭП) напряжением 1,5–2 кВ (постоянного тока) Мисбах — Мюнхен (протяжённостью 57 км) построил в 1882 году французский ученый М. Де-пре. В 1891 году впервые в мире была осуществлена электропередача трёхфазным переменным током на 170 км по линии электропередачи Лауфен — Франкфурт, спроектированной и построенной М. О. Доливо-Добровольским. ЛЭП работала при напряжении 15 кВ, передаваемая мощность — 230 кВт.

Уже после сооружения первых воздушных линий электропередачи (ВЛ) возникла проблема их защиты от молниевых воздействий. Вероятность прямого поражения молнией воздушной линии электропередачи среднего напряжения (ВЛ СН) сравнительно мала, но не настолько, чтобы можно было ею пренебрегать при оценке грозоупорности. Кроме того, для изоляции ВЛ СН представляют опасность перенапряжения, возникающие на проводах из-за электромагнитного влияния молнии, — индуктированные перенапряжения. Для ВЛ высоких классов напряжения (ВЛ ВН) номинальным напряжением свыше 110 кВ индуктированные перенапряжения не опасны, так как их изоляция выдерживает возможные при этом импульсные воздействия. Однако при повышении класса напряжения и роста габаритов возрастает и становится значимой вероятность прямых ударов молнии (ПУМ) в токоведущие и несущие конструкции ВЛ ВН. Природа не дает нам возможности не обращать внимания на периодические проявления молний или простыми способами избавиться от их воздействий.

Если отвлечься от экономической составляющей и привлечь техническую фантазию, можно предложить несколько способов предотвращения воздействий молниевых разрядов на ВЛ. Например: разгон облаков как источников сосредоточения зарядов в зоне линии электропередачи; создание вертикальных зон ионизации как временных молниеотводов на период прохождения грозового фронта; использование изо-

ляционных конструкций, для которых не страшны грозовые перенапряжения любой значимости; применение кабельных или даже газоизолированных линий. Но попытки реализации указанных мероприятий слишком затратны даже по сравнению со стоимостью строительства самой ВЛ.

Воздушные линии электропередачи необходимо защищать от молниевых воздействий техническими средствами (устройствами), устанавливаемыми на самих ВЛ.

Технические средства защиты от молниевых воздействий делятся на устройства, снижающие *вероятность* таких воздействий, и устройства, снижающие *параметры* таких воздействий на токоведущие системы и изоляцию ВЛ. К первой группе устройств относятся грозозащитные тросы, ко второй — устройства защиты от грозовых перенапряжений. В настоящее время на ВЛ разных классов напряжений применяются устройства защиты от грозовых перенапряжений на основе нелинейных сопротивлений (ОПН), искровые промежутки (ИП) и молниезащитные разрядники (РМЗ).

Первый стальной грозозащитный трос в СССР изготовлен в Одессе в 1930 году. В это же время на ВЛ появились ИП, которые со временем оказались недостаточно эффективными средствами защиты от грозовых воздействий. Первые ОПН были установлены на ВЛ 6,6 кВ в Японии в 1970 году. Опыт их эксплуатации, а также последующие данные по применению ОПН в разных странах мира показали, что ОПН могут разрушаться при прямых ударах молнии в провода и для успешной работы их следует устанавливать в сочетании с грозозащитным тросом. Эффективно защитить ВЛ СН от молниевых перенапряжений и в том числе ВЛ с защищенными проводами (ВЛЗ) от пережога проводов можно при помощи РМЗ. Первые молниезащитные разрядники длинно-искрового типа установлены на ВЛ в России (в ОАО «Ленэнерго») в 1999 году.

В настоящих методических рекомендациях рассмотрены вопросы целесообразности применения РМЗ как наиболее технико-экономически совершенного устройства для защиты

изоляции ВЛ СН, особенно для ВЛЗ. Применительно к ВЛ классов напряжения 110 и 220 кВ молниезащитные разрядники являются также весьма конкурентоспособными устройствами защиты изоляции от грозových перенапряжений.

Основными целями публикации методических рекомендаций являются разъяснение достоинств молниезащитных разрядников и обеспечение удобства их применения при проектировании грозозащиты ВЛ, их монтажа и эксплуатации.

1. Общие понятия о молнии

Молния — явление непредсказуемое и до конца не изученное. Попытки «поймать» молнию заканчивались плачевно. Однако Б. Франклин в Америке, а также М. В. Ломоносов и Г. Рихман в России экспериментально доказали электрическую природу молнии. Дальнейшие исследования подтвердили, что молния представляет собой электрический разряд между облаками или между облаком и землей, возникающий из-за различия величины и полярности зарядов Земли и облаков.

Гипотеза об образовании грозовых облаков и появлении на них заряда сформулирована М. В. Ломоносовым в 1753 году. Согласно этой гипотезе облако образуется в процессе быстрого перемещения в вертикальном направлении воздуха при его охлаждении и конденсации содержащейся в нем влаги. Вследствие наличия восходящих потоков воздуха и трения частичек паров, частички взаимно электризуются и разделяются, что приводит к образованию атмосферного электричества.

С тех пор для объяснения механизма появления избыточных зарядов в грозовом облаке предложен ряд гипотез, которые развивают изначальное предположение. Анализируя и суммируя современные теории, можно заключить, что источниками зарядов частиц в грозовом облаке являются энергии, выделяющиеся в процессах трения, столкновения частиц, их разрушения, переходов из одного состояния (твердое, жидкое, газообразное) в другое за счет изменения температурного градиента в осадках. Определенное значение при этом имеет солнечная радиация. В общем виде представляется возможным сделать заключение о том, что причинами появления заряженных облаков являются всеобщее движение, круговорот вещества в природе.

Образование заряда высокой плотности в ограниченном объеме облака обуславливает появление высокой напряженности электрического поля, что приводит к возникновению условий для развития лавин электронов, затем стримеров и фор-

мированию канала лидера молнии. Перекрытие воздушного промежутка между головкой лидера и наземным объектом является переходом к главной стадии разряда молнии — стадии нейтрализации, в которой происходит компенсация заряда лидера зарядом, притекающим из земли. По каналу лидера молнии осуществляется перенос заряда большой величины. В месте соприкосновения с землей или наземными объектами происходит выделение значительной энергии. При этом через пораженный объект протекает ток молнии.

После первого импульса тока молнии разряды внутри облаков могут восстановить условия развития канала лидера, и развивается повторный разряд.

Разряды молнии в землю происходят ежеминутно. Большая их часть не имеет последствий для человечества. Однако некоторая часть разрядов приводит к разрушениям строений, возгораниям и даже к летальному исходу для людей и представителей фауны. Человечеству пока не удалось направить энергию молнии во благо. Остается только держать оборону.

Инструментальное изучение природы молнии выявило разнообразную картину процессов ее развития: положительные и отрицательные полярности грозовых разрядов, нисходящие и восходящие лидерные каналы, неоднократность разрядов во вспышке молнии и их чередование и т.д.

С точки зрения молниезащиты, главным параметром импульса тока молнии является его амплитуда, часто называемая просто током молнии. Кроме того, на величину возникающих при молниевых воздействиях перенапряжений оказывает влияние крутизна импульса тока молнии. Чем больше крутизна, тем больше коэффициент взаимоиндукции между каналом молнии и токоведущими системами, например, проводами ВЛ. Крутизна импульса также имеет значение при оценке вероятности обратных перекрытий при ударах молнии в опоры.

Между основными параметрами имеется слабая положительная корреляционная связь: большим токам молнии соответствуют большие крутизны. Однако на параметры тока

оказывают влияние условия развития молнии, в частности, рельеф поверхности, высота облаков и пр. Неоднозначны также параметры первого и последующих разрядов. Указанные при расчетах молниезащиты амплитуда и крутизна тока молнии принимаются взаимно независимыми. По результатам регистраций известно, что максимальные значения токов молнии могут немного превосходить 200 кА, средние значения составляют величины порядка 30 кА. Крутизна токов молнии может достигать 150 кА/мкс, но в среднем составляет приблизительно 20 кА/мкс.

Важным для организации молниезащиты является показатель активности молниевых разрядов в регионе нахождения объекта защиты. В России по данным метеонаблюдений составлены карты районирования по среднегодовой продолжительности гроз в часах, опубликованные, например, в [1,3]. От северных районов Чукотки до южных районов Кавказа продолжительность гроз отличается на порядок: от 10 часов в год и менее до более 100 грозовых часов.

Указанные основные параметры молниевых воздействий вместе с данными по конструкциям линий электропередачи позволяют оценить уровни грозоупорности конкретных ВЛ. В [3,4] приведен алгоритм расчета отключений воздушных линий электропередачи среднего напряжения от молниевых воздействий. Применительно к ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения расчеты выполняются с использованием специальных программ.

2. Виды воздействий молнии на изоляцию ВЛ

Лидер канала молнии не выбирает какие-то особо уязвимые места на земле. Но зачастую он стремится к объектам, которые расположены к нему ближе других.

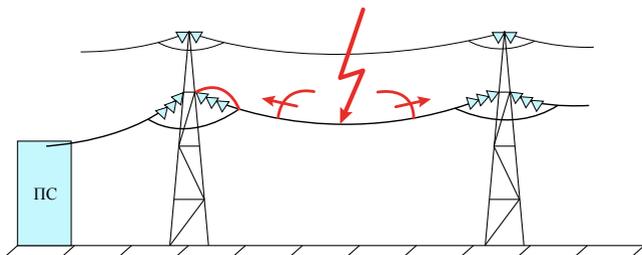
Таковыми «добровольными партнерами» зачастую могут быть объекты, возвышающиеся над поверхностью земли. Они по сути собирают развивающиеся разряды молнии с близлежащей территории, служа своеобразными молниеотводами для остального пространства. Естественно, это относится и к воздушным линиям электропередачи, особенно высших классов напряжения и имеющих большую протяженность. Не решающее, но существенное значение имеет наличие напряжения на проводах ВЛ.

Вероятность поражения ВЛ зависит от частоты гроз в регионе расположения трассы, высоты конструкций ВЛ и ширины занимаемой ей территории. Последствия молниевых воздействий не однозначны, зависят от электрических параметров молнии и от того, в какой элемент ВЛ (или рядом с ВЛ) молния попадает.

2.1. Разряд молнии в фазный провод ВЛ

При попадании молнии в провод ток молнии протекает по нему в обе стороны от места удара (Рисунок 1). На эквивалентном сопротивлении, равном половине волнового сопротивления линии $Z_w/2 \approx 200 \text{ Ом}$, создаётся большое падение напряжения, которое оказывается приложенным к ближайшей гирлянде изоляторов.

Под действием этого напряжения гирлянда перекрывается, и по каналу перекрытия, по телу опоры и далее через сопротивление заземления опоры протекает значительный импульсный ток. Возникающая при этом дуга подпитывается энергией



$$U_{\text{наб}} = I_{\text{м}} * Z_{\text{в}} / 2 = 100 \text{кА} * 200 \text{Ом} = 20000 \text{кВ} = 20 \text{МВ}$$

Рисунок 1. Перекрытие изоляции ВЛ при ударе молнии в провод

от «здоровых» фаз, что, в случае питания ВЛ от трансформатора с заземленной нейтралью, приводит к протеканию тока короткого замыкания (КЗ). Такая аварийная ситуация приводит к необходимости отключения ВЛ. Линия может быть включена после восстановления электрической прочности изоляции.

В том случае, если ВЛ питается от трансформатора с изолированной нейтралью, контур для протекания тока КЗ отсутствует, емкостного тока подпитки недостаточно для работы релейной защиты: дуга может гореть продолжительное время. Такая картина характерна для сетей среднего напряжения. Однако зачастую на воздушных линиях электропередачи 6–35 кВ развитие процесса однофазного замыкания на землю приводит к междуфазному короткому замыканию. Импульсный ток, протекающий по опоре, вызывает на сопротивлении заземления и на индуктивном сопротивлении собственно опоры большое падение напряжения. Резко возрастающий потенциал верхней части опоры вкпе со сравнительно малой электрической прочностью изоляции ВЛ среднего напряжения приводит к развитию междуфазного молниевоего перекрытия, которое под действием линейного напряжения переходит в двойное замыкание на землю, что почти равнозначно двухфазному КЗ. ВЛ отключается действием релейной защиты.

2.2. Разряд молнии в опору ВЛ без троса

При ударе молнии в металлическую опору практически весь ток молнии устремляется в землю через тело опоры и ее заземление. Потенциал верхней части опоры определяется падением напряжения на индуктивном сопротивлении опоры $\omega L_{оп}$ и импульсным активным сопротивлением заземлителя $R_{оп}$.

Напряжение на гирлянде изоляторов равно разности напряжений на опоре и на проводе. В том случае, если напряжение на гирлянде $U_{г}$ превзойдет ее импульсную прочность $U_{50\%}$, возникнет обратное перекрытие изоляции.

Сделаем грубую оценку возможного напряжения $U_{г}$, исходя из средних значений токов молнии и сопротивлений опор.

Ток молнии $I_{м} = 30$ кА; крутизна тока молнии $I_{м}' = 20$ кА/мкс. Полное сопротивление опоры:

$$Z_{оп} = R_{оп} + j\omega L_{оп} \quad (1)$$

Индуктивность опоры определяется через усредненное значение на единицу высоты $L_{оп} = L_{оп}^* h_{оп}$. Для одностоечных опор $L_{оп}^* = 0,6$ мкГн/м и при $h_{оп} = 30$ м имеем $L_{оп} = 18$ мкГн. В зависимости от характеристик грунта на трассе ВЛ и от исполнения контура заземления значение его сопротивления может меняться, но в среднем может быть принято $R_{оп} = 20$ Ом.

Ток молнии и его крутизна связаны через длину фронта импульса $\tau_{ф}$ тока соотношением:

$$I_{м}' = I_{м} / \tau_{ф} \quad (2)$$

При принятых средних значениях тока и крутизны расчетная величина $\tau_{ф} = 1,5$ мкс.

Тогда угловая частота $\omega = 2\pi \frac{1}{\tau_{ф}} = 1,05 \cdot 10^6$, 1/с.

Следовательно, из (1) имеем: $Z_{оп} = 20 + j18,9$ или по модулю $Z_{оп} = 27,5$ Ом.

$$U_{г} = I_{м} * Z_{оп} = 825 \text{ кВ} \quad (3)$$

Применительно к ВЛ класса 110 кВ, где $U_{50\%}$ составляет приблизительно 600 кВ, очевидна неизбежность обратного перекрытия гирлянды изоляторов.

Применительно к ВЛ 220 кВ вероятность перекрытия изоляции необходимо определять более точным расчетом с использованием конкретных исходных данных, построением кривой опасных волн.

Применительно к ВЛ 330 кВ и выше обратные перекрытия исключены из рассмотрения из-за больших импульсных разрядных напряжений изоляции.

Описанный выше физический процесс обратного перекрытия полностью характерен для ВЛ среднего напряжения, на которых практически не применяются грозозащитные тросы. При этом обратное перекрытие изоляции произойдет практически со стопроцентной вероятностью, т.к., например, на ВЛ 10 кВ с $U_{50\%} = 130$ кВ событие произойдет при амплитудах токов молнии в единицы килоампер.

На ВЛ классов напряжения 110 кВ и выше использование тросов практически обязательно (за исключением вариантов, когда нет возможности обеспечения разумных значений сопротивлений заземления опор). Наличие грозозащитных тросов нужно принимать во внимание при оценке вероятности обратных перекрытий.

2.3. Разряд молнии в трос ВЛ

Поскольку каждый удар молнии в грозозащитный трос сопровождается замыканием тока молнии на опору, физический процесс обратного перекрытия, рассмотренный в предыдущем разделе, справедлив в данной ситуации.

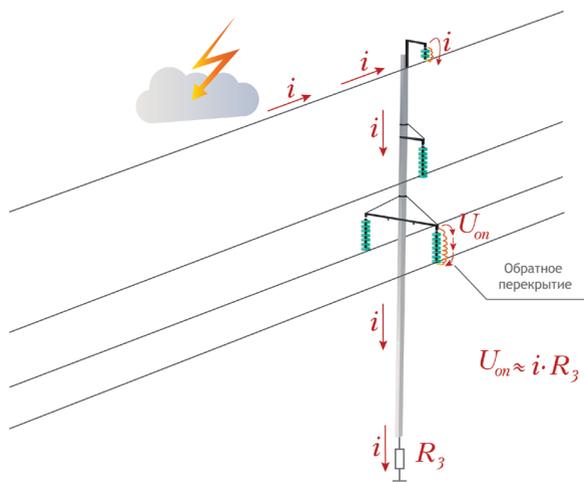


Рисунок 2. Обратное перекрытие изоляции на опоре

При расчетах числа отключений линий с тросами следует учитывать два обстоятельства:

- сравнительно большую вероятность попадания молнии в систему трос-опора по сравнению с линией с опорами без тросов;
- сравнительно меньшие токи молнии, протекающие по опоре из-за ответвления их в отходящие тросы, прихода отраженных волн от соседних опор, участия соседних опор в отводе тока молнии в землю и др. (снижение токов молнии может составлять 20% и более).

Расчеты ведутся по эквивалентным схемам с участием характеристик опор, волновых сопротивлений молнии, тросов, коэффициента взаимной индукции между каналом молнии и опорой.

2.4. Разряд молнии рядом с ВЛ

Подобно любому тросовому молниеотводу линия электропередачи обеспечивает защитную зону — полосу под ВЛ, в которую разряды молнии практически исключены. Ширина этой

зоны может быть определена по [2]. Она зависит от высоты конструкций ВЛ, но примерно отстоит от проводов крайних фаз в обе стороны на три высоты опор. Но территория вблизи ВЛ вне зоны защиты подвержена поражениям молнии с той же вероятностью, что и остальная поверхность земли.

В указанных случаях молниевые удары сопровождаются появлением на проводах ВЛ перенапряжений. Причиной этого события является емкостная связь, а в большей степени взаимдукция между развивающимся каналом молнии и токоведущими частями линии электропередачи. Поэтому перенапряжения называют индуктированными.

Амплитуда индуктированного перенапряжения может быть оценена по формуле [5]:

$$U_{\text{инд}} = \frac{30 \cdot h_{\text{пр}} \cdot I_{\text{м}}}{b} \quad (4)$$

где:

$h_{\text{пр}}$ — средняя высота проводов над землей, м;

b — расстояние от места удара молнии до провода, м.

Как показывает анализ, например, в [3,6], их величина практически не превосходит 300 кВ. Перенапряжения с такой амплитудой не опасны для изоляции ВЛ 110 кВ и выше. Для ВЛ класса 35 кВ вероятность перекрытия изоляции при индуктированных перенапряжениях мала, но она существует в случаях близких ударов молнии с токами большой величины и крутизны. А вот для ВЛ 6–20 кВ, принимая во внимание относительную (по отношению к ПУМ) частоту разрядов молнии в сопредельную территорию, индуктированные перенапряжения можно считать определяющими при оценке числа отключений.

Индуктированные перенапряжения возникают одновременно на всех фазах. Например, появление напряжения 300 кВ на ВЛ класса 10 кВ определено приведет к перекрытию изоляции. Перекрытие изолятора, например, фазы А опоры 1 (Рисунок 3), приводит к тому, что потенциал траверсы этой опоры

возрастает за счет падения напряжения от тока перенапряжения на сопротивлении заземления опоры. Потенциалы фаз В и С уменьшаются за счет электромагнитного влияния перекрытой фазы А, которое может быть оценено по коэффициенту связи между проводами соседних фаз. Благодаря этим двум факторам разность потенциалов, приложенная к изоляторам соседних фаз В и С на этой опоре, уменьшается. Таким образом, после перекрытия изолятора фазы А на опоре 1 перекрытие изоляторов В и С на этой опоре затруднено.

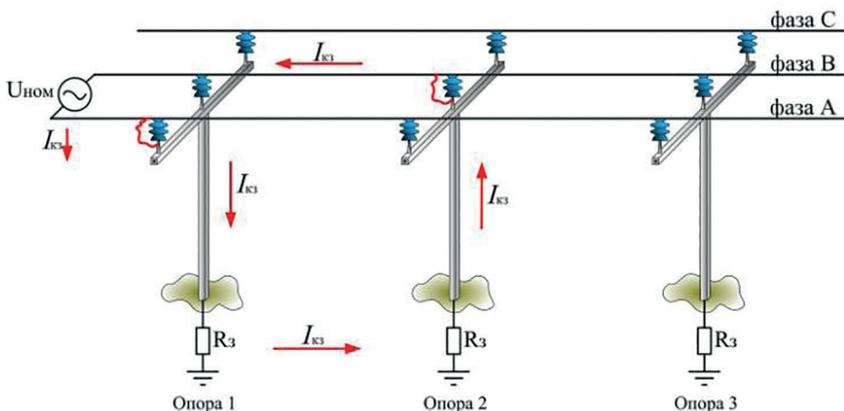


Рисунок 3. Иллюстрация перекрытия изоляторов на разных фазах на разных опорах

На соседней же опоре весьма вероятно перекрытие изоляторов фаз В или С. На рисунке 3 в качестве примера показано перекрытие изолятора фазы В на опоре 2.

После перекрытия двух фаз на землю на разных опорах возникает контур двойного замыкания на землю, состоящий из проводов двух фаз и сопротивлений заземления двух опор, включённый под линейное напряжение. Ток замыкания можно приближённо оценить как $I_3 \approx \frac{U_{ном}}{2R_з}$, где $U_{ном}$ — номинальное напряжение линии, $R_з$ — сопротивление заземления опоры.

При $U_{ном} = 10$ кВ и $R_з = 10-100$ Ом величина тока междуфазного замыкания лежит в диапазоне $I_3 = 50 - 500$ А.

Относительно небольшой градиент рабочего напряжения вдоль канала дуги не гарантирует ее самопогасания. Продолжительное горение дуги может привести к пережогу проводов. Особенно это актуально для ВЛ с защищенными проводами, где затруднено перемещение опорной точки дуги.

3. Требования к защите изоляции ВЛ от молниевых воздействий

Необходимость защиты наземных объектов от воздействий молнии очевидна хотя бы из положений, приведенных в предыдущих разделах данных методических рекомендаций. Естественно, это относится и к морским судам, и к летательным аппаратам, что является отдельным направлением исследований и мероприятий.

Как отмечено во введении, защита от молниевых воздействий осуществляется грозозащитными тросами и устройствами, снижающими параметры воздействий.

Для обеспечения заданного уровня надежности мероприятия по защите изоляции ВЛ должны выполняться в соответствии с разработанным нормативным документом, основные из которых приведены в списке используемых источников [1–4].

Необходимость защиты ВЛ от молниевых воздействий указывается в «Положении о технической политике в распределительном электросетевом комплексе» ОАО ФСК ЕЭС, в «Положении о единой технической политике» в электросетевом комплексе ПАО «Россети». Как в действующей редакции, так и особенно во вновь разрабатываемой, для защиты от прямых ударов молнии, а особенно для защиты от индуктированных перенапряжений, рекомендуется применение молниезащитных разрядников.

По общему признанию, существующая нормативная база далека от совершенства, несмотря на то, что в значительной мере стала повторять документы МЭК. АО «НПО «Стример» принимает активное участие в совершенствовании нормативных документов по молниезащите электроэнергетических объектов. Работа направлена на расширение законного диа-

пазона применения защитного оборудования в электрических сетях России, особенно актуального в свете импортозамещения. Техническая работа организации направлена на повышение качества, улучшение характеристик молниезащитных разрядников (РМЗ), предназначенных для предупреждения развития коротких замыканий на ВЛ, отвода аварийных токов от изоляции, рассеяния энергии опасных дуговых разрядов.

Предлагаемая номенклатура РМЗ с описанием принципов работы и основными техническими характеристиками представлена в последующих разделах настоящих методических рекомендаций.

4. Способы защиты изоляции ВЛ от грозовых перенапряжений

Во введении отмечалось, что средства защиты от молниевых воздействий делятся на устройства, снижающие *вероятность* воздействий, и устройства, снижающие *параметры* таких воздействий. К первой группе устройств относятся грозозащитные тросы; ко второй — устройства защиты от грозовых перенапряжений. Далее внимание уделим второй группе средств, а именно устройствам защиты от грозовых перенапряжений на основе нелинейных сопротивлений (ОПН, РВ, УЗПН), искровым промежуткам и молниезащитным разрядникам (РМЗ). В настоящей публикации не рассматриваются устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП), которые в основном применяются в сетях напряжением ниже 1 кВ.

4.1. Искровые промежутки

Искровые промежутки (ИП) как средство защиты изоляции от грозовых перенапряжений когда-то получили широкое распространение на ВЛ до 110 кВ, а также в изолирующих подвесках грозозащитных тросов (ИПТ) ВЛ высших классов напряжения. Цель установки ИП — отведение канала разряда от гирлянды изоляторов для предупреждения их повреждения. Принцип работы ИП основан на том, что воздушный промежуток между электродами (часто называемыми дугозащитными рогами) имеет большее разрядное напряжение на промышленной частоте, чем гирлянда изоляторов, и имеет меньшую электрическую прочность при импульсных воздействиях. Поэтому в нормальном рабочем режиме ИП должен не оказывать влияния на работу изоляции, а при воздействиях перенапряжений его наличие должно определять развитие перекрытия

в промежутке между рогами.

При хорошей координации искровые промежутки в ряде случаев могут выполнять свою функцию защиты изоляции при ПУМ или обратных перекрытиях. Однако при индуцированных перенапряжениях из-за малых величин емкостных токов подпитки на ВЛ, питающихся от трансформаторов с изолированной нейтралью, работа релейной защиты затруднена; отключения линии не происходит. Продолжительное существование режима дугового замыкания может привести к пережогу проводов. Особенно это опасно на ВЛ с защищенными проводами, где опорная точка дуги не может перемещаться вдоль провода. Поскольку защита ВЛ 6–35 кВ от индуцированных перенапряжений в наибольшей степени определяет их грозоупорность, следует сделать вывод о том, что дугозащитные рога не являются надежным устройством защиты от грозовых перенапряжений. В настоящее время на ВЛ 6–10 кВ они запрещены «Положением о технической политике» ПАО «Россети».

Существующие конструкции ИП, применяемые в изолирующих подвесках грозозащитных тросов на ВЛ 220–1150 кВ, не выполняют своего функционального назначения — защиты изоляторов от грозовых перекрытий и воздействия дуги сопровождающего тока. Более чем в 90 % случаев грозовых воздействий на ВЛ перекрытия ИПТ происходят по изоляторам. Частые нарушения крепления разрядных рогов приводят к перекрытиям ИП при рабочем напряжении, образованию перебегающей дуги и, как следствие, увеличению потерь в тросах, электромагнитным помехам и нарушениям в каналах ВЧ связи. Короткие замыкания, возникающие в системах плавки гололеда на тросах по причине перекрытий ИП, препятствуют осуществлению оперативной плавки гололеда и могут приводить к аварийному отключению ВЛ.

Принимая сказанное во внимание, в [7] поставлен вопрос о целесообразности требования ПУЭ в отношении обязательности применения ИП в изолированном креплении тросов на ВЛ 220 кВ и выше, и предлагается отказаться от ИП в ИПТ,

что позволит устранить негативные последствия их установки, повысить надежность эксплуатации, снизить затраты на обслуживание и ремонты ВЛ.

Работа ИП на ВЛ среднего напряжения ненадежна.

Работа ИП на ВЛЗ недопустима.

Работа ИП в изолирующих подвесках грозозащитных тросов на ВЛ высших классов напряжения не надежна и даже зачастую вредна.

4.2. Вентильные разрядники

Вентильные разрядники (РВ) представляют собой комбинацию ИП и нелинейного сопротивления, размещенных в изоляционном корпусе (фарфоровом или полимерном). РВ многие годы используются на подстанциях для защиты изоляции оборудования от волн грозовых перенапряжений, набегающих с присоединенных ВЛ. РВ в основном выполняют свою функцию, но характеризуются значительным разбросом напряжений срабатывания, что сказывается на надежности их работы.

До некоторых пор применение РВ в качестве линейных разрядников было невозможно из-за плохих характеристик растяжения фарфора, из которого изготавливались их покрышки. Появление полимерных покрышек совпало по времени с появлением ОПН — аппарата более совершенного, чем РВ.

Вентильные разрядники практически не используются на воздушных линиях электропередачи.

4.3. Нелинейные ограничители перенапряжений

Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) в полной мере заменяют РВ на ПС как более стабильные, надежные защитные аппараты.

В последние годы получило определенное распространение применение ОПН на ВЛ в качестве линейных разрядни-

ков (ЛР). ЛР могут выполняться как с искровыми промежутками, так и без них.

Использование ЛР на ВЛ должно учитывать следующие обстоятельства:

- ОПН в составе ЛР без ИП очень чувствителен к возможным повышениям рабочего напряжения. Во избежание выхода ЛР из строя нужно тщательно подходить к выбору длительно допустимого рабочего напряжения ОПН;

- резерв срабатываний ЛР при ПУМ ограничен из-за протекания по варисторам больших импульсных токов. Велика вероятность взрыва ОПН. Установка ОПН на ВЛ среднего напряжения в Японии сопровождалась их массовым выходом из строя. Пришлось защищать сами ОПН от молниевых воздействий применением тросов. Рациональность установки ОПН можно рассматривать на ВЛ с грозозащитными тросами при минимальных вероятностях поражения молнией фазных проводов. Но и при этом ОПН должен быть способен рассеивать большую энергию молниевых воздействий;

- в соответствии с ограниченной зоной защиты для эффективной работы ОПН должны устанавливаться на каждой опоре ВЛ, что вкуче с необходимостью применения аппаратов с большой энергоемкостью заметно увеличивает капитальные вложения и эксплуатационные расходы сооружения линии электропередачи;

- принято целесообразным устанавливать ОПН на отдельных участках ВЛ в исключительных случаях: при необходимости отказа от применения грозозащитного троса; при переходах через водные преграды; при невозможности обеспечить приемлемые с точки зрения обратных перекрытий значения сопротивлений заземления опор.

В настоящее время экономически затратную установку ОПН в большинстве случаев используют на ВЛ (в основном класса 110 кВ) для полного исключения отключений из-за грозовых перенапряжений при необходимости обеспечения бесперебойного цикла производства.

Установка ОПН на ВЛ — достаточно эффективное, но весьма затратное мероприятие.

4.4. Устройства защиты от перенапряжений

Устройства защиты от перенапряжений (УЗПН), применяемые на ВЛ 6–20 кВ, представляют собой линейные разрядники с ИП.

УЗПН применяются для защиты от индуцированных грозовых перенапряжений, а в отдельных случаях и для защиты от ПУМ, но при малых токах молнии. Последнее обусловлено естественными ограничениями по возможности рассеяния энергии.

УЗПН имеют ограничения по применению из-за существующей вероятности их разрушения при ударах молнии в фазные провода.

4.5. Молниезащитные разрядники

Молниезащитные разрядники (РМЗ) — электротехнические устройства наружной установки, предназначенные для защиты изоляции воздушных линий электропередачи от воздействий грозовых перенапряжений путём предотвращения перекрытия изоляторов и изолирующих подвесок проводов за счёт обеспечения альтернативного пути развития разрядов и создания условий для успешного гашения дуги сопровождающего тока.

Конструкции РМЗ основаны на использовании двух физических принципов: эффекте развития скользящего разряда по изоляционной поверхности и процессе гашения дугового разряда путем деления на отдельные составляющие. При этом выделяются две группы РМЗ: длинно-искровые разрядники (РДИ) и разрядники на основе мультикамерных дугогасящих систем (МКС).

В зависимости от конструктивного исполнения РМЗ могут предназначаться для защиты изоляции от грозových перенапряжений при прямых ударах молнии и от индуктированных грозových перенапряжений. Причем вторые хоть и не защищают от перенапряжений при ПУМ, но и не выходят из строя и сохраняют работоспособность при таких воздействиях.

4.6. Преимущества молниезащитных разрядников по сравнению с другими устройствами защиты от грозových перенапряжений

Сравнение с искровыми (дуговыми) промежутками

Недостатки дуговой защиты с помощью «рогов» особенно очевидны при их установке на ВЛ среднего напряжения с защищенными проводами. При индуктированных перенапряжениях, характеризующихся сравнительно небольшими импульсными и особенно сопровождающими токами, канал дуги зачастую не выходит на рога, а развивается по поверхности изоляторов с окончанием разряда на проводе. Продолжительное горение дуги в одном месте без возможности перемещения по защищенному проводу приводит к его пережогу.

Применение молниезащитных разрядников исключает эту возможность — дуга сопровождающего тока не выходит на провод, развивается в элементах РМЗ и гаснет там же.

Применение ИП на ВЛ с защищенными проводами запрещено «Положением о единой технической политике» ПАО «Россети».

Сравнение с ОПН

Ограничители перенапряжений и молниезащитные разрядники широко применяются в электрических сетях всего мира. При этом каждое из устройств имеет свою нишу.

Основные области применения ОПН и РМЗ различны:

– ОПН используются на ПС всех классов напряжения для защиты изоляции оборудования от перенапряжений (грозовых, приходящих с ВЛ и коммутационных);

– РМЗ используются на ВЛ для защиты изоляции от молниевых воздействий.

Ограничение грозовых перенапряжений на ВЛ возможно и с помощью ОПН. И это реализовано на некоторых линиях электропередачи за рубежом и на нескольких ВЛ в России. Признано рациональным использование ОПН на ВЛ в случаях вынужденного отказа от применения грозозащитного троса в особо гололедных районах; в местах с плохо проводящими грунтами; в местах переходов через преграды (в основном, водные). Кроме того, используются ОПН на ВЛ, питающих объекты с непрерывным циклом производства (чаще нефтегазового комплекса), где перерывы электроснабжения недопустимы. При этом обычно ОПН устанавливают на каждой фазе каждой опоры ВЛ. При установке ОПН на ВЛ существует вероятность выхода их из строя при прямых ударах молнии в фазные провода.

Применительно к ВЛ среднего напряжения установлено, что рационально применять ОПН можно лишь при наличии грозозащитного троса. Опыт эксплуатации линейных разрядников на основе ОПН в Японии [10,11], США [12] и Китае [13,14] указывает на сложность технико-экономического обоснования применения ОПН на бестросовых ВЛ.

В этом отношении молниезащитные разрядники имеют преимущество, т.к. при прямых ударах молнии в провода РМЗ (даже предназначенные для защиты от индуктированных перенапряжений), как правило, не разрушаются и могут далее выполнять свои функции по защите изоляции. А РМЗ, предназначенные для защиты от ПУМ, не просто выдерживают прямой удар молнии, но и обеспечивают защиту линии от отключений при таком воздействии.

Сравнение с УЗПН

Область применения УЗПН и РМЗ общая: защита от индуцированных перенапряжений изоляции ВЛ 6–20 кВ. В некоторых случаях говорят о защите от ПУМ с помощью УЗПН (при установке по три штуки на опору), но лишь для небольших токов молнии. Есть модификации и РМЗ, также обеспечивающие защиту от отключений ВЛ при ПУМ.

Оба устройства со своей задачей справляются. Но поскольку основным элементом УЗПН является ОПН, то сохраняется и отмеченный выше недостаток: существующая вероятность выхода из строя при ПУМ.

Как отмечено выше, РМЗ при ПУМ не разрушаются.

5. Молниезащитные разрядники: принцип действия, конструкции

Технически защита изоляции ВЛ с помощью РМЗ осуществляется путем искусственного создания пути разряда, альтернативного его развитию по поверхности изоляторов, и обеспечению облегченных условий для гашения дуги сопровождающего тока.

Для реализации данной задачи в работе РМЗ используются два физических явления: развитие скользящего электрического разряда по поверхности твердого диэлектрика и гашение дуги искрового разряда путем ее деления на части.

5.1. Длинно-искровые разрядники

Оба явления использованы при конструировании длинно-искровых разрядников (РДИ). Альтернативный путь развития разряда проходит по гладкой поверхности полимерного покрытия несущего элемента разрядника. Поверхностное сопротивление покрытия меньше, чем у изолятора (гирлянды изоляторов). Поэтому импульсная электрическая прочность разрядника меньше, чем изоляции ВЛ, что определяет развитие перекрытия по разряднику. Таким образом, обеспечение развития разряда по разряднику при грозовых перенапряжениях осуществляется тем, что вольтсекундная характеристика РДИ находится ниже ВСХ изоляции ВЛ.

Применительно к ВЛЗ следует учесть еще одно обстоятельство, а именно необходимость исключения пробоя защитного изоляционного слоя при грозовом перенапряжении. Для предупреждения пробоя длина перекрытия по РДИ должна быть скоординирована с толщиной изоляции.

При этом при рабочем напряжении перекрытия по по-

верхности не происходят из-за всегда имеющегося большого запаса в разрядных напряжениях на промышленной частоте относительно необходимого уровня по надежности.

После молниевоего перекрытия на ВЛ дуга тока промышленной частоты устанавливается с некоторой вероятностью (немного подробнее смотри в [4]). Вероятность самопогасания дуги зависит от среднего градиента электрического поля E_{cp} , который в свою очередь в значительной степени зависит от длины пути разряда l_p :

$$E_{cp} = U_{\phi} / l_p \quad (5)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение линии, кВ.

Значение E_{cp} не должно превышать критического значения $E_{кр}$ для изоляции. То есть гашение дуги происходит при условии:

$$E_{cp} \leq E_{кр} \quad (6)$$

Критическая величина напряженности определена экспериментально [8] (Рисунок 4).

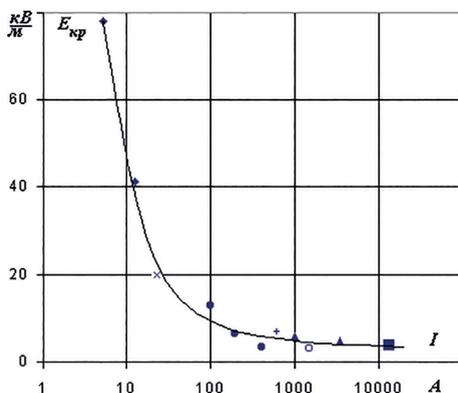


Рисунок 4 . Зависимость критического градиента перехода импульсного перекрытия в дугу от действующего значения сопровождающего тока

По данным исследований получены формулы для определения необходимой длины перекрытия L по РДИ, исключающей установление силовой дуги после прохождения тока молниевое перенапряжения:

$$L = \frac{U}{E_{кр}} = \frac{U}{70I^{-0,41}} \quad \text{при } 20 \leq I \leq 600 \quad (7)$$

$$L = \frac{U}{E_{кр}} = \frac{U}{8I^{-0,08}} \quad , \text{ при } 600 < I \leq 10\,000 \quad (8)$$

где I — действующее значение сопровождающего тока, А.

В электроаппаратостроении используется принцип повышения эффективности гашения дуги при разбиении её на отдельные дуговые отрезки (например, [9]). Согласно этому эффекту дугогасящая способность РДИ существенно увеличивается при разбиении канала перекрытия на большое число последовательно включённых искровых промежутков. Для этой цели служат промежуточные кольцевые электроды, размещаемые на поверхности покрытия через определенные расстояния.

Основное назначение РДИ — защита изоляции ВЛ 6, 10 кВ от индуцированных перенапряжений. Установка РДИ позволяет на порядок увеличить грозоупорность линии при индуцированных перенапряжениях, которые являются основной причиной отключений ВЛ этого класса напряжения.

Кроме того, разрядник модульный РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1 защищает изоляцию от прямых ударов молнии и эффективен при установке на подходах к подстанциям. Разрядники других конструкций защищают изоляцию ВЛ только от индуцированных перенапряжений, но не разрушаются при ПУМ.

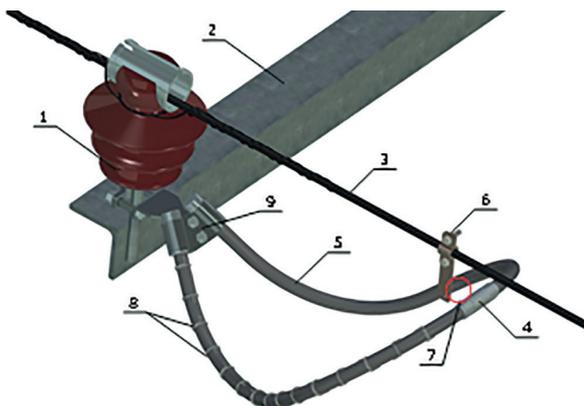
АО «НПО «Стример» выпускает несколько модификаций РДИ, отличающихся конструктивным исполнением.

РДИП — длинно-искровой разрядник петлевого типа

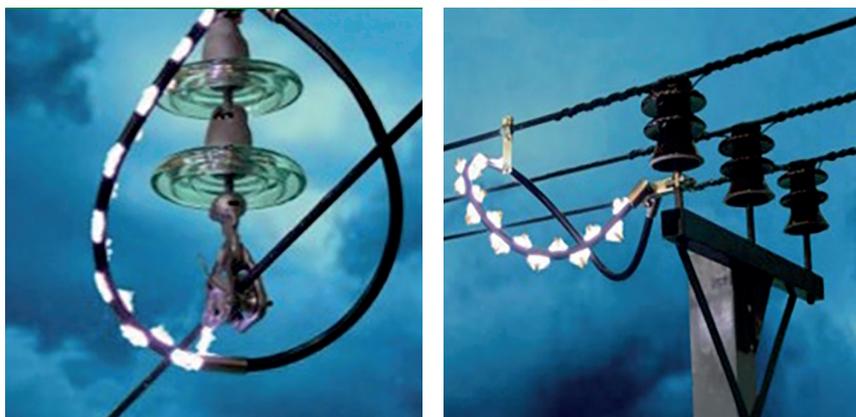
Разрядник РДИП-10-IV-УХЛ1 предназначен для защиты воздушных линий электропередачи напряжением 6, 10 кВ трехфазно-

го переменного тока с защищёнными и неизолированными проводами от индуктированных молниевых перенапряжений и их последствий и рассчитан для работы на открытом воздухе при температуре окружающего воздуха от минус 60°С до плюс 50°С в течение 30 лет.

Конструктивный эскиз, показывающий общий вид и основные составные части разрядника, приведен на рисунке 5. Разрядник состоит из согнутого в виде петли металлического стержня, покрытого слоем изоляции из полиэтилена высокого давления. Концы изолированной петли закреплены в зажиме крепления, с помощью которого разрядник присоединяется к штырю изолятора на опоре ВЛ. В средней части петли поверх изоляции расположена металлическая трубка. Между трубкой и зажимом на одном из плеч петли располагаются промежуточные электроды, которые разбивают дуговой канал на отдельные короткие каналы для увеличения дугогасящей способности разрядника. На проводе ВЛ напротив металлической трубки разрядника закрепляется зажим (с прокалывающими шипами в случае защищенного провода) для создания необходимого воздушного искрового промежутка.



*Рисунок 5. Конструктивный эскиз РДИП-10-IV-УХЛ1
1 – изолятор; 2 – траверса; 3 – провод; 4 – высоковольтный
электрод (металлическая трубка); 5 – разрядник;
6 – универсальный зажим для провода; 7 – воздушный искровой
промежуток; 8 – промежуточные электроды; 9 – кронштейн*



а)

б)

*Рисунок 6. Разрядник петлевого типа РДИП-10 во время испытаний:
а) разрядник на опоре с подвесной изоляцией; б) разрядник на опоре
со штыревой изоляцией*

При возникновении на проводе ВЛ индуктированного молниевое импульса искровой воздушный промежуток между проводом ВЛ и металлической трубкой разрядника пробивается, и напряжение прикладывается к изоляции между металлической трубкой и металлическим стержнем петли, имеющим потенциал опоры.

Под воздействием приложенного импульсного напряжения вдоль поверхности изоляции петли от металлической трубки к узлу крепления разрядника по плечу петли с промежуточными электродами развивается скользящий разряд. Вследствие эффекта скользящего разряда вольт-секундная характеристика разрядника расположена ниже, чем вольт-секундная характеристика изолятора, т.е. при воздействии молниевое перенапряжения разрядник перекрывается, а изолятор нет. При переходе сопровождающего тока сети через ноль дуга гаснет, что предотвращает возникновение короткого замыкания, повреждение провода и отключение ВЛ.

На рисунке 6 представлен момент срабатывания разрядника при воздействии молниевое импульса перенапряжения во время лабораторных испытаний на полномасштабной мо-

дели траверсы ВЛ 10 кВ.

На рисунке 7 показан разрядник РДИП1-10-IV-УХЛ1. Конструктивное отличие РДИП1 от РДИП сводится к изменениям формы изгиба петли, деталей узла крепления и способа обеспечения воздушного зазора между разрядником и проводом. Конструктивный эскиз, показывающий общий вид и основные составные части разрядника, приведен на рисунке 7а. Воздушный разрядный промежуток между электродом РДИП1 и проводом сохраняет установленные параметры независимо от геометрии провода в пролете и даже при проскальзывании провода в обвязке на изоляторе.

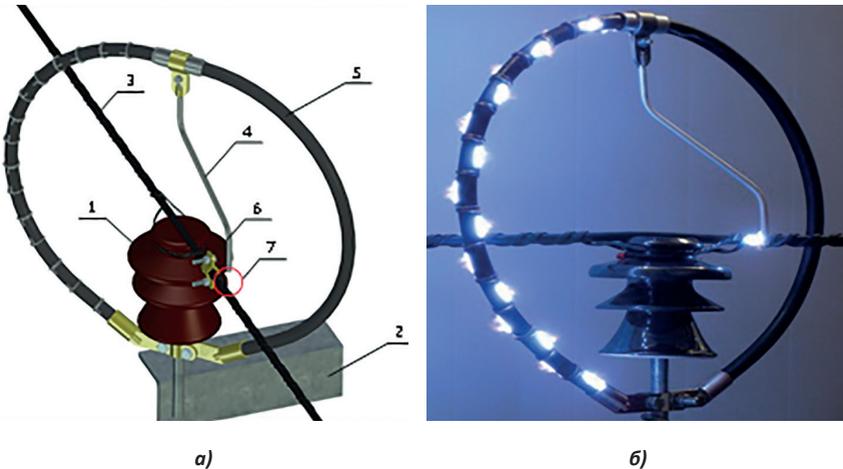


Рисунок 7. Общий вид петлевого разрядника РДИП1-10:
а) конструктивный эскиз; б) фотография испытаний на макете;
1 – изолятор; 2 – траверса; 3 – провод; 4 – электрод разрядника;
5 – разрядник; 6 – зажим; 7 – воздушный зазор.

РДИШ — длинно-искровой разрядник шлейфового типа

Разрядник РДИШ-10-IV-УХЛ1 предназначен для защиты ВЛ напряжением 6, 10 кВ трехфазного переменного тока с защищёнными и неизолированными проводами от индуктированных молниевых перенапряжений и их последствий. Конструкция РДИШ-10 показана на рисунке 8.

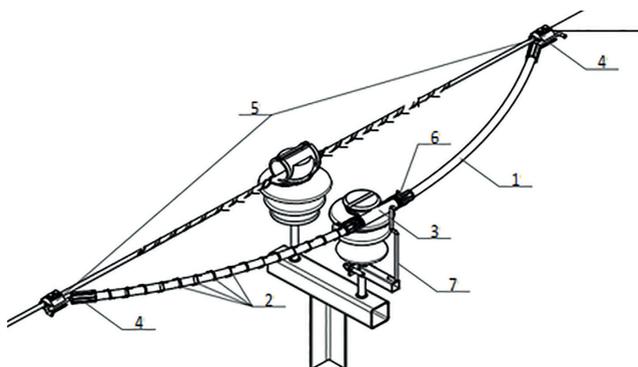


Рисунок 8. Общий вид разрядника РДИШ-10

**1 – разрядник; 2 – кольцевые электроды; 3 – металлическая трубка;
4 – оконцеватели; 5 – зажимы; 6 – обвязка проволокой; 7 – стержневой электрод**

Основным элементом разрядника является отрезок специального кабеля с алюминиевой монолитной жилой $\varnothing 9$ мм и трёхслойной изоляцией из сшитого полиэтилена (ПЭ) общей толщиной около 4 мм. Прилегающий к жиле слой выполнен из проводящего ПЭ, средний слой — из чисто изоляционного ПЭ, а наружный слой — из светостабилизированного трекингостойкого ПЭ. На одном из плечей разрядника установлены промежуточные кольцевые электроды, обеспечивающие разбиение канала перекрытия на отдельные отрезки. Разрядник снабжён алюминиевыми оконцевателями, через которые жила кабеля выступает за пределы изоляции. Разрядник крепится к проводу за эти выпуски с использованием зажимов. Конструкция зажима имеет две модификации, позволяющие устанавливать разрядник как на неизолированные провода, так и на защищённые провода, для которых зажим имеет прорусывающие шипы.

В средней части кабеля установлена металлическая трубка, за которую посредством скобы и обвязки вязальной проволокой осуществляется крепеж разрядника к изолятору. К штырю этого же изолятора напротив металлической трубки устанавливается стержневой электрод для обеспечения необходимого искрового промежутка.



Рисунок 9. РДИШ-10 во время испытаний

При возникновении на проводе ВЛ индуктированного молниевое импульса перенапряжения металлическая трубка на кабеле разрядника приобретает тот же высокий потенциал, что и провод (вследствие большой емкостной связи между трубкой и жилой кабеля). Поэтому первоначально практически всё молниевое перенапряжение оказывается приложенным к искровому воздушному промежутку между трубкой и заземлённым стержневым электродом. При напряжении порядка 50–70 кВ промежуток пробивается, и металлическая трубка на поверхности кабеля приобретает нулевой потенциал земли. Таким образом, перенапряжение оказывается приложенным между жилой кабеля и металлической трубкой на его поверхности. Под воздействием этого перенапряжения вдоль поверхности изоляции разрядника развивается скользящий разряд, который проходит от металлической трубки через промежуточные кольцевые электроды к соответствующему оконцевателю. Провод ВЛ оказывается связанным с заземлённой опорой через длинный канал разряда, который разбит на отдельные отрезки кольцевыми электродами (Рисунок 9).

После прохождения импульсного тока молниевое перенапряжения по каналу разряда протекает сопровождающий ток промышленной частоты. Однако при первом переходе тока через ноль разряд гаснет, не переходя в силовую дугу, что предотвращает возникновение короткого замыкания и отключение ВЛ.

Разрядники РДИШ-10 целесообразно применять для защиты ВЛ 6, 10 кВ от индуктированных молниевых перенапряжений в тех случаях, когда необходимо применять двойное крепление проводов.

РДИМ-10-1,5 — длинно-искровой модульный разрядник

РДИ модульного типа РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1 обладают наилучшими вольт-секундными характеристиками среди РДИ, что позволяет с их помощью защитить изоляцию ВЛ не только от индуктированных перенапряжений, но и от прямых ударов молнии в линию.

РДИМ состоит из двух отрезков кабеля с корделем, выполненным из резистивного материала. Отрезки кабеля сложены между собой так, что образуются три разрядных модуля 1, 2, 3 (Рисунок 10, а, б).

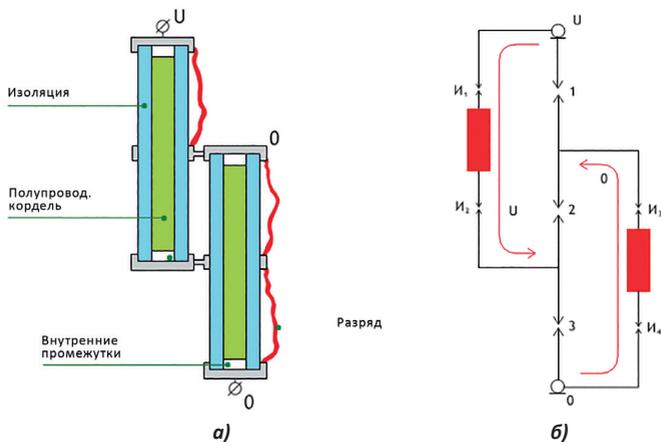
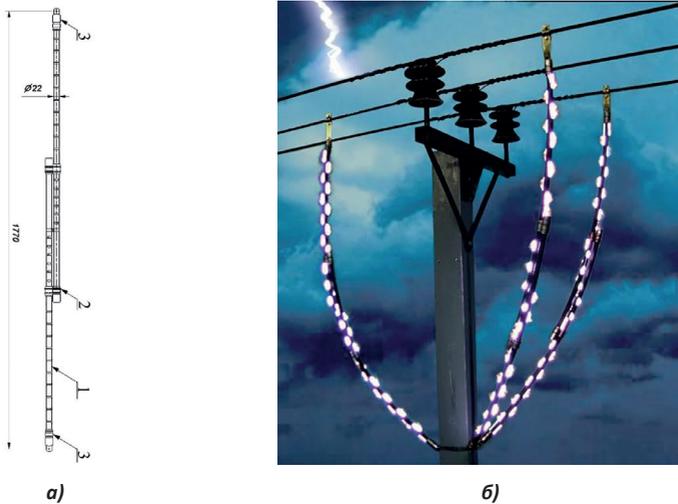


Рисунок 10. Иллюстрация принципа действия РДИМ: а) конструктивная схема; б) принципиальная схема



**Рисунок 11. Разрядник РДИМ-10-1,5: а) эскиз; б) фото испытаний:
1 – кабель; 2 – хомут; 3 – оконцеватель**

Отрезки резистивного корделя подсоединяются к металлическим оконцевателям через внутренние искровые промежутки И1, И2, И3, И4. При воздействии импульса молниевое перенапряжения они перекрываются, и резистивный кордель верхнего отрезка кабеля, имеющий сопротивление R , выносит высокий потенциал U на поверхность нижнего отрезка кабеля в его средней части. Аналогично резистивный кордель нижнего отрезка кабеля, имеющий также сопротивление R , выносит низкий потенциал θ на поверхность верхнего отрезка кабеля в его средней части.

Таким образом, к каждому разрядному модулю одновременно приложено полное напряжение U , и для всех трёх разрядных модулей 1, 2, 3 созданы условия для одновременного начала развития скользящих разрядов, которые, при перекрытии соответствующих модулей, создают единый, длинный канал перекрытия.

Основные составные части и вариант установки разрядника приведены на рисунке 11. Два отрезка кабеля соединены между собой хомутами. Разрядник снабжён оконцевателями,

с помощью которых он присоединяется к проводу и к опоре ВЛ. Элементы крепления дополнительно соединены с траверсой посредством шины для осуществления заземления.

Разрядник может устанавливаться как на неизолированные провода, так и на защищённые провода, для которых применяется прокусывающий зажим.

При возникновении на проводе ВЛ индуктированного молниевых импульса или при прямом ударе молнии в линию вдоль поверхности изоляции разрядника развивается скользящий разряд. После прохождения импульсного тока разряд гаснет, не переходя в силовую дугу, что предотвращает возникновение короткого замыкания и отключение ВЛ.

Разрядник целесообразно применять для защиты участков линии, подверженных прямым ударам молнии, а также для защиты подходов к подстанциям ВЛ на деревянных опорах или на железобетонных опорах с изоляторами ШФ20Г или аналогичных им по классу напряжения. На рисунке 12 приведена схема установки РДИМ-10-1,5, а на рисунке 13 — наиболее приемлемый вариант установки на защищенном подходе.

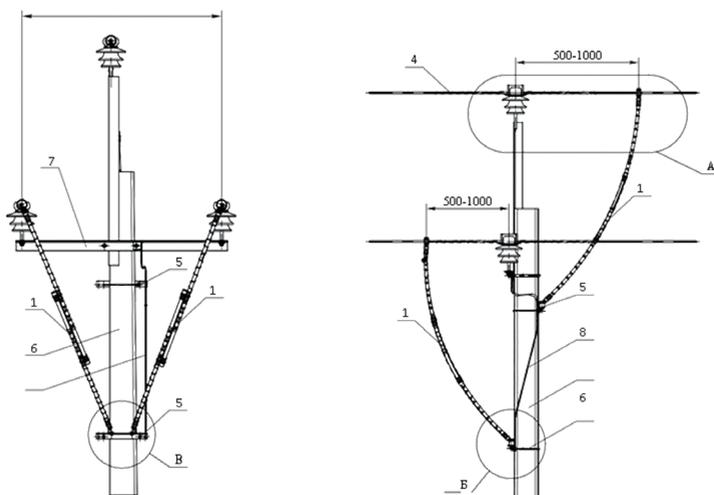


Рисунок 12. Схема установки РДИМ-10-1,5 на промежуточной опоре ВЛ 10 кВ

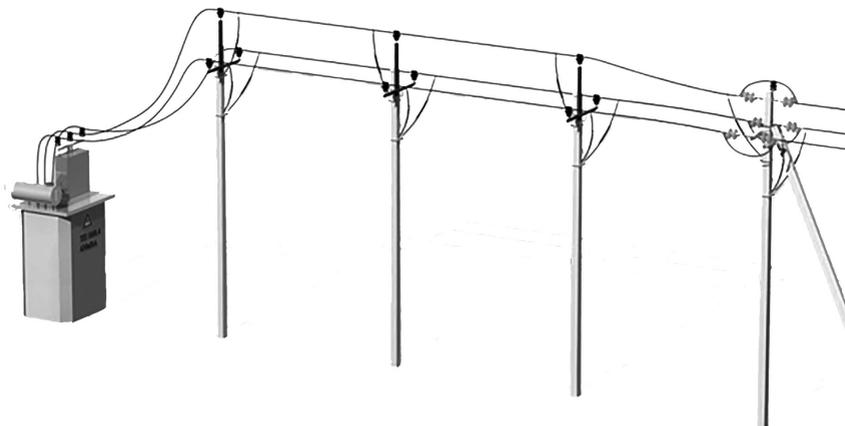


Рисунок 13. Установка РДИМ 10-1,5 для защиты подходов к подстанции

РДИМ-10-К — длинно-искровой модульный разрядник для ВЛ компактного типа

Разрядник РДИМ-10-К-II-УХЛ1 предназначен для защиты от индуктированных молниевых перенапряжений и их последствий воздушных линий электропередачи напряжением 6, 10 кВ трехфазного переменного тока с неизолированными и защищенными проводами компактного исполнения с расстоянием между соседними проводами около 0,5 м и с изоляторами класса 20 кВ в районах со второй степенью загрязнения. Общий вид и основные составные части и вариант установки разрядника на промежуточной опоре одноцепной ВЛ приведены на рисунке 14. Разрядник состоит из двух отрезков кабеля с резистивным корделем и стержневого изолятора в виде тонкого жгута из силиконовой резины. Стержневой изолятор снабжен оконцевателями, с помощью которых разрядник крепится одним концом к проводу, а другим — к опоре, и служит для обеспечения необходимой механической прочности разрядника, а также для создания внешних искровых разрядных промежутков.

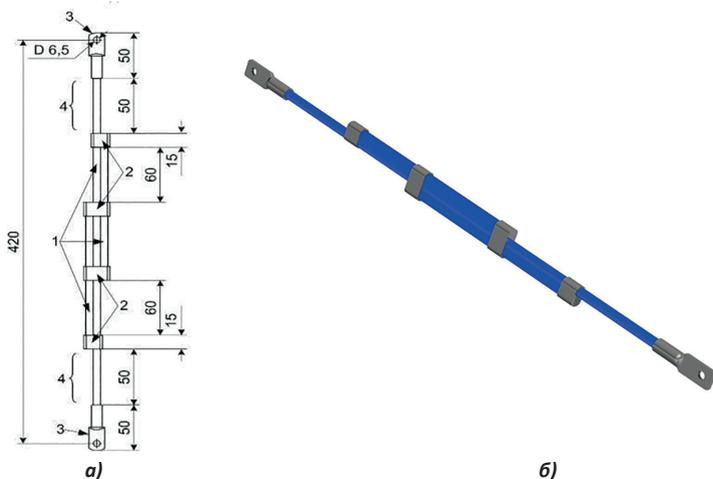


Рисунок 14. Внешний вид и конструкция РДИМ-10-К: а) габаритные размеры; б) внешний вид; 1–разрядные модули; 2–металлические втулки; 3–металлические оконцеватели; 4–искровые промежутки.

Отрезки кабеля крепятся к стержневому изолятору при помощи металлических втулок, образуя три разрядных модуля. Закрепление разрядника на ВЛ (Рисунок 15а) производится с помощью крепежного зажима. Конструкция крепежного зажима разрядника может быть изменена и иметь форму, адаптированную под конкретные условия крепления разрядника на опоре ВЛ.

При воздействии импульса молниевое перенапряжения сначала перекрываются искровые промежутки по поверхности стержневого изолятора с обоих его концов между металлическими оконцевателями и крайними втулками крепления к нему отрезков кабеля (Рисунок 15б). Импульсное напряжение, благодаря проводящим свойствам внутренних корделей двух отрезков кабеля, прикладывается одновременно к трем разрядным модулям, при искровом замыкании которых формируется общий длинный канал перекрытия разрядника.

После прохождения импульсного молниевых тока разряд гаснет, поскольку при заданной длине канала перекрытия

силовая дуга не устанавливается, что предотвращает возникновение короткого замыкания и отключение ВЛ.

На одноцепных ВЛ разрядники устанавливаются по одному на каждую опору параллельно изолятору только средней фазы.

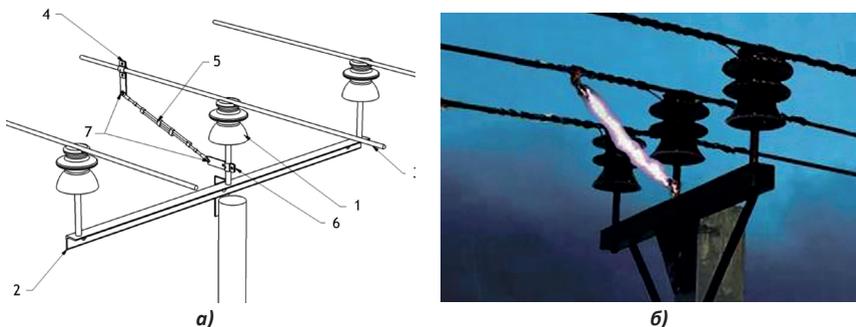


Рисунок 15. РДИМ-10-К на промежуточной опоре: а) схема установки; б) фото испытаний; 1 – изолятор; 2 – траверса опоры; 3 – провод; 4 – зажим прокусывающий; 5 – разрядник; 6 – зажим крепёжный.

На двухцепных ВЛ разрядники устанавливаются по 2 шт. на каждую опору, по одному разряднику так же только на среднюю фазу каждой из цепей (на одноименные фазы). Благодаря такому способу установки разрядников на компактных ВЛ при воздействии индуктированных перенапряжений, возможно только однофазное замыкание на землю. При этом сопровождающий ток является емкостным и в подавляющем большинстве случаев не превышает 10 А. Поэтому относительно небольшой длины пути перекрытия по разряднику достаточно для гашения сопровождающего тока (Рисунок 4).

При воздействии индуктированного перенапряжения на ВЛ срабатывают разрядники, установленные на средней фазе, и ее потенциал падает. Благодаря большому коэффициенту связи между средней и крайними фазами компактной ВЛ, а также вследствие падения напряжения на сопротивлении заземления опор от тока, протекающего через сработавший разрядник, напряжение на изоляторах крайних фаз не превышает их разрядное напряжение. Таким образом, все три фазы ВЛ

оказываются защищёнными от индуцированных перенапряжений.

Главным отличительным достоинством класса длинно-искровых разрядников является их неподверженность разрушениям и повреждениям грозowymi и дугowymi токами, поскольку они протекают вне аппаратов по воздуху вдоль их поверхности.

Это уникальное для грозозащитных аппаратов качество наряду с конструктивной простотой предопределило возможность их успешного применения в качестве эффективного и надёжного средства защиты ВЛ 6, 10 кВ от грозowych перенапряжений и их последствий.

5.2. Мультикамерные разрядники

Основным элементом мультикамерных разрядников (РМК) является мультикамерная система (МКС). Разработано два типа МКС: одна обеспечивает гашение сопровождающего тока при переходе его через ноль («гашение в нуле»), а вторая — гашение тока по окончанию импульса молниевое перенапряжения без сопровождающего тока сети («гашение в импульсе»).

Мультикамерные системы (МКС)

Принцип повышения эффективности гашения дуги при разбиении дуги на отдельные дуговые отрезки, использованный в конструкции РДИ, получил развитие в конструкциях МКС.

МКС состоит из большого числа электродов, вмонтированных в профиль из силиконовой резины (Рисунок 16). Между электродами выполнены разрядные колодцы, выходящие наружу профиля. Эти колодцы образуют миниатюрные газоразрядные камеры. При воздействии на разрядник импульса грозowego перенапряжения пробиваются промежутки между электродами.

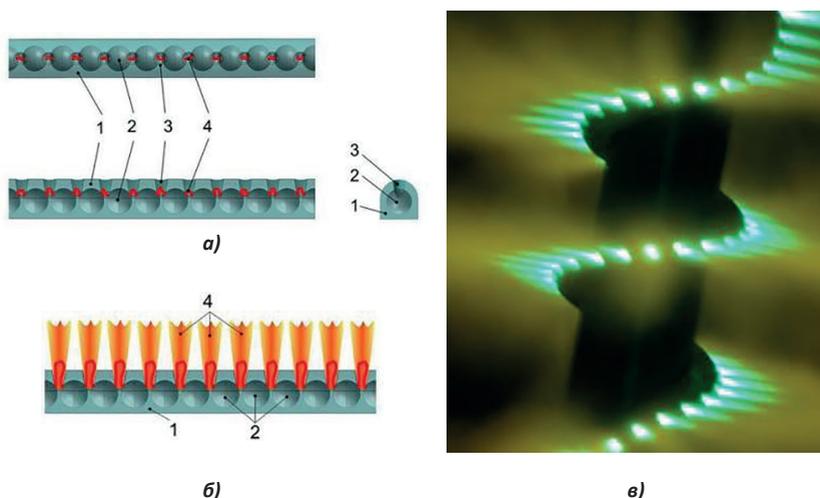


Рисунок 16. Мультикамерная система (МКС):
а) схема, поясняющая начальный момент развития разряда; б) схема, поясняющая завершающий момент развития разряда; в) фото МКС (установленной по спирали на кабель $\varnothing 50$ мм) при испытаниях; 1 – профиль из силиконовой резины; 2 – промежуточные электроды; 3 – дугогасящая камера; 4 – канал разряда.

Благодаря тому, что разряды между электродами происходят внутри колодцев, объёмы которых весьма малы, при расширении канала создаётся высокое давление. Под действием которого каналы искровых разрядов между электродами перемещаются к поверхности изоляционного тела и далее выдуваются наружу в окружающий разрядник воздух. Вследствие возникающего дутья и удлинения каналов между электродами каналы разрядов охлаждаются, суммарное сопротивление всех каналов увеличивается, т. е. общее сопротивление разрядника возрастает, происходит ограничение импульсного тока грозового перенапряжения и гашение сопровождающего тока.

Испытания МКС с промежуточными электродами в виде шариков диаметром 10 мм (Рисунок 16) показали, что при токах импульсов молниевое перенапряжения более 5 кА происходит соединение между собой плазменных облаков, исходящих из разрядных колодцев, и образование единого канала

разряда вне МКС. Это приводит к негашению сопровождающего тока, т.е. такую МКС нельзя применять в разряднике для защиты от ПУМ. Для ВЛ 35 кВ весьма важно обеспечить защиту как от индуцированных перенапряжений, так и от ПУМ. Для этого разработана модифицированная МКС (Рисунок 17) с удлинёнными электродами (длиной 15 мм), у которой расстояние между разрядными колодцами увеличено примерно в полтора раза по сравнению с МКС первого поколения с шариками (Рисунок 16).

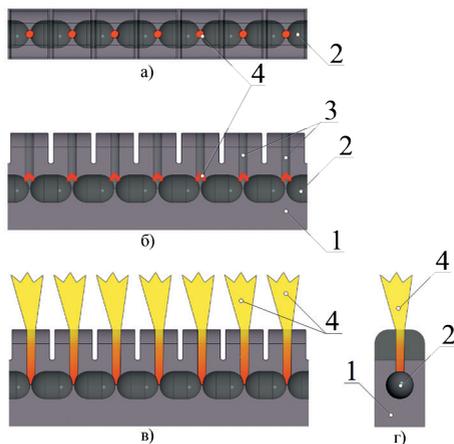


Рисунок 17. Фрагмент мультикамерной системы (МКС) для защиты от ПУМ: а) вид сверху; б) вид сбоку, начальная стадия разряда; в) вид сбоку, конечная стадия разряда; г) разрез по разрядному колодцу, вид с торца. 1 – профиль из силиконовой резины; 2 – промежуточные электроды; 3 – дугогасящий колодец; 4 – канал разряда.

В МКС, обеспечивающей гашение дуги сопровождающего тока при его переходе через ноль, дуга горит до 10 мс, и при больших токах КЗ (более 5 кА) гашение в нуле приводит к значительной эрозии электродов и в меньшей степени — газоразрядных камер. В МКС, обеспечивающей гашение в импульсе, эрозия электродов незначительна. Разрядники с такой МКС могут быть применены в сетях с большими токами КЗ. В таких МКС для повышения эффективности гашения сопровождающего тока использовано многократное (в 4–20 раз) увеличение

длины элементарного промежутка (в одной разрядной камере). Низкое разрядное напряжение МКС с гашением в импульсе обеспечено благодаря двум эффектам: 1) скользящего разряда; 2) каскадности срабатывания камер в цепочке МКС.

Каскадность создаётся за счёт влияния дополнительного электрода, устанавливаемого вдоль всей МКС (Рисунок 18). Этот электрод соединён с одним крайним электродом и изолирован от всех остальных электродов. Он имеет нулевой потенциал (соединён с землёй).

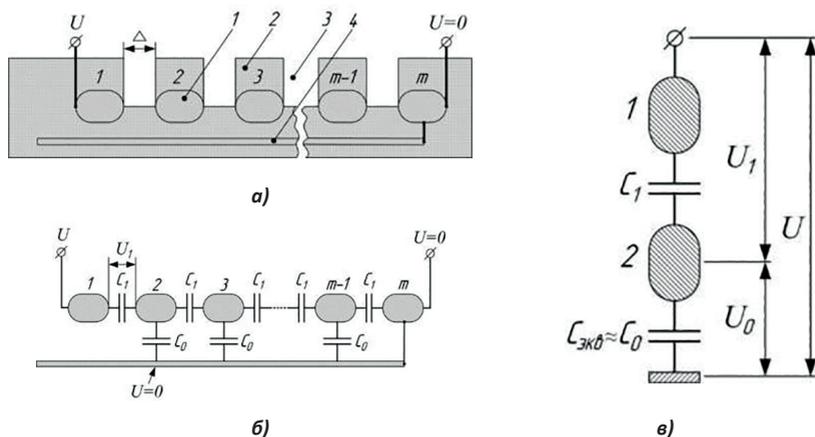


Рисунок 18. Иллюстрация принципа каскадности срабатывания МКС:
 а) эскиз МКС; б) принципиальная электрическая схема МКС;
 в) принципиальная электрическая схема одной камеры; 1 – электроды МКС;
 2 – профиль из силиконовой резины; 3 – газоразрядные камеры;
 4 – дополнительный электрод; Δ – длина разрядного промежутка
 камеры; C_0 – ёмкость электрода камеры на дополнительный электрод;
 C_1 – ёмкость электрода на другой электрод этой же камеры; U –
 напряжение на всей МКС; U_1 – напряжение между электродами
 камеры; U_0 – напряжение между вторым электродом камеры и
 дополнительным электродом.

Для такой системы электродов характерно неравномерное распределение приложенного напряжения по искровым разрядным промежуткам камер, что аналогично процессам, происходящим в гирляндах изоляторов. Поэтому при воздействии напряжения на МКС основная часть (по меньшей мере,

более половины) падения напряжения приходится на первый искровой промежуток U между первым и вторым электродами. Под действием этого напряжения первый промежуток пробивается, и второй электрод приобретает потенциал первого высоковольтного электрода, а следующий промежуточный электрод приобретает потенциал U_0 . Далее физическая картина пробоя искрового промежутка повторяется. Таким образом, происходит каскадное, т.е. последовательное перекрытие промежутков между электродами. Благодаря каскадности срабатывания разрядных промежутков обеспечиваются требуемые низкие разрядные напряжения срабатывания МКС в целом.

РМК-10 и РМК-20 — мультикамерные разрядники

Разрядники РМК-10-IV-УХЛ1 и РМК-20-IV-УХЛ1 (Рисунок 19) предназначены для защиты воздушных линий электропередачи напряжением 6, 10 кВ (РМК-10) и 6-20 кВ (РМК-20) трехфазного переменного тока с защищенными и неизолированными проводами от индуктированных молниевых перенапряжений и их последствий. Основными элементами РМК-10-IV-УХЛ1 и РМК-20-IV-УХЛ1 (Рисунок 19) являются разрядные элементы, представляющие собой МКС с несущим изогнутым стеклопластиковым стержнем внутри. Разрядники устанавливаются на металлические штыри изоляторов, на серьгу изолирующей подвески или оконцеватель изолятора с искровыми воздушными промежутками $S = 4-8$ см между верхними концами разрядников и проводом.

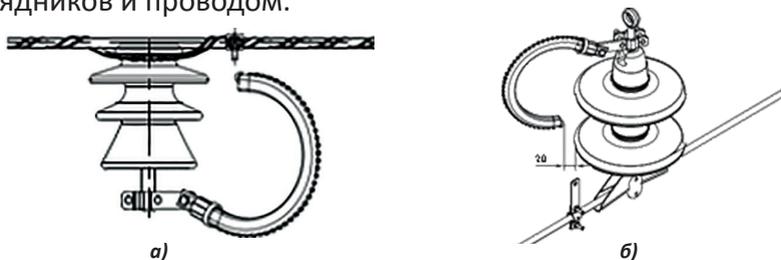


Рисунок 19. Установка разрядников с зажимом на проводе
а) на штыревой изоляции; б) на подвесной изоляции.

При воздействии грозового перенапряжения сначала пробивается искровой воздушный промежуток, а затем МКС разрядника, которая обеспечивает гашение сопровождающего тока (Рисунок 20).

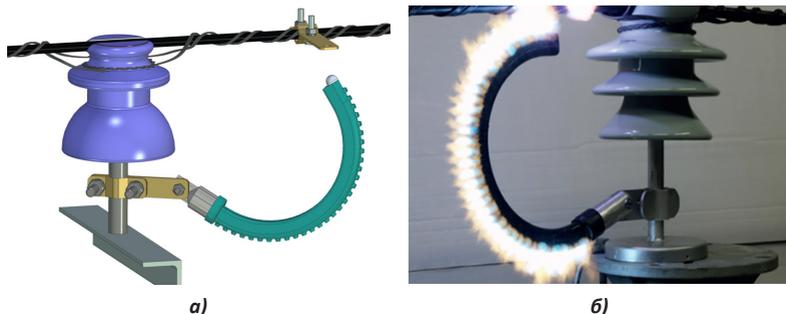


Рисунок 20. Разрядники мультикамерные для защиты от индуктированных перенапряжений: а) ВЛ 6, 10 кВ, РМК-10; б) ВЛ 20 кВ, РМК-20.

Разрядники устанавливаются по одному на опору с чередованием фаз. При этом токи промышленной частоты, сопровождающие многофазные замыкания, вызванные грозовыми перенапряжениями, протекают по контурам, включающим в себя сопротивления заземления опор. Эффективность гашения сопровождающих токов тем выше, чем меньше они по величине, а наличие сопротивлений заземления опор в контуре замыкания благоприятным образом влияет на снижение величины сопровождающих токов.

РМКЭ-35, РМКЭ-20 — мультикамерные разрядники экранного типа

Разрядник предназначен для защиты изоляции ВЛ 35 кВ от ПУМ, обратных перекрытий и индуктированных перенапряжений.

Разрядник РМКЭ-35 состоит из двух частей, напоминающих тороидальные экраны (Рисунок 21). Поэтому разрядник получил название РМК экранного типа для ВЛ 35 кВ (РМКЭ-35). МКС устанавливаются на несущие обручи, которые в свою очередь закрепляются на арматуре сверху и снизу гирлянды изоля-

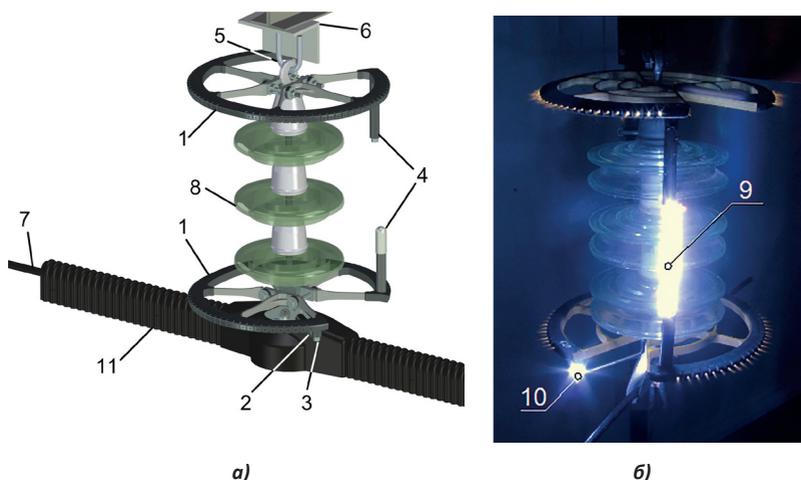


Рисунок 21. РМКЭ-35: а) общий вид; б) фотография во время испытаний:
1 – верхний и нижний экраны с МКС; 2 – нижний подводящий электрод;
3 – нижний отвод; 4 – промежуточные отводы; 5 – верхний подводящий электрод;
6 – траверса; 7 – провод; 8 – изолятор; 9, 10 – разрядные промежутки; 11 – защитный кожух.

торов (верхнем и нижнем оконцевателях полимерных изоляторов).

Между экранами с помощью отводов выставляется требуемый искровой воздушный промежуток (ИП).

Нижний экран при помощи нижнего подводящего электрода, нижнего отвода и арматуры гирлянды соединен с проводом ВЛ. Верхний экран при помощи верхнего подводящего электрода и арматуры гирлянды соединен с опорой ВЛ. Оба экрана — и верхний, и нижний — имеют на других концах отводы, направленные вниз и вверх соответственно.

При воздействии перенапряжения на провод ВЛ, например, при прямом ударе молнии в провод, срабатывают искровые воздушные промежутки между нижним подводящим электродом и нижним отводом нижнего экрана, а также между промежуточными отводами нижнего и верхнего экранов и МКС обоих экранов. Ток молниевое перенапряжения протекает от провода через искровой разрядный промежуток нижнего экрана, далее – по МКС этого экрана, по искровому промежутку между отводами, по МКС верхнего экрана, по его



Рисунок 22. Эскиз РМКЭ-35 на анкерной опоре с натяжной подвеской

верхнему подводящему электроду, по опоре и уходит в землю.

На проводе ВЛ, во избежание попадания на него выхлопа из МКС, устанавливается пластиковый защитный кожух.

На рисунке 22 приведен вариант установки РМКЭ-35 в натяжной изолирующей подвеске провода.

Благодаря высоким дугогасящим характеристикам МКС ток гасится либо «в импульсе», либо «в нуле», и линия электропередачи продолжает работу без отключения.

Мультикамерный разрядник РМКЭ-20 (Рисунок 23) фактически представляет собой нижний разрядный элемент РМКЭ-35 и предназначен для защиты от отключений ВЛ 6–20 кВ при индуктированных перенапряжениях, обратных перекрытиях и прямых ударах молнии в фазные провода.

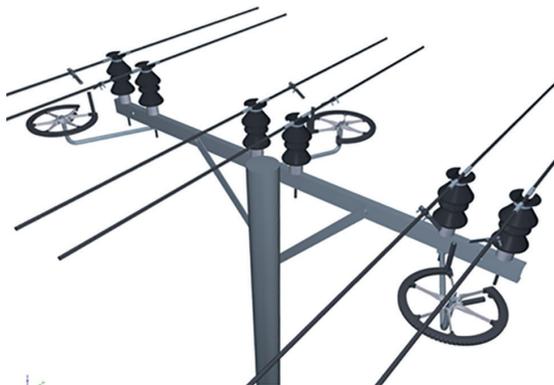
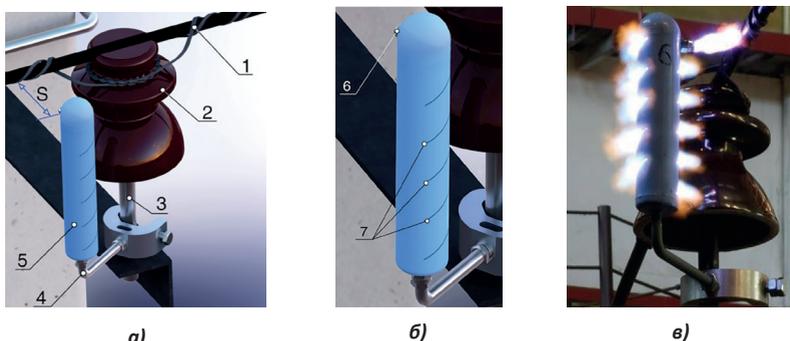


Рисунок 23. Эскиз установки РМКЭ-20

РМК-10-И и РМК20-И — мультикамерные разрядники с «гашением в импульсе»

На рисунке 24 приведён РМК для защиты ВЛ 10 кВ от индуктированных перенапряжений (РМК-10-И-III-УХЛ1). МКС этого разрядника содержит 10 камер. Для исключения перекрытия между плазменными образованиями, вылетающими из камер при срабатывании разрядника, камеры поочерёдно направлены в противоположные стороны, т.е. пять нечётных камер направлены в одну сторону, а пять чётных — в противоположную.

В конструкции использован вариант выполнения МКС с электродами в виде отрезков трубки из нержавеющей стали и дополнительным электродом в виде кабеля, проходящего внутри этих электродов, причём длина разрядного промежутка дополнительно увеличена за счёт диагонального (косого) расположения разрядной щели. Благодаря такой конструкции обеспечивается большая компактность МКС, а кроме того, в этом случае ёмкость электродов на дополнительный электрод (кабель) C_0 значительно больше, чем ёмкость между электродами одной газоразрядной камеры C_1 , что приводит к ещё большей, чем в других вариантах МКС, неравномерности распределения напряжения по камерам, что необходимо для снижения разрядного напряжения.



**Рисунок 24. РМК-10-И со штыревым изолятором ШФ-10:
а, б) общий вид; в) при испытаниях; 1 – провод; 2 – изолятор ШФ10-Г;
3 – штырь; 4 – кронштейн; 5 – тело разрядника; 6 – электрод;
7 – разрядные щели; 8 – разрядный промежуток.**

На базе РМК-10-И разрабатывается разрядник РМК-20-И для защиты от отключений, вызванных индуктированными молниевыми перенапряжениями для ВЛ 20 кВ (Рисунок 25) с любым режимом работы нейтрали (изолированной и заземлённой).

МКС этого разрядника содержит 20 камер: 10 камер направлены в одну сторону и 10 камер — в противоположную.

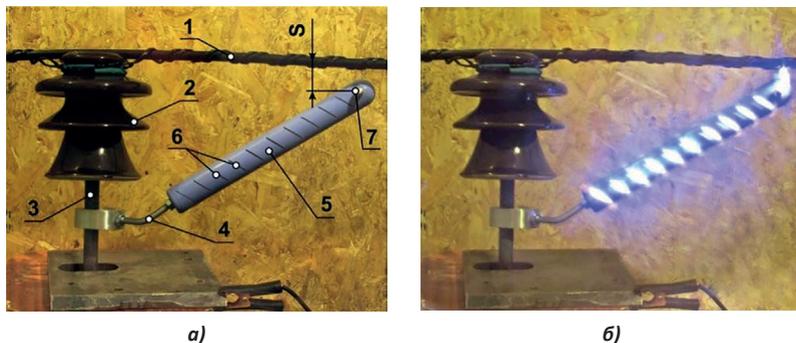


Рисунок 25. Прототип РМК-20-И со штыревым изолятором ШФ-20Г: а) общий вид; б) разрядник во время испытаний; 1 – провод; 2 – изолятор ШФ-20Г; 3 – штырь; 4 – крепление; 5 – тело разрядника; 6 – разрядные камеры; 7 – электрод; 8 – разрядный промежуток.

5.3. Мультикамерные изоляторы-разрядники

Изолятор-разрядник с мультикамерной системой (ИРМК) сочетает в себе свойства изолятора и разрядника одновременно. При использовании ИРМК на основе тарельчатых изоляторов, в принципе, возможно обеспечить молниезащиту ВЛ любого класса напряжения, так как с увеличением класса напряжения увеличивается число изоляторов в гирлянде и соответственно увеличиваются номинальное напряжение и дугогасящая способность гирлянды из ИРМК (ГИРМК).

Основу ИРМК составляют изоляторы (стеклянные, фарфоровые или полимерные), на которых специальным образом установлена МКС. Установка МКС не приводит к ухудшению

изоляционных свойств изолятора, но благодаря ей он приобретает свойства разрядника. Причём в случае установки ГИРМК с соответствующими параметрами на ВЛ возможен отказ от применения грозозащитного троса.

***ИРШФМК-20 — изолятор-разрядник
на основе штыревых изоляторов для ВЛ 6–20 кВ***

На рисунке 26 показан мультикамерный изолятор-разрядник на основе штыревого изолятора ШФ-20Г1 с использованием МКС по рисунку 16.



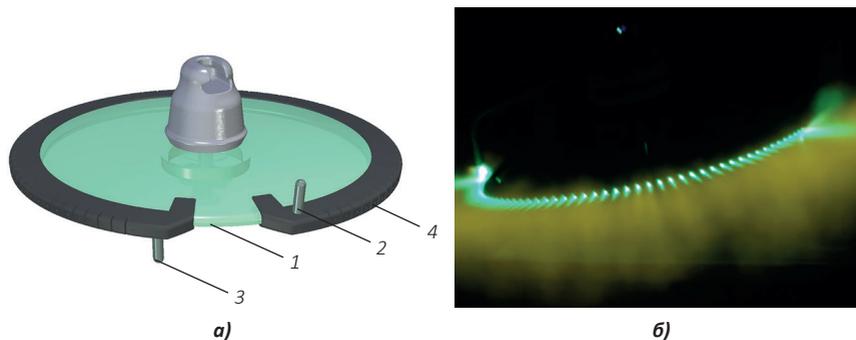
Рисунок 26. ИРШФМК-20

МКС установлена по периметру одного из рёбер изолятора. Она занимает примерно три четверти окружности ребра. Между подводящими электродами и концами МКС имеются искровые воздушные промежутки.

При воздействии перенапряжения на ИРШФМК пробиваются искровые воздушные промежутки и МКС. Ток молниевое перенапряжения протекает от провода по верхнему подводящему электроду через искровой канал верхнего искрового промежутка, по МКС, через канал разряда нижнего искрового промежутка по нижнему подводящему электроду к штырю изолятора и по опоре в землю. Таким образом, защита изоляции ВЛ обеспечена.

ИРМК на основе тарельчатых изоляторов

На рисунке 27 показан ИРМК на основе тарельчатого стеклянного изолятора с использованием МКС.



***Рисунок 27. ИРМК на основе изолятора U120AD(ВА):
а) общий вид; б) испытание на гашение дуги.***

***1 – тарельчатое изоляционное тело; 2 – верхний подводящий электрод;
3 – нижний подводящий электрод; 4 – мультикамерная система.***

ГИРМК-35 (110 и 220) для ВЛ 35–220 кВ

На рисунке 28 приведены фотографии гирлянды из трех ИРМК (ГИРМК-35) на основе изоляторов типа U120AD(ВА). При воздействии перенапряжения на провод, а также на нижний подводящий электрод первого (от провода) изолятора, пробивается нижний искровой разрядный промежуток, и напряжение поступает на начало МКС. Она срабатывает, перекрывается верхний искровой воздушный промежуток между концом МКС и верхним подводящим электродом, напряжение поступает на второй изолятор и т. д.

После срабатывания всех ИРМК в гирлянде ток молниевое перенапряжения отводится через опору в землю, однако за ним протекает сопровождающий ток промышленной частоты. При переходе тока через ноль дуга гаснет, и линия продолжает бесперебойную работу без отключения и АПВ.

Также разработаны, испытаны и установлены на линиях гирлянды изоляторов разрядников мультикамерных (ГИРМК) на классы напряжения 110 и 220 кВ.

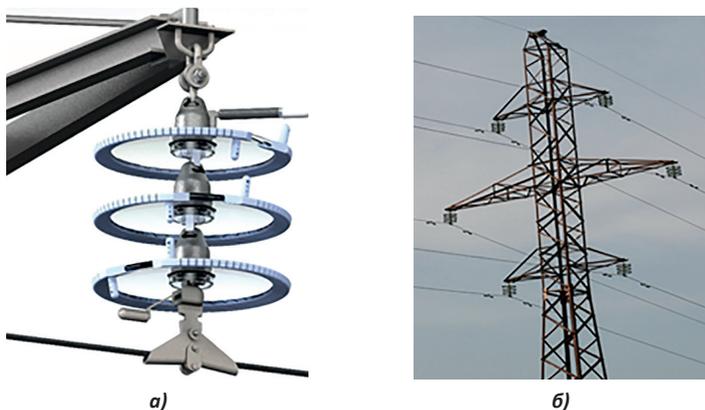


Рисунок 28. ГИРМК-35: а) общий вид; б) установка на опоре.

ГИРМК-220 конструктивно выполняется на базе гирлянды из 14 тарельчатых стеклянных изоляторов типа U120AD(ВА). Вдоль кромки ребра каждого изолятора монтируется мультикамерная система (МКС), занимающая примерно 5/6 окружности ребра. ГИРМК-220 выполняет одновременно две основные функции: линейной изоляции и защитного аппарата от молниевых перенапряжений.

ИРМК и ГИРМК 220 кВ успешно прошли весь комплекс электрических, механических и климатических испытаний, что позволило в 2013 году поставить их в опытно-промышленную эксплуатацию на ВЛ 220 кВ в МЭС Юга (Рисунок 29).



Рисунок 29. ВЛ 220 кВ «Цимлянская ГЭС – Шахты 30», оснащённая ГИРМК.

6. Ассортимент РМЗ АО «НПО «Стример», установка РМЗ на ВЛ

Ассортимент РМЗ формировался в течение всего времени существования организации и продолжает формироваться в соответствии с продолжающимися исследованиями с целью улучшения качества устройств, повышения их технических характеристик. Ведутся разработки новых устройств.

Любые изменения в конструкции разрядников сопровождаются проведением комплекса испытаний на соответствие электрическим характеристикам, на устойчивость к механическим и климатическим воздействиям внешней среды по СТО ПАО «Россети» «Разрядники молниезащитные для воздушных линий электропередачи переменного тока свыше 1000 В, Правила приемки и методы испытаний».

Сами устройства выполняются по стандарту ПАО «Россети» «Разрядники молниезащитные для воздушных линий электропередачи переменного тока свыше 1000 В, Общие технические требования». Подробные технические характеристики и методы испытаний представлены в технических условиях на каждое устройство.

РМЗ классифицируются в соответствии:

- с классами напряжения по ГОСТ 29322 для ВЛ, на которых они устанавливаются;
- с категорией размещения, климатическим исполнением и воздействием климатических факторов внешней среды УХЛ1, Т1 или О1 по ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1. Климатические исполнения и категории размещения должны быть установлены в ТУ на устройства конкретного типа;
- с 1–4 степенью загрязнения по ПУЭ и СТО 56947007-29.240.059;
- с районами по ветру и гололеду до VII включительно

(в зависимости от конструкции устройства в соответствии с гл. 2.5 ПУЭ);

- с назначением (для защиты изоляции от индуцированных грозовых перенапряжений или от грозовых перенапряжений при прямых ударах молнии);

- с типом исполнения (разрядник либо изолятор-разрядник).

РМЗ, предназначенные для защиты изоляции ВЛ при ПУМ, защищают изоляцию при индуцированных перенапряжениях.

РМЗ, предназначенные для защиты изоляции ВЛ при индуцированных перенапряжениях, не ограничивают перенапряжения при ПУМ, но и не выходят из строя при таких воздействиях.

Номенклатура выпускаемых НПО «Стример» молниезащитных разрядников с указанием основных технических характеристик приведена в таблице Приложение 1.

Установка РМЗ на опорах ВЛ может производиться на вновь строящихся, реконструируемых или на действующих ВЛ.

В зависимости от типа и конфигурации изоляторов или изолирующих подвесок проводов могут соответственно меняться некоторые конструктивные элементы разрядников: узлы крепления, искровые промежутки и др. Но возможность установки устройства имеется на любых опорах ВЛ — железобетонных, металлических, деревянных.

Количество РМЗ и места их установки на опорах определяются классификацией РМЗ и конструктивными особенностями опор и изолирующих подвесок проводов: типами изоляторов (гирлянд изоляторов), типами опор, длинами пролетов, величинами сопротивлений заземления опор и др. Но есть три основных правила, которые необходимо соблюдать в любом случае:

1. Для защиты от индуцированных перенапряжений изоляции ВЛ 6–20 кВ компактного исполнения РМЗ могут устанавливаться на средней фазе каждой опоры (отдельные разрядники, например РДИМ-10-К, предназначены только для

такой установки).

2. Для защиты от индуцированных перенапряжений изоляции типовых конструкций ВЛ 6–20 кВ РМЗ должны устанавливаться на каждой опоре на одной из фаз с их последовательным чередованием по длине линии (для двухцепных ВЛ на одноименную пару фаз на одной опоре).

3. Для защиты изоляции ВЛ СН (6–35 кВ) от ПУМ соответствующие РМЗ должны устанавливаться на каждой фазе каждой опоры ВЛ. РМЗ должны защищать изоляцию также от индуцированных перенапряжений, а для ВЛ с тросом и от обратных перекрытий, и обеспечивать гашение дуги сопровождающих токов.

Для защиты изоляции ВЛ ВН (110 кВ и выше) от ПУМ места установки РМЗ определяются на основе технико-экономических расчетов.

Поясним эти правила.

Правило 1. Установка разрядников на среднюю фазу компактных ВЛ

Рассмотрим вариант молниезащиты при установке разрядников на каждую опору на среднюю фазу ВЛ (Рисунок 30). Разумеется, вольт-секундные характеристики разрядников должны быть ниже, чем у соответствующих изоляторов.

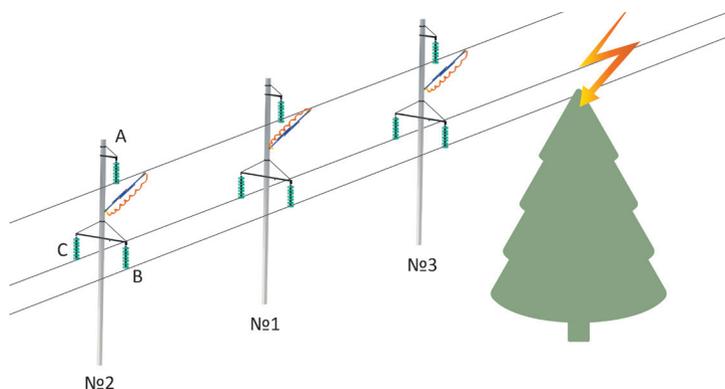


Рисунок 30. Схема установки РДИМ-10-К на линии при защите от индуцированных перенапряжений.

Индуктированные перенапряжения на проводах всех трёх фаз примерно одинаковы и воздействуют сразу на обширный участок ВЛ, включающий в себя несколько опор. При достижении перенапряжения определённой величины происходит срабатывание разрядников на опорах. Например, на опоре 1 под действием индуцированного перенапряжения $U_{инд}$ сработал разрядник, и с обеих сторон по проводу фазы А протекают токи i . Суммарный ток I можно оценить по формуле:

$$I = \frac{U_{инд}}{\frac{z_B}{2} + R_3} \quad (9)$$

где R_3 – сопротивление заземления опоры, z_B – волновое сопротивление провода.

Протекание суммарного тока I по каналу искрового перекрытия разрядника и через сопротивление заземления опоры приводит к падению напряжения. Потенциал опоры, а соответственно, и провода фазы А, составит:

$$U_{оп} = U_A = IR_3 = U_{инд} \frac{R_3}{\frac{z_B}{2} + R_3} = mU_{инд} \quad (10)$$

Соответственно, разность потенциалов между проводом фазы В и траверсой опоры 1, т.е. напряжение, приложенное к изолятору фазы В на опоре 1, уменьшается на $U_{оп}$. Вследствие электромагнитного взаимодействия между проводами фаз А и В, которое может быть учтено коэффициентом связи $k_{св}$, потенциал провода фазы В уменьшится на величину наведённого напряжения:

$$\Delta U_{НАВ} = (U_{инд} - U_A)k_{св} = (U_{инд} - mU_{инд})k_{св} = U_{инд}(1 - m)k_{св} \quad (11)$$

и составит:

$$U_B = U_{инд} - \Delta U_{НАВ} = U_{инд}[1 - (1 - m)k_{св}] \quad (12)$$

В итоге напряжение, приложенное к изолятору фазы В, может быть определено с учётом (11) и (12) по формуле:

$$U_{из} = U_B - U_{оп} = U_{инд}(1 - m)(1 - k_{CB}) \quad (13)$$

Коэффициент связи k_{CB} определяется по формуле:

$$k_{CB} = k_{CB,0}k_k = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}k_k = \frac{\ln \frac{D'}{D}}{\ln \frac{2H}{r_0}}k_k = f(D) \quad (14)$$

где: $k_{CB,0} = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}$ – геометрический коэффициент связи;

$k_k \approx 1,1$ – коэффициент, учитывающий влияние короны [2];

α_{11}, α_{12} – собственный и взаимный потенциальные коэффициенты;

D – расстояние между фазами;

D' – расстояние между первым (верхним, средним) проводом и отражённым в плоскости земли вторым (нижним, крайним) проводом;

H – высота первого провода над землёй;

r_0 – радиус провода.

При заданном габарите провод-земля и радиусе провода коэффициент связи полностью определяется расстоянием между фазами D , т. е. $k_{CB} = f(D)$. Подставляя (14) в (13), получим

$$U_{из} = U_{инд}(1 - m)(1 - f(D)) \quad (15)$$

На рисунке 31 приведены результаты расчёта по (15) напряжения на изоляторе незащищённой фазы $U_{инд}$ (фазы В) в зависимости от расстояния между проводами при = 300 кВ, высоте нижнего провода над землёй 8 м и радиусе провода 0,5 см для разных значений сопротивления заземления опоры.

Как видно из рисунка 31, напряжение на изоляторе незащищённой разрядником фазы существенно снижается при уменьшении расстояния между фазами и относительно слабо уменьшается при увеличении сопротивления заземления опоры. Если, например, на компактной ВЛ 10 кВ с расстоянием между фазами $D \leq 0,5$ м используются изоляторы ШФ20-Г, имеющие разрядное напряжение более 150 кВ, то и при срабатывании разрядника РДИМ-10-К, установленного на средней фазе, изолятор крайней фазы не будет перекрываться при индуктированных перенапряжениях.

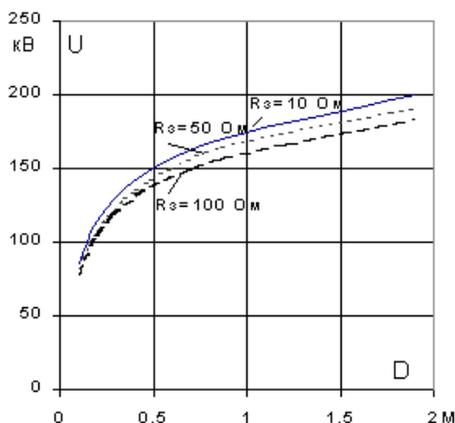


Рисунок 31. Зависимости напряжения на изоляторе незащищённой разрядником фазы (фазы В) от расстояния между проводами при $U_{инд} = 300$ кВ для разных значений сопротивления заземления опоры.

При срабатывании разрядника (или нескольких разрядников) вслед за током молниевое перенапряжения по каналу разряда протекает сопровождающий ток. В случае установки всех разрядников вдоль линии на одну фазу сопровождающий ток является током однофазного замыкания на землю линии с изолированной нейтралью (или нейтралью, заземлённой через дугогасящий реактор). Это ёмкостной ток, в большинстве реальных случаев не превышающий 10–20 А. Критический средний градиент рабочего напряжения по условию (5–6) для тока 20 А

составляет примерно $E_{кр} = 18$ кВ/м (Рисунок 4). Таким образом, длина молниевоего перекрытия, при которой исключается установление силовой дуги, $l = U_{ф.м} / E_{кр} = 6,9/1 = 0,38$ м. Следовательно, применяя РДИМ-10-К (см. раздел 5.1) с длиной перекрытия $l = 0,4$ м, исключается установление дуги промышленной частоты и обеспечивается надёжная защита линии от индуктированных перенапряжений.

Следует отметить, что аналогичным образом можно устанавливать разрядники и других типов. При этом необходимо, чтобы выполнялись три условия:

1. Вольт-секундные характеристики разрядников должны быть ниже, чем у изоляторов;
2. Расстояние между соседними фазами должно быть не более 0,5 м;
3. Выдерживаемое импульсное напряжение изоляторов должно быть больше 150 кВ.

Правило 2. Установка разрядников с чередованием фаз

Для защиты линий традиционных конструкций с относительно большими расстояниями между фазами ($D = 1,2-1,5$ м) от индуктированных перенапряжений рекомендована схема установки разрядников с регулярным последовательным чередованием оснащаемых фаз на разных опорах. Например, на первой опоре разрядник устанавливается на фазу А, на второй опоре разрядник устанавливается на фазу В, на третьей опоре – на фазу С и т. д. (Рисунок 32).

При воздействии индуктированных перенапряжений перекрываются разрядники, установленные на соседних опорах на разноимённых фазах. При этом образуется электрический контур, включающий в себя два сопротивления заземления опор. По контуру протекает ток междуфазного замыкания. Благодаря наличию сопротивлений заземления опор ток через разрядники I_p ограничивается до значений, не превышающих

$$I_p = U_{н.р.} / 2R_z \quad (16)$$

где: $U_{н.р}$ – наибольшее рабочее напряжение; R_3 – сопротивление заземления опоры.

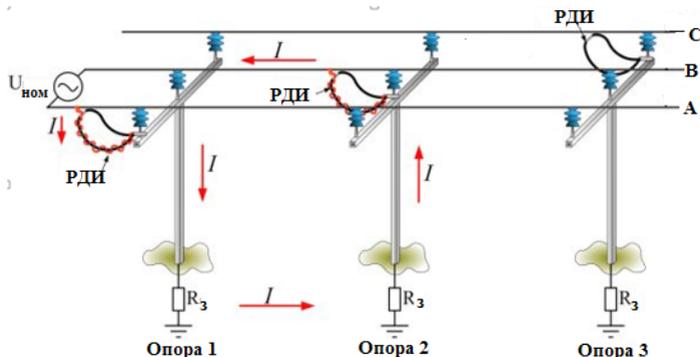


Рисунок 32. Схема установки разрядников на линии с чередованием фаз

Рассмотрим защиту ВЛ по схеме, представленной на рисунке 32. Для упрощения рассуждений рассмотрим процессы, происходящие на двух фазах А и В. При этом положим, что разрядниками защищены изолятор фазы А на опоре 1 и изолятор фазы В на опоре 2. При срабатывании разрядников на обеих опорах начинается распространение волн среза напряжения по проводу фазы А от опоры 1 к опоре 2 и соответственно по проводу фазы В от опоры 2 к опоре 1. Если время пробега этих волн между опорами будет превышать время, достаточное для нарастания перенапряжения на изоляторе фазы В на опоре 1 и на изоляторе фазы А на опоре 2 до величины разрядного напряжения изолятора, то произойдет их перекрытие. Если же волны среза напряжения успеют распространиться между опорами до этого момента, то перенапряжение на рассматриваемых изоляторах резко снизится и их перекрытия не произойдет, что будет означать выполнение разрядниками заданной защитной функции. Иными словами, успешность работы разрядников зависит от согласования вольт-секундных характеристик разрядников и изоляторов и может быть обеспечена при определенных длинах пролетов. Для примера на рисунке 33 приведены значения критической длины пролетов [4] для

подвески проводов ВЛ 10 кВ на изоляторах ШФ10-Г и использовании разрядников РДИП-10.

Как видно из рисунка 33, с уменьшением расстояния между фазами, а также с увеличением сопротивления заземления опор, критическая длина пролёта увеличивается. Из рисунка видно также, что во всех реальных случаях критическая длина пролёта имеет величину более 100 м. На практике средняя длина пролёта ВЛ 10 кВ составляет около 70 м, т.е. она

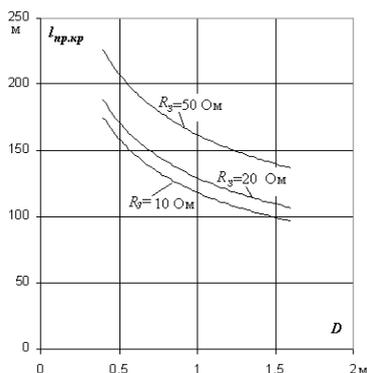


Рисунок 33. Зависимости критической длины пролёта от расстояния между фазами ВЛ при различных сопротивлениях заземления опор.

меньше критической. Таким образом, схема установки разрядников на разноимённых фазах на разных опорах обеспечивает координированную работу разрядников с изоляторами и защиту от индуцированных перенапряжений.

Вольт-секундные характеристики разрядников РМК (раздел 5.2) лучше, чем у РДИП-10. Поэтому они могут устанавливаться аналогично для молниезащиты ВЛ 10 кВ с изоляторами типа ШФ10-Г или другими изоляторами с более высокими разрядными напряжениями.

Правило 3. Установка разрядников на все фазы

Для защиты изоляции ВЛ СН в последние годы применялись различные разработки НПО «Стример», как на основе длин-

но-искровых разрядников, так и мультикамерных.

Для обеспечения гарантированной защиты изоляции ВЛ 6–10 кВ от любых молниевых воздействий, в том числе от ПУМ, необходимо устанавливать на каждую опору защищаемого участка ВЛ по три разрядника модульного типа РДИМ-10-1,5. При этом следует обеспечить низкое (желательно не более 10 Ом) сопротивление заземления лишь на ближайших нескольких опорах подхода к подстанции. Остальные опоры по условиям молниезащиты специально защищать не требуется.

Для защиты изоляции ВЛ 35 кВ должны применяться РМЗ на основе МКС — РМКЭ-35, ГИРМК-35, обеспечивающие защиту от ПУМ, индуктированных перенапряжений и обратных перекрытий. РМЗ устанавливаются на каждую фазу каждой опоры ВЛ.

Защита изоляции ВЛ высокого напряжения осуществляется путем применения ГИРМК.

ГИРМК могут применяться для молниезащиты ВЛ как при наличии грозотроса, так и при его отсутствии. При наличии троса проблемы с молниезащитой возникают при высоких значениях сопротивления заземления опор. При ударе молнии в трос или опору протекающий по телу опоры и по сопротивлению заземления ток молниевое перенапряжения создаёт на них значительное падение напряжения. Это может привести к обратному перекрытию с опоры на провод (Рисунок 34). Для

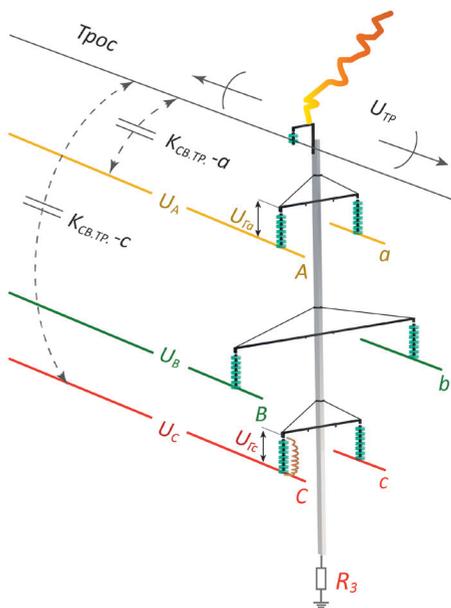


Рисунок 34. Иллюстрация обратного перекрытия фазы С.

предупреждения этого ГИРМК не обязательно устанавливать на все фазы ВЛ. Определение мест установки ГИРМК следует проводить на основании расчёта перенапряжений, возникающих при ударе молнии в опору или трос, а также на основании технико-экономического расчёта. Величины перенапряжений зависят от тока молнии, величины сопротивления заземления, а также от конструкции ВЛ.

Для предварительной оценки места установки ГИРМК полезно качественно определить фазу ВЛ, подверженную наибольшим перенапряжениям. При ударе молнии в опору или трос на тросе и вершине опоры возникает перенапряжение $U_{тр} = U_{оп}$ (Рисунок 34). Вследствие электромагнитной связи между проводами на фазном проводе (например, фазы А) наводится потенциал

$$U_A = U_{тр} k_{св.тр-А} \quad (17)$$

где: $k_{св.тр-А}$ – коэффициент связи между тросом и проводом фазы А.

Напряжение, приложенное к гирлянде фазы А, может быть определено как:

$$U_{г.А} = U_{оп} - U_A = U_{тр} - U_A = (1 - k_{св.тр-А}) U_{тр} \quad (18)$$

Из (18) видно, что чем меньше коэффициент связи между тросом и фазным проводом, тем больше напряжение, приложенное к гирлянде. Коэффициент связи уменьшается с увеличением расстояния между тросом и проводом. Таким образом, наибольшее перенапряжение будет приложено к гирлянде наиболее удалённой от троса фазы. В случае расположения фаз по рисунку 34 это фаза С. Напряжение на её гирлянде может быть определено по формуле (19), аналогичной (18),

$$U_{г.С} = U_{оп} - U_C = U_{тр} - U_C = (1 - k_{св.тр-С}) U_{тр} \quad (19)$$

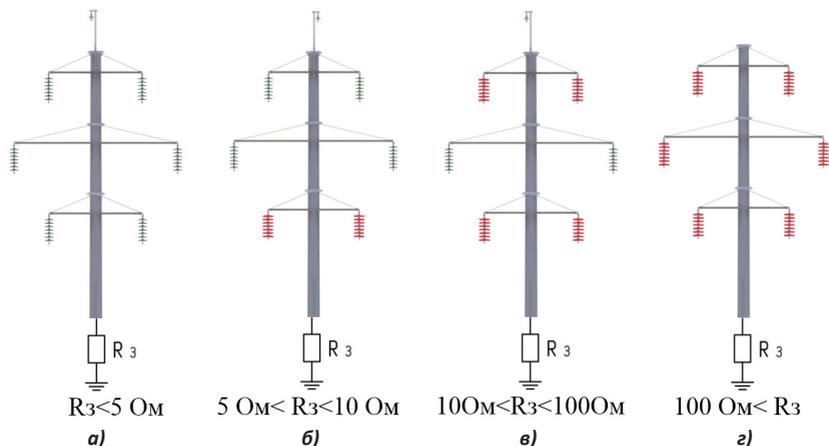


Рисунок 35. Ориентировочные рекомендации по установке ГИРМК на двухцепную ВЛ110 кВ (красным цветом показаны ГИРМК).

где: U_C – потенциал провода фазы С; $k_{св.тр-С}$ – коэффициент связи между тросом и проводом фазы С.

Таким образом, для уменьшения числа обратных перекрытий в первую очередь надо оснащать ГИРМК наиболее удалённые от троса фазы. На рисунке 35 в качестве примера приведены ориентировочные рекомендации по оснащению ГИРМК двухцепной ВЛ 110 кВ.

При низких значениях сопротивления заземления опор ($R_3 < 5 \text{ Ом}$) установка ГИРМК не требуется, т. к. обратные перекрытия маловероятны (Рисунок 35 а).

При относительно небольших значениях R_3 ($5 \text{ Ом} < R_3 < 10 \text{ Ом}$) целесообразно устанавливать ГИРМК только на нижние фазы (Рисунок 35 б).

В случае больших значений R_3 ($10 \text{ Ом} < R_3 < 100 \text{ Ом}$) возможно обратное перекрытие гирлянд изоляторов двух фаз. В этом случае целесообразно оснащать ГИРМК нижние и верхние фазы (Рисунок 35 в).

При весьма больших значениях R_3 ($100 \text{ Ом} < R_3$) (Рисунок 35 г) трос становится совсем неэффективным и даже приводит к увеличению числа обратных перекрытий по срав-

нению с линией без троса, т.к. вследствие большей высоты ВЛ с тросом число прямых ударов молнии в линию возрастает. В этом случае целесообразно отказаться от троса и оснастить все три фазы ГИРМК.

Следует отметить, что во всех рассмотренных случаях с увеличенным сопротивлением заземления двухцепных опор (Рисунок 35 б-г) возможно оснащение ГИРМК и одной цепи. При этом более надёжно обеспечивается молниезащита цепи, на которой установлены ГИРМК, но и молниезащита цепи без ГИРМК также улучшается, так как при возникновении обратных перенапряжений в первую очередь срабатывают ГИРМК на защищённой цепи. Опора, трос и провода фаз защищённой цепи, на которых сработали ГИРМК, приобретают примерно одинаковый высокий потенциал. Вследствие электромагнитной связи между ними с одной стороны и проводами фаз незащищённой цепи с другой стороны потенциал проводов незащищённой цепи возрастает. Поэтому напряжение (разность потенциалов между опорой и проводами), приложенное к гирляндам изоляторов незащищённой цепи, уменьшается. Во многих случаях ток молнии может оказаться недостаточно большим для создания перенапряжения, равного разрядному напряжению гирлянд изоляторов, и цепь не отключается.

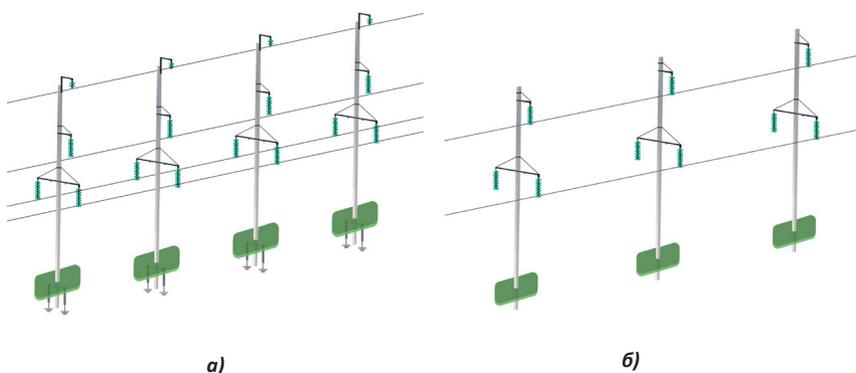


Рисунок 36. Эскизы для сравнения ВЛ традиционной конструкции с грозозащитным тросом (а) и ВЛ без троса с ГИРМК (б).

Разумеется, в случае молниезащиты лишь одной цепи двухцепной ВЛ надёжность молниезащиты меньше, чем при защите двух цепей, однако в некоторых случаях такое решение может быть технико-экономически оправданным с учетом относительного повышения стоимости подвесок проводов с ГИРМК.

При технико-экономическом анализе способа молниезащиты изоляции ВЛ следует учитывать изменение в конструкциях опор ВЛ при использовании ГИРМК. Для иллюстрации основных положительных факторов ГИРМК на рисунке 36 приведены для сравнения эскизы ВЛ традиционной конструкции с грозозащитным тросом и ВЛ без троса с ГИРМК.

К преимуществам ВЛ с ГИРМК можно отнести:

- уменьшение числа ПУМ в ВЛ (благодаря меньшей высоте опор и проводов по сравнению с тросом);
- уменьшение ветровых и гололёдных нагрузок (вследствие отсутствия троса и уменьшения высоты опор);
- снижение веса и стоимости опор или числа опор на линии;
- отказ от заземлителей опор по трассе ВЛ.

7. Опыт эксплуатации РМЗ (разрядников молниезащитных)

Впервые РМЗ (длинно-искровые разрядники РДИП-10) были установлены на действующую ВЛ в 1999 году. Тогда провели монтаж порядка 200 устройств на линию 10 кВ ОАО «Ленэнерго». По итогам первого сезона эксплуатации получено положительное заключение, после чего разрядники начали выпускаться и применяться в промышленных масштабах. Примечательно, что установленные тогда разрядники находятся в эксплуатации до сих пор.

За прошедшее время АО «НПО «Стример» разработано и введено в эксплуатацию 15 типов РМЗ, а всего на сегодняшний день выпущено около 1,2 млн устройств различных типов. В процессе разработки и приемочных испытаний каждый тип разрядников проходит полный комплекс необходимых испытаний (электрических, механических, климатических). Однако даже испытания, проводимые в самых современных лабораториях, не дают полного представления о том, как устройство будет работать в реальных условиях при воздействии удара молнии. Их полномасштабное внедрение начинается только после проведения опытной эксплуатации или пилотного внедрения на эксплуатируемых ВЛ.

В последние годы все большее распространение получают мультикамерные разрядники типа РМК и изоляторы-разрядники ИРМК. В 2015 году в рамках программы пилотного внедрения РМЗ на объектах ПАО «Россети» новые разрядники РМК-10-И были установлены на ВЛ 10 кВ «Вологдаэнерго» и «Карелэнерго», а РМКЭ-35 – на ВЛ 35 кВ «Вологдаэнерго». По итогам двухлетней эксплуатации ожидается получение положительного заключения заказчика об эффективности применения устройств.

Постоянными заказчиками разрядников стали нефтегазодобывающие компании. Для предприятий этой отрасли бесперебойность энергоснабжения особенно важна, их линии расположены преимущественно на безлесных территориях, а значит, особенно уязвимы для разрядов молнии. Начиная с 2008 года, поставки РМЗ для ОАО «Лукойл», ОАО «Роснефть» и ОАО «Газпромнефть» занимают значительную долю среди отгрузок продукции АО «НПО «Стример». Как обычно, внедрение РМЗ на объектах основных потребителей начинается с проведения опытной эксплуатации. Этот путь в разное время прошли РМК-20, ГИРМК-35 и сейчас, в 2016 году, вновь разработанный разрядник РМКЭ-35, обеспечивающий молниезащиту ВЛ 35 кВ, проходит ОПЭ на ВЛ 35 кВ ПАО «Газпромнефть». За время проведения испытаний было зафиксировано два срабатывания разрядников РМКЭ-35. В обоих случаях удалось избежать отключения линии. Потенциальные потери заказчика в результате каждого отключения составили бы 32 тонны нефти. Комиссия ПАО «Газпромнефть» признала проведенные опытно-промышленные испытания мультикамерных разрядников РМКЭ-35 успешными.

Начиная с 2011 года начались активные поставки продукции АО «НПО «Стример» за границу. Применение РМЗ в каждой из зарубежных стран также начинается с опытной эксплуатации. Бразилия, Китай, Индонезия, Вьетнам, Швейцария и Германия — география применения разрядников широка, а термины «test line» и «pilot project» прочно вошли в лексикон международного отдела компании.

Вскоре после оборудования первых линий в таких странах, как Бразилия, Китай, Индонезия, стало понятно, что в связи со значительно большей грозовой активностью на их территории накопление информации об эффективности молниезащитных устройств происходит значительно быстрее, чем в ходе их применения в России. Действительно, максимальная грозовая активность на территории нашей страны наблюдается в районе Черноморского побережья Кавказа и составляет

около 100–120 грозových часов в год, что приблизительно соответствует плотности разрядов в землю примерно 7–8 единиц на квадратный километр территории в год. В Юго-Восточной Азии плотность разрядов 15 единиц вполне нормальна, а высоким считается показатель более 20. Соответственно, если в России для получения первых результатов ОПЭ требуется не менее двух лет, то при проведении ее в тропиках нужные данные удастся собрать в течение полугода.

Первые итоги применения РМЗ в регионах Юго-Восточной Азии были представлены на нескольких международных и российских конференциях по молниезащите и энергетике, таких, как ICLP-2014 в Шанхае, конференции APL-2015 в Осаке и V Российской конференции по молниезащите в Санкт-Петербурге в 2016 году.

Еще один важный момент, на который необходимо обратить внимание, — сравнение результатов реального применения на ВЛ молниезащитных разрядников РМЗ и ОПН «классической» конструкции на основе металлооксидных варисторов. Действительно, РМЗ не способны в полном объеме пройти испытания по программам, разработанным для тестирования ОПН, в лабораториях, предназначенных для проведения именно таких тестов, но это кажущееся преимущество последних далеко не всегда подтверждается опытом эксплуатации. Например, энергетики стран Юго-Восточной Азии все чаще отдают предпочтение мультикамерным разрядникам. Это обусловлено тем, что в этом регионе необходимо обеспечить защиту ВЛ с помощью устройств, которые оптимальны по соотношению цены и качества, а также имеют подтверждение надежности и безотказности работы.

8. Актуальные вопросы и ответы

1. Можно ли использовать РМЗ вместо ОПН?

У каждого из устройств есть свое предпочтительное место работы.

ОПН, благодаря более глубокому ограничению перенапряжений, чем у РМЗ, хорошо зарекомендовали себя при организации защиты изоляции оборудования подстанций и кабелей от волн грозовых перенапряжений, набегающих с ВЛ, и от коммутационных перенапряжений. Импульсное разрядное напряжение РМЗ превышает величину импульсной электрической прочности изоляции оборудования и изоляции кабелей. Поэтому РМЗ не могут полностью заменить ОПН для их защиты, но могут использоваться для предварительного ограничения перенапряжений. Так, целесообразно использовать РМЗ для организации молниезащиты подходов к подстанциям, при этом окончательное ограничение перенапряжения на подстанции должно осуществляться с помощью ОПН.

В то же время РМЗ хорошо зарекомендовали себя при организации защиты изоляции воздушных линий электропередачи среднего напряжения от грозовых перенапряжений. И при выборе устройства защиты линейной изоляции предпочтение стоит отдать РМЗ как устройству более стойкому к большим импульсным токам, характерным для прямых ударов молнии (ПУМ), чем ОПН. Последнее справедливо и применительно к ВЛ 35–220 кВ.

2. Какие материалы используются при производстве РМЗ?

Набор материалов для изготовления РМЗ не очень широк, но достаточно разнообразен. Применение того или иного материала определяется конструктивными особенностями и обеспечением надежности работы разрядника.

В качестве несущих элементов РМЗ используются метал-

лические или стеклопластиковые стержни; для РМКЭ используется профиль из полифениленсульфида.

Для изоляционных элементов РДИ применяется некоторые виды полиэтилена: полиэтилен (ПЭ) высокого давления, светостабилизированный ПЭ, сшитый полиэтилен (СПЭ), трекингоустойчивый ПЭ.

Изоляционная часть МКС изготавливается из силиконовой резины.

Для изготовления РДИМ используется кабель с корделем из резистивного материала.

Электроды МКС изготавливаются из стали, элементы крепления из стали и алюминия.

Все материалы имеют сертификаты качества.

3. Как нужно устанавливать РМЗ? Можно ли это делать без отключения ВЛ?

Схема расстановки РМЗ на ВЛ указана в соответствующих РЭ и зависит от назначения устройства. В базовом варианте все виды РМЗ монтируются на отключенных ВЛ, но существуют конструкции РМЗ приспособленные для установки на действующих линиях электропередачи без их отключения. При этом должны соблюдаться правила работы под напряжением, применяться специальный инструмент. В частности, разработаны соответствующие узлы крепления для РМК-20. Впервые такой монтаж был осуществлен в 2010 году.

4. РМЗ уже установлены на ВЛ? Где?

Более 1 миллиона РМЗ разных конструкций работают в электрических сетях России, порядка 20 тысяч РМЗ установлены за рубежом: в Европе, в Бразилии, в странах Юго-Восточной Азии.

Изоляторами-разрядниками укомплектована ВЛ 220 кВ «Цимлянская ГЭС – Шахты 30», оснащен ряд ВЛ 35 и 110 кВ.

5. Опыт эксплуатации, рекламации.

РМЗ работают на ВЛ с 1999 года. За время эксплуатации в Рос-

сии рекламаций производителю не поступало.

К сожалению, имеются акты вандализма и воровства. Разрядники снимаются с линии, выявлены случаи изготовления контрафактной продукции. Лицензированный производитель предпринимает технические и организационные попытки предупреждения этих событий.

6. Нужно ли обслуживать РМЗ в процессе эксплуатации?

РМЗ всех конструкций не требуют специального обслуживания и испытаний в течение периода эксплуатации. Для визуальной фиксации срабатывания РМЗ многие из них снабжаются соответствующими индикаторами. Факт срабатывания РМЗ может быть установлен во время текущих регламентных работ на ВЛ и интересен в основном для статистической обработки.

7. Срок службы РМЗ? Гарантийный срок?

Расчетный срок службы разрядников составляет 30 лет.

Гарантийный срок на РМЗ — 5 лет со дня ввода в эксплуатацию.

8. Сколько раз РМЗ способен срабатывать?

В соответствии с техническими условиями РМЗ испытываются на отключающую способность 10 раз, при этом он сохраняет работоспособность и может продолжать использоваться по назначению и дальше. Для сравнения, по статистике ВЛ 10 кВ протяженностью 10 км может отключаться по причине индуктированных грозовых перенапряжений до 3 раз в год, т.е. за 30 лет порядка 90 раз (при грозовой активности 40 ч/год). При этом на 10 км ВЛ установлено порядка 150 опор, и если перенапряжения распределяются равномерно по длине ВЛ, то одна опора окажется подверженной грозовым перенапряжениям менее 1 раза за 30 лет. Соответственно, при установке разрядников на всех опорах ВЛ разрядник сработает менее 1 раза за срок эксплуатации. Конечно, отдельные участки ВЛ могут чаще подвергаться ударам молнии, но и в этом случае

вероятность срабатывания разрядника 10 раз невелика.

Ресурс РМЗ соответствует предположению.

9. Как узнать, что разрядники сработали?

Разрядники могут быть оснащены индикаторами срабатывания, которые представляют собой стеклянную колбу. Эта колба при срабатывании разрядника разбивается. При необходимости сработавший индикатор можно заменить. Разрядник может эксплуатироваться и со сработавшим индикатором.

Разбившийся индикатор — надежный показатель срабатывания устройства, особенно вкуче с фиксацией наличия гроз и отсутствия отключений линии.

10. Как влияют на работу РМЗ дождь, снег, ветер, гололед?

Влияние на характеристики РМЗ воздействующих климатических факторов проверяется в обязательном порядке при проведении квалификационных испытаний.

Когда есть гололед, нет гроз. Зимние грозы — очень большая редкость. С точки зрения изоляции лёд — это диэлектрик. Проблемы могут возникать весной, когда лед начинает таять.

Как показали исследования (экспериментальные и теоретические), наличие воды в дугогасящих камерах МКС приводит к увеличению сопротивления разрядника. Повышенное падение напряжения на дуге приводит к более интенсивному восстановлению электрической прочности разрядного промежутка. Дугогасительная способность разрядных камер в присутствии молекул воды возрастает.

11. Если РМЗ вышел из строя, как это повлияет на работу ВЛ?

Установка РМЗ обеспечивает защиту изоляции ВЛ от молниевых воздействий. Естественно, при выходе из строя устройство не сможет выполнять свою функцию. Но сломавшийся разрядник не снижает характеристик изоляции.

Выход из строя РМЗ соответствует его отсутствию на ВЛ.

12. Какие нормативные документы регламентируют применение РМЗ на ВЛ?

Применение молниезащитных разрядников обуславливается, например, следующими документами:

1. ПУЭ, глава 2.5, п.2.5.118....

«На ВЛЗ 6–20 кВ рекомендуется устанавливать устройства защиты изоляции проводов при грозовых перекрытиях».

2. СТО 56947007-29.240.02.001-2008 Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ от грозовых перенапряжений...

«На ВЛЗ 6–10 кВ, проходящей по населенной местности и зоне с грозовой деятельностью в среднем 20 грозовых часов и более, необходимо предусмотреть установку для защиты от грозовых перенапряжений РДИ (см. приложение Д и Рисунок Ж.6).»

3. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе».

«9.8. Защита от грозовых перенапряжений

9.8.3. Молниезащита ВЛ 35 кВ осуществляется заземлением опор с обеспечением нормированного значения сопротивления заземления и применением защитных аппаратов.

9.8.4. На ВЛЗ 6-10 кВ, проходящей по населенной местности и зоне с грозовой деятельностью 20 грозовых часов и более, необходимо предусмотреть установку устройств защиты от грозовых перенапряжений.

9.8.5. Применение на ВЛ 6-35 кВ устройств защиты от грозовых перенапряжений должно обеспечивать защиту:

– проводов от перегрева и пережога;

– подходов к РУ ПС;

– изоляции ВЛ в районах с повышенной грозовой активностью;

– коммутационного оборудования;

– кабельных муфт;

– мест пересечения ВЛ с инженерными сооружениями;

– столбовых и мачтовых ПС, РП, ТП.»

13. Как выставляются воздушные промежутки на ГИРМК?

Воздушные промежутки выставляются на заводе при установке замков на пестиках изоляторов-разрядников, которые исключают ошибки при монтаже. Эти замки не позволяют промежуткам изменяться в больших пределах.

14. Что произойдет с разрядниками, ориентированными на защиту от индуктированных перенапряжений, при прямом ударе молнии?

В таком случае разрядники не гасят сопровождающий ток и не могут ликвидировать аварийный режим, но они и не разрушаются. При испытаниях такие разрядники проверяются на стойкость к прямому удару молнии.

15. Нужны ли дополнительные требования к заземлению при установке РМЗ на ВЛ 6–10 кВ?

Дополнительных требований к заземлению опор нет, если разрядники устанавливаются на ВЛ не на подходе к ПС. В этом случае задача разрядников — защитить изоляторы от перекрытия. Для этого не требуется контроль заземления.

Если РМЗ используются для обеспечения молниезащиты на подходах к подстанции, то сопротивление заземления должно быть малым, чтобы минимизировать напряжение на ВЛ после срабатывания разрядника. Разрядники устанавливаются с чередованием фаз на трех ближайших к подстанции опорах, где обеспечивается хорошее заземление. Другой возможный вариант — установка РМЗ на всех трех фазах на одной опоре. При этом требуется обеспечить сопротивление заземления этой опоры не более 10 Ом.

Список использованной литературы

1. Правила устройства электроустановок. Издание 7.
2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. СО 153-34.21.122-2003.
3. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений, СПб., ПЭИПК, 1999 г.
4. Методические указания по защите распределительных сетей напряжением 0,4–10 кВ от грозových перенапряжений, ОАО «ФСК ЕЭС», СТО 56947007-29.240.02.001-2008.
5. М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов. Физика грозového разряда и грозозащита линий электропередачи, Л., ЛПИ, 1982 г.
6. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1414-1997.
7. Богданов О.В., Гайворонский А.С. К вопросу о применении искровых промежутков в изолирующих подвесках грозозащитных тросов.
8. Подпоркин Г.В. Молниезащита воздушных линий электропередачи. СПб., ИД «Родная Ладога», 2015.
9. Таев А.С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. – М., Энергия, 1965.
10. Chubu Electric Utilizes Current Limiting Arcing Horn to Prevent Insulated Conductor Burn Down on Distribution System, Insulator News & Market Report, Volume 6, Number 4, July/August 1998, pp. 7-11.
11. M. Washino, A. Fukuyama, K. Kito and K. Kato, "Development of Current Limiting Arcing Horn for Prevention of Lightning Faults on Distribution Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, January 1988, pp. 138-152.
12. Short, T. A., and Ammon, R. H., "Monitoring Results of the Effectiveness of Surge Arrester Spacing on Distribution Line Protection," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, July 1999, pp. 1142-1150.
13. J.He, S. Gu, S.Chen, R. Zeng and W. Chen "Discussion on

Measures Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, April 2008, pp. 693-702.

14. Воздушные линии с защищенными проводами: способы грозозащиты. Новости электротехники, 2008, №4 (52); №5 (53).

Приложение 1

Параметры для сравнения	РДИП-10-IV-УХЛ1	РДИП1-10-IV-УХЛ1	РДИШ-10-IV-УХЛ1	РДИМ-10-1.5-IV-УХЛ1
	Технология	РДИ	РДИ	РДИ
Гашение	В нуле	В нуле	В нуле	В нуле
Защита от индуктированного перенапряжения (ИП)	да	да	да	да
Защита от прямого удара молнии (ПУМ)	нет	нет	нет	да
Разрушение при воздействии ПУМ	нет	нет	нет	нет
Наличие и тип зажима на проводе	ВЛЗ прокусывающий	нет	есть прокусывающий	есть прокусывающий
	ВЛ	есть	нет	есть
Наличие индикатора срабатывания	нет	нет	нет	нет
Организация искрового воздушного промежутка	с помощью зажима	с помощью электрода	с помощью электрода	без воздушного промежутка
Область применения	защита ВЛ от индуктированных ПН и их последствий	защита ВЛ от индуктированных ПН и их последствий	защита ВЛ от индуктированных ПН и их последствий	защита ВЛ и подходов к ПС от ПУМ и их последствий
Класс напряжения ВЛ, кВ	6-10	6-10	6-10	6-10
Ограничения по току КЗ, кА	0,6	0,6	0,6	1,5
Способ установки	с чередованием фаз	с чередованием фаз	с чередованием фаз	на каждую фазу
Особенности монтажа / эксплуатации	Штыревая, подвесная и натяжная изоляция	Штыревая, подвесная и натяжная изоляция. Смещение провода не влияет на работу разрядника	Штыревая изоляция. Двойное крепление провода, характерное для населенной местности, переходов через автодороги	Штыревая, подвесная и натяжная изоляция
Текущий статус продукта	серия	серия	серия	серия

* *газит исключительно емкостной ток, величина которого составляет не более 10 А (характеристика ВЛ)*

** *ожидаемый ток короткого замыкания, который бы протекал в месте установки разрядника при его отсутствии*

Наименование разрядника					
РДИМ-10-К-II-УХЛ1	РМК-10-IV-УХЛ1	РМК-20-IV-УХЛ1	РМК-10-И	РМКЭ-35- IV-О1	ГИРМК-35 на базе ИРМК-10
РДИ	МКС	МКС	МКС	МКС	МКС
В нуле	В нуле	В нуле	В импульсе	В нуле	В нуле
да	да	да	да	да	да
нет	нет	нет	нет	да	да
нет	нет	нет	нет	нет	нет
есть прокусывающий	есть прокусывающий	есть прокусывающий	нет	нет	не нужен
есть	есть	есть	нет	нет	не нужен
нет	есть	есть	есть, встроенный	есть, встроенный	есть, встроенный
без воздушного промежутка	с помощью зажима	с помощью зажима	с помощью электрода	с помощью электрода	с помощью электрода
компактные линии; защита от индуцированных ПН	защита ВЛ от индуцированных ПН и их последствий	защита ВЛ от индуцированных ПН и их последствий	защита ВЛ с большими токами КЗ (глухозаземленная нейтраль) от индуцированных ПН и их последствий	защита от ПУМ и их последствий	защита от ПУМ и их последствий
6-10	6-10	6-20	6-10	35	35
_*	0,7	1,5	20**	3,5	2,5
только на среднюю фазу	с чередованием фаз	с чередованием фаз	с чередованием фаз	на каждую фазу	на каждую фазу
Только для компактных линий, изоляторы ШФ-20 и аналоги	Штыревая, подвесная и натяжная изоляция	Штыревая, подвесная и натяжная изоляция. Возможен монтаж под напряжением	Штыревая, подвесная и натяжная изоляция	В случае натяжной изоляции необходим монтаж в шлейф с дополнительной гирляндой изоляторов	Устанавливается вместо подвесной изоляции. В случае натяжной изоляции необходим монтаж в шлейф
серия	серия	серия	ОПЭ	серия	ОПЭ

