

* * *

Мультикамерные разрядники нового типа¹

ПОДПОРКИН Г.В., ЕНЬКИН Е.Ю., ПИЛЬЩИКОВ В.Е.

Приведены результаты разработки мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников нового типа, обеспечивающих гашение дуги грозового перекрытия без сопровождающего тока сети. Эти устройства позволяют обеспечить грозозащиту ВЛ 10–220 кВ и выше от индуктированных перенапряжений и прямых ударов молнии без использования грозозащитного троса и могут применяться в сетях с большими токами КЗ, порядка 30 кА.

Ключевые слова: возбужденные линии электропередачи, грозозащита, разрядники мультикамерные, изоляторы-разрядники, гашение дуги

Для защиты воздушных линий электропередачи от грозовых перенапряжений в [1] предложены мультикамерные системы (МКС), разрядники (РМК) и изоляторы-разрядники (ИРМК). Как показали проведенные исследования, в разрядниках с МКС возможны два типа гашения дуги:

при переходе сопровождающего тока 50 Гц через нуль (в дальнейшем такой тип гашения называется «гашением в нуле»);

при снижении мгновенного значения импульса грозового перенапряжения до напряжения про-

Results from the development of new types of multichamber arresters and insulator-arresters using which a lightning flashover arc can be extinguished without the accompanying network current are presented. The application of these devices allows 150–220 kV overhead power lines to be protected from lightning-induced overvoltages and from direct lightning strokes without using an earth conductor; the new devices can be used in networks with high short-circuit currents (around 30 kA).

Key words: overhead power lines, lightning protection, arresters, insulators, arc extinguishing

мышленной частоты, т.е. без сопровождающего тока сети (в дальнейшем такой тип гашения называется «гашением в импульсе»).

К настоящему времени разработана МКС для сетей с токами короткого замыкания (КЗ) до 10 кА [2]. При больших токах КЗ гашение в нуле приводит к эрозии электродов и газоразрядных камер. Поэтому целесообразно разработать МКС, обеспечивающую гашение в импульсе, при котором эрозия электродов незначительна. Разрядники, а также изоляторы-разрядники с новой МКС могут использоваться в сетях с большими токами КЗ.

Принцип действия МКС нового типа. Для повышения эффективности гашения сопровождающего

¹ Статья написана по результатам работы, проведенной при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК 16.526.12.6006 от 13 мая 2011 г.).

тока предлагается многократное (в 4–20 раз) увеличение длины элементарного промежутка (в одной разрядной камере) по сравнению с МКС, описанными в [1]. Низкое разрядное напряжение МКС нового типа может быть обеспечено благодаря двум эффектам: скользящего разряда и каскадности срабатывания камер в цепочке МКС (см. рис. 1).

Известна слабая зависимость разрядного напряжения скользящим разрядом от расстояния между электродами, т.е. весьма большое расстояние может быть перекрыто при относительно небольшом напряжении (см., например, [3]).

Каскадность создаётся за счёт влияния дополнительного электрода, устанавливаемого вдоль всей МКС (рис. 1). Этот электрод соединен с последним электродом последней камеры и изолирован от всех остальных электродов. Он имеет нулевой потенциал (соединен с землей). При срабаты-

вании МКС высокий потенциал U подается на первый электрод. Напряжение по искровым разрядным промежуткам камер распределяется в соответствии с принципиальной схемой (рис. 1,б) весьма неравномерно. Оценим значение напряжения между электродами в первой камере. Вся емкостная схема рис. 1,б может быть представлена как цепочка из двух емкостей (см. рис. 1,в): емкости между первым и вторым электродами C_1 и эквивалентной емкости $C_{\text{ЭКВ}}$ на землю всей остальной (кроме C_1) цепочки емкостей. Причем $C_{\text{ЭКВ}}$ в основном определяется емкостью электрода камеры на дополнительный электрод C_0 т.е. $C_{\text{ЭКВ}} \gg C_0$.

Емкости C_1 и C_0 соединены последовательно (см. рис. 1,в). Напряжение на них распределяется обратно пропорционально их значениям, и напряжение между электродами первой камеры

$$U_1 \gg U / (1 + C_1 / C_0).$$

Благодаря относительно большой площади поверхности электрода камеры, обращенной в сторону дополнительного электрода, а также вследствие того, что диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика ϵ значительно выше, чем диэлектрическая проницаемость воздуха ϵ_0 (обычно $\epsilon/\epsilon_0 \gg 2, 3$), емкость промежуточного электрода на дополнительный электрод (т.е. емкость этого промежуточного электрода на землю) существенно больше, чем его емкость на соседний промежуточный электрод, т.е. $C_0 > C_1$ и, соответственно, $C_1 / C_0 < 1$. При значениях отношения C_1 / C_0 , лежащих в диапазоне от 0,1 до 0,9, напряжение $U_1 = (0,91, 0,53)U$. Поэтому при воздействии напряжения U на МКС основная часть (по меньшей мере, более половины) падения напряжения приходится на первый искровой промежуток 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.

Основные конструктивные решения. Было предложено и исследовано большое число прототипов МКС. В статье приводятся лишь наиболее интересные варианты, изготовленные методом горячего прессования силиконовой резины. Камеры разрабатывались в соответствии с принципами, изложенными ранее, т.е. длина единичных искровых промежутков в камерах составляла от 8 до 20 мм, а

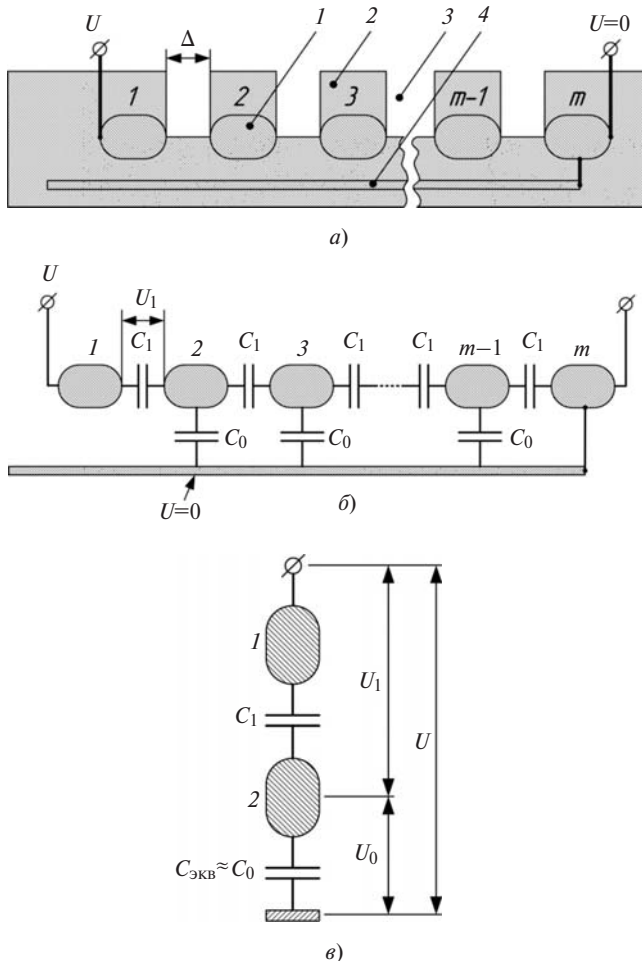


Рис. 1. Иллюстрация принципа каскадности срабатывания МКС: а – эскиз МКС; б – принципиальная электрическая схема МКС; в – то же одной камеры: 1 – электроды МКС; 2 – профиль из силиконовой резины; 3 – газоразрядные камеры; 4 – дополнительный электрод; Δ – длина разрядного промежутка камеры; C_0 – ёмкость 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 снижения разрядных напряжений образцов МКС использовались эффекты скользящего разряда и/или каскадности срабатывания камер.

На рис. 2 показан вариант выполнения МКС с электродами в виде отрезков трубки из нержавеющей стали и дополнительным электродом в виде кабеля, проходящим внутри этих электродов, причем длина разрядного промежутка дополнительно увеличена за счет диагонального (косого) расположения разрядной щели. Благодаря такой конструкции обеспечивается большая компактность МКС, а кроме того, в этом случае емкость электродов на дополнительный электрод (кабель) C_0 значительно больше, чем емкость между электродами одной газоразрядной камеры C_1 , что приводит к еще большей, чем в других вариантах МКС, неравномерности распределения напряжения по камерам и, соответственно, к низким разрядным напряжениям.

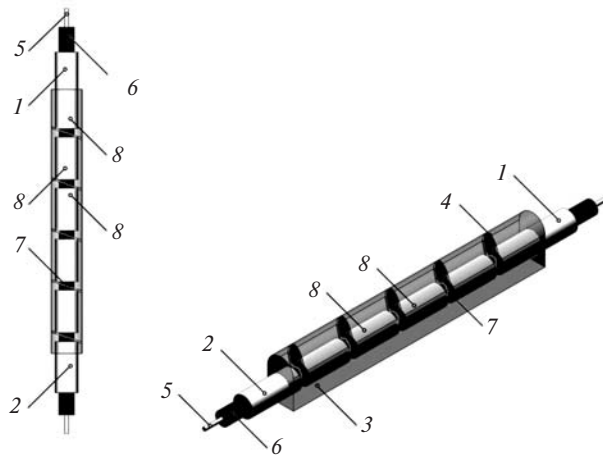


Рис. 2. Эскиз МКС с дополнительным электродом (кабелем), проходящим через трубчатые основные электроды, и косыми разрядными щелями: 1 – высоковольтный электрод; 2 – низковольтный электрод; 3 – тело МКС из силиконовой резины; 4 – разрядная щель; 5 – дополнительный электрод (жила кабеля); 6 – изоляция кабеля; 7 – канал разряда; 8 – электроды камер

Эти МКС (рис. 2) предназначены для применения в разрядниках для защиты от индуктированных перенапряжений.

На рис. 3 приведен эскиз газоразрядной камеры, предназначенной для разрядников, защищающих ВЛ от прямых ударов молнии. Разрядная камера механически усилена стеклопластиковой трубкой.

Мультикамерные разрядники и изолятор-разрядник нового типа. На рис. 4 приведен РМК для защиты ВЛ 10 кВ от индуктированных перенапряжений (РМК 10-И). У этого разрядника МКС содержит 10 камер и выполнена в соответствии с рис. 2. Для исключения перекрытия между плазменными образованиями, вылетающими из камер при срабатывании разрядника, камеры поочередно направ-

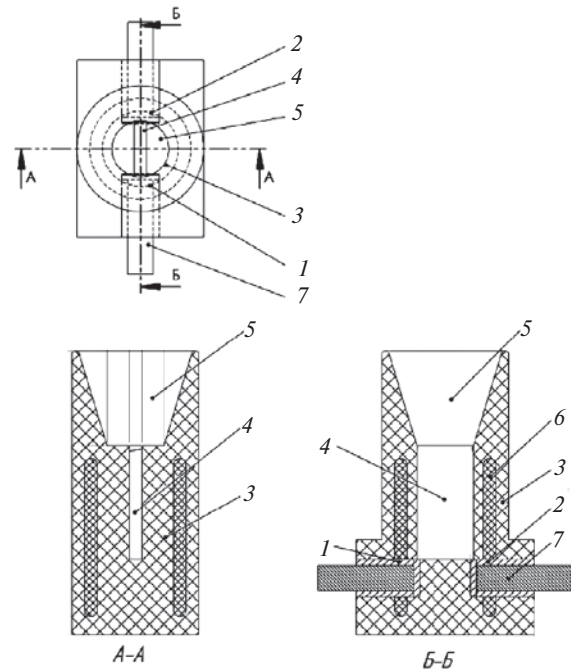


Рис. 3. Эскиз одиночной газоразрядной камеры со стеклопластиковой трубкой, усиливающей камеру: 1 – первый электрод; 2 – второй электрод; 3 – тело камеры из силиконовой резины; 4 – разрядная щель; 5 – направляющая трубка; 6 – стеклопластиковая трубка; 7 – проводник, соединяющий камеры

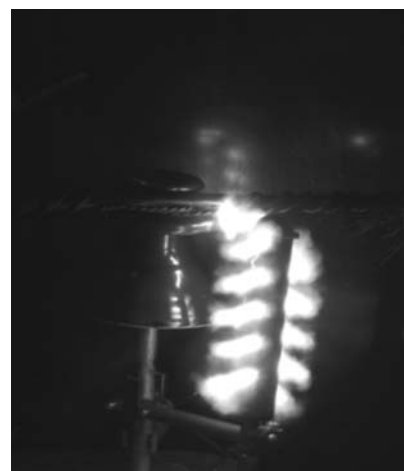
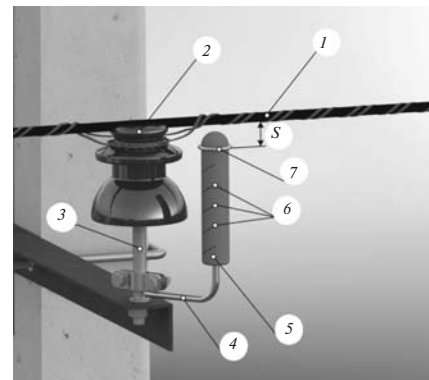


Рис. 4. Общий вид РМК10-И (а) и при испытаниях (б): 1 – провод; 2 – изолятор ШФ10-Г; 3 – штырь; 4 – кронштейн; 5 – тело разрядника; 6 – разрядные камеры; 7 – электрод; 5 – разрядный промежуток

лены в противоположные стороны, т.е. пять нечетных камер направлены в одну сторону, а пять четных — в противоположную.

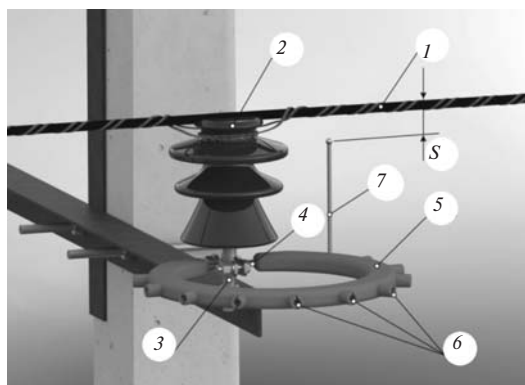
Устанавливать РМК10-И следует так же, как длинноискровой разрядник петлевого типа РДИП, т.е. по одному разряднику на опору с чередованием фаз [3].

Разрядник РМК10-И обеспечивает гашение разрядов от импульсов индуцированных перенапряжений без сопровождающего тока. Эрозия провода от протекания импульса тока индуцированного перенапряжения с амплитудой порядка 1 кА и длительностью 2—3 мкс незначительна [4], что позволяет отказаться от установки «прокусывающих» зажимов на проводах (как защищенных, так и незащищенных).

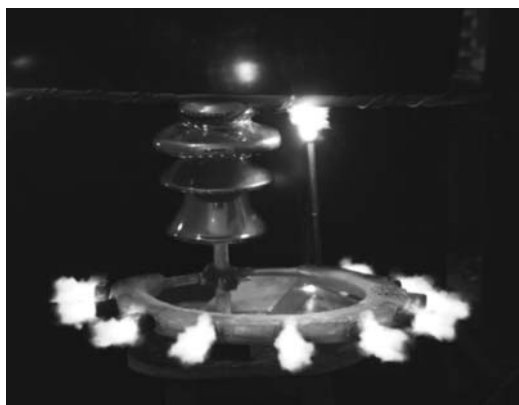
На рис. 5 приведен прототип РМК для защиты ВЛ 10 кВ от прямых ударов молнии (РМК10-П). МКС этого разрядника содержит 10 камер, выполненных в соответствии с рис. 3.

При воздействии на провод грозового перенапряжения пробивается разрядный промежуток S между проводом и подводящим электродом, а затем срабатывает МКС.

Для защиты от прямого удара молнии устанавливается РМК10-П следует на все фазы на опоре, т.е.



а)



б)

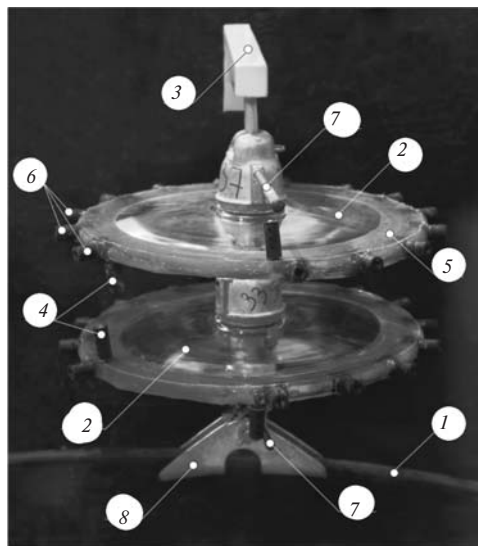
Рис. 5. Общий вид РМК10-П (а) и при испытаниях (б): 1 — провод; 2 — изолятор ШФ20-Г; 3 — штырь; 4 — несущее кольцо из стального прутка; 5 — тело разрядника; 6 — разрядные камеры; 7 — электрод; S — разрядный промежуток

так же, как длинноискровые разрядники модульного типа РДИМ-1,5 [5].

Основные достоинства РМК10-И и РМК10-П: малые габариты и вес; удобство установки, в том числе — под напряжением; отсутствие зажима на проводе; неизменный воздушный промежуток при проскальзывании провода.

На рис. 6 показана гирлянда из двух прототипов ИРМК на основе изолятора U120AD. Изоляторы-разрядники собираются в гирлянды (ГИРМК) и предназначены для защиты ВЛ 35—220 кВ и выше от прямых ударов молнии. МКС изолятора-разрядника содержит 14 камер, выполненных в соответствии с рис. 3.

При воздействии грозового перенапряжения на провод пробиваются воздушные промежутки между электродами и соответствующими отводами, а также между отводами соседних изоляторов, а затем срабатывает вся МКС.



а)



б)

Рис. 6. Общий вид гирлянды из двух прототипов ИРМК на основе изолятора U120AD (а) и при испытаниях (б): 1 — провод; 2 — изолятор U120AD; 3 — траверса; 4 — отводы; 5 — тело разрядника; 6 — разрядные камеры; 7 — электроды

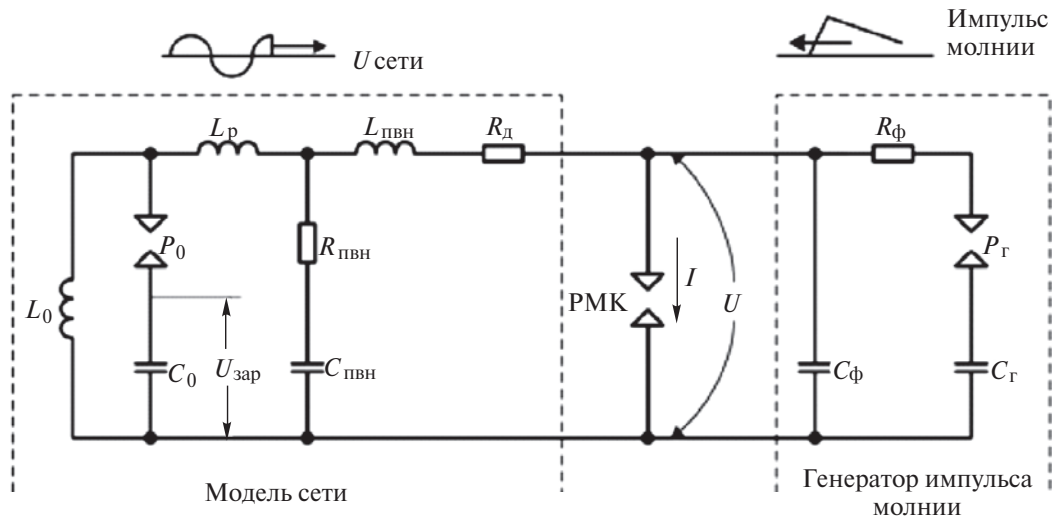


Рис. 7. Принципиальная схема установки

Основные результаты испытаний на гашение импульсной дуги. Принципиальная испытательная схема представлена на рис. 7. Схема содержит:

модель сети ($f = 50$ Гц) с параметрами: $C_0 = 350$ мкФ – емкость колебательного контура; $L_0 = 22$ мГн – индуктивность колебательного контура; $L_p = 11$ мГн – индуктивность; $L_{пвн} = 1$ мГн, $R_{пвн}$, $C_{пвн}$ – индуктивность, сопротивление, емкость, определяющие ПВН; $R_d = 1, 10$ Ом – добавочное сопротивление; P_0 – искровой разрядный промежуток модели сети;

генератор импульса молнии ($I_M = 30$ кА, 8/50 мкс) с параметрами: $C_T = 0,02 - 6,5$ мкФ – емкость ГИН/ГИТ; $R_f = 5, 100$ Ом – фронтовое сопротивление; $C_f = 4500$ пФ – фронтовая емкость; P_T – суммарный искровой разрядный промежуток ГИН; РМК – разрядник мультикамерный.

Испытания на гашение сопровождающего тока проводились по методике [1] в трех режимах:

индуцированных перенапряжений ($C_T = 0,02$ мкФ – емкость генератора импульсов напряжения и тока (ГИН-ГИТ) в ударе; импульсный ток, $I_{max} \gg 2,5$ кА; 1/2 мкс);

перенапряжений при обратных перекрытиях ($C_T = 0,5$ мкФ; импульсный ток $I_{max} \gg 2,5$ кА; 1,2/50 мкс);

перенапряжений при прямом ударе молнии ($C_T = 6,5$ мкФ; импульсный ток $I_{max} \gg 30$ кА; 8/50 мкс).

Отрицательно заряженные молнии составляют примерно 90% общего числа молний. Поэтому полярность импульса, моделирующего импульс грозового перенапряжения, принималась отрицательной. Молния может ударить при любом мгновенном значении напряжения сети.

Наиболее неблагоприятным является случай удара отрицательной молнии в провод линии при отрицательном мгновенном напряжении сети. При

этом общий ток через разрядник, состоящий из тока импульса перенапряжения и сопровождающего тока сети, стремится перейти в ток КЗ сети, не переходя через нуль. Поэтому при испытаниях основное внимание уделялось именно такому соотношению полярностей импульса перенапряжения и сети (- / -). Однако при обратных перекрытиях, т.е. при ударе отрицательно заряженной молнии в опору, наиболее вероятным является перекрытие гирлянды той фазы, на которой мгновенное напряжение положительно. Поэтому для этого случая использовалось соотношение полярностей (- / +).

Модель сети должна воспроизводить условия работы разрядника при токе КЗ $I_{кз} = 30$ кА(д). Амплитудное значение составляет $I_{кз}^* = 30\sqrt{2} = 42,4$ кА(а). Проведенные исследования показали, что вопрос о форме гашения сопровождающего тока (в импульсе или в нуле) решается вблизи момента времени $t = 100$ мкс.

При синусоидальной форме тока частотой 50 Гц в этот момент мгновенное значение тока равно $i = I_{кз}^* \sin(\omega t) = 42,4 \sin(314 \times 100 \times 10^{-6}) \gg 1,3$ кА. Поэтому модель сети была настроена таким образом, чтобы обеспечить практически линейное нарастание тока от нуля до 1,3 кА за время 100 мкс.

Основные результаты испытаний приведены в таблице. Как видно из таблицы, РМК10-И и РМК10-П обеспечивают гашение разряда без сопровождающего тока при фазном напряжении $U_\phi = 8,5$ кВ(д) (действующее значение). При грозовых перенапряжениях срабатывают два разрядника, установленные на разных фазах ВЛ [1]. Таким образом, эти разрядники способны успешно работать при напряжении между фазами (т.е. при линейном напряжении) $U_L = 8,5 + 8,5 = 17$ кВ(д). Для ВЛ 10 кВ наибольшее рабочее линейное напряжение составляет $U_{л.нб} = 12$ кВ(д), т.е. существенно меньше, чем напряжение гашения двух разрядников. Поэто-

Тип разрядника	Число камер m	Импульс тока		Тип перенапряжений	Соотношение полярностей	Напряжение, кВ	
		I_{max} , кА	длительность, мкс			$U_{\text{зар}}$	$U_{\text{гаш}}$
РМК10-И (рис. 4)	10	2,5	1/2	Индуктированные	- /-	12	8,5
РМК10-П (рис. 5)	10	30	8/50	Прямой удар молнии	- /-	12	8,5
ГИРМК: 2xU120AD (рис. 6)	12 · 4	2,5	1,2/50	Обратные перекрытия	- /+	30	21
		30	8/50	Прямой удар молнии	- /-	30	21

Примечание. $U_{\text{зар}}$ – зарядное напряжение конденсаторов блока сети; $U_{\text{гаш}} = U/\sqrt{2}$ – соответствующее действующее фазное напряжение сети.

му по условию гашения тока грозового перенапряжения РМК10-И и РМК10-П пригодны для грозозащиты ВЛ 10 кВ.

Для ВЛ 220 кВ наибольшее допустимое фазное напряжение составляет $U_{\text{ф.нб}} = 146$ кВ(д). Как видно из таблицы, ГИРМК из двух изоляторов обеспечивает гашение при $U_{2\text{из}} = 21$ кВ(д). При 14 изоляторах в гирлянде можно рассчитывать, что ГИРМК обеспечит гашение при $U_{14\text{из}} = 7 \cdot 21 = 147$ кВ(д). Таким образом, ГИРМК из 14 изоляторов способна обеспечить гашение дуги импульса грозового перекрытия без сопровождающего тока.

На рис. 8 приведены экспериментальные осциллограммы напряжения и тока, полученные при испытаниях ГИРМК из двух изоляторов. Для наглядности осциллограммы напряжения и тока, полученные при отрицательной полярности импульсов, перестроены в абсолютных значениях. Кроме того, на рис. 8 приведена зависимость сопротивления канала разряда от времени, полученная по формуле $r_k = u/i$ путем компьютерной обработки цифровых осциллограмм напряжения и тока. Как видно из рис. 8, сопротивление канала лежит в диапазоне от 0,5 до 1 Ом.

Во время протекания импульса тока (примерно до его максимального значения) падение напряжения на гирлянде из двух ИРМК весьма значительное, порядка $DU_2 \approx 20$ кВ. При 14 изоляторах в гирлянде падение напряжения будет в 7 раз больше: $DU_{14} \approx 7 \cdot 20 \approx 140$ кВ. Номинальное фазное амплитудное значение напряжения ВЛ 220 кВ составляет $U_{\text{ф.ном}}^* = 220\sqrt{2}/\sqrt{3} = 179$ кВ(а). Таким образом, видно, что напряжение на ГИРМК не срезается до нуля, а остается на уровне $140/179 \approx 0,8$ амплитудного фазного. Поэтому ток от сети (при соотношении полярностей импульса грозового перенапряжения и сети - /-) в разрядник практически просто не идет, так как падение напряжения на нем почти такое же, как напряжение сети. Поэтому ГИРМК гасит ток грозового перенапряжения без сопровождающего тока и может применяться в сетях с большими токами КЗ.

На рис. 9 приведена вольт-амперная характеристика, построенная также методом компьютерной обработки осциллограмм напряжения и тока рис. 8. ВАХ четко разбивается на четыре области: I-я — восходящая ветвь, характерная для искрово-

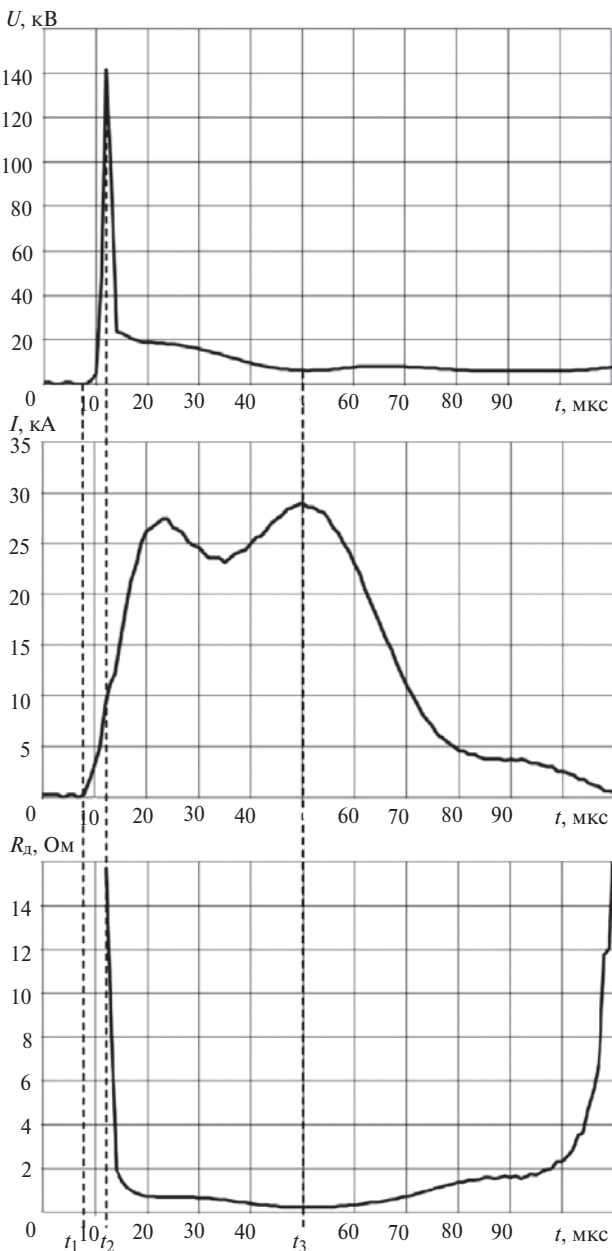


Рис. 8. Осциллограммы напряжения, тока и сопротивления для ГИРМК-2; испытание в режиме прямого удара молнии; зарядное напряжение сети $U_{\text{зар}} = 20$ кВ; t_1 – начало импульса напряжения; t_2 – время достижения максимума напряжения; t_3 – время, соответствующее максимуму тока

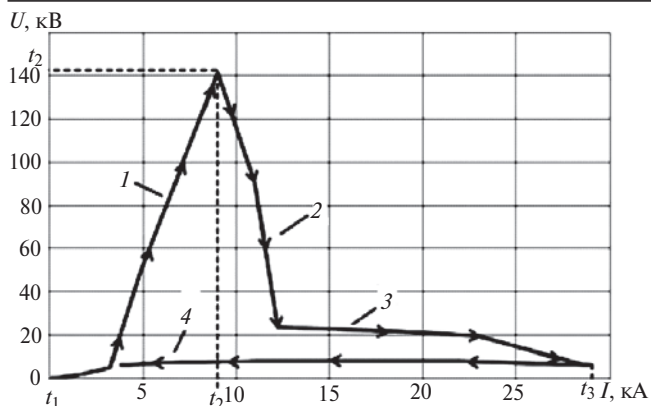


Рис. 9. Зависимость напряжения от тока ГИРМК-1: 1 – искровой разряд; 2 – установление дуги; 3, 4 – дуговой разряд

го разряда; 2-я – падающий участок, характерный для формирующейся дуги; 3-я и 4-я – участки, на которых напряжение слабо зависит от тока, характерные для установившегося дугового разряда.

Выводы. 1. Разработанные мультикамерные системы, обеспечивают гашение дуги импульса грозового перенапряжения без сопровождающего тока сети, что позволяет применять разрядники на их основе в сетях с большими токами короткого замыкания (порядка 30 кА).

2. Предложенные конструкции мультикамерных разрядников на 10 кВ для защиты от индуктированных перенапряжений РМК10-И и от прямых ударов молнии РМК10-П характеризуются:

малыми габаритами и весом;

удобной установкой, в том числе – под напряжением;

отсутствием зажима на проводе;

неизменностью воздушного промежутка при проскальзывании провода.

3. Гирлянда из 14 изоляторов-разрядников новой конструкции на основе тарельчатого изолятора для ВЛ 220 кВ способна обеспечить гашение раз-

ряда грозового перекрытия без сопровождающего тока в сетях с токами короткого замыкания порядка 30 кА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Калакутский Е.С. и др. Грозозащита ВЛ 10–35 кВ и выше с помощью мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников. – Электричество, 2010, № 10.

2. Подпоркин Г.В. О разработке мультикамерных изоляторов-разрядников для ВЛ 220 кВ без грозозащитного троса. – Энергетик, 2010, № 12.

3. Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д. Новая грозозащита линий электропередачи с помощью длинноискровых разрядников. – Энергетик, 2010, № 3.

4. Chisholm W.A. New Challenges in Lightning Impulse Flashover Modeling of Air Gaps and Insulators. – IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, March/April, vol. 26, № 2.

5. Подпоркин Г.В., Пильщиков В.Е., Сиваев А.Д. Грозозащита воздушных линий 10 кВ длинноискровыми разрядниками модульного типа. – Электричество, 2002, № 4.

[17.05.12]

Авторы: Подпоркин Георгий Викторович окончил в 1973 г. электромеханический факультет (ЭМФ) Ленинградского политехнического института (ЛПИ). В 1990 г. защитил докторскую диссертацию по воздушным линиям электропередачи повышенной пропускной способности в ЛПИ. Научный руководитель ОАО «НПО Стример».

Енькин Евгений Юрьевич окончил в 2007 г. электромеханический факультет Петербургского государственного университета путей сообщения. Инженер ОАО «НПО Стример».

Пильщиков Владимир Евсеевич окончил в 1973 г. ЭМФ ЛПИ. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование методов повышения срока службы и надежности высоковольтных импульсных кабелей» в ЛПИ. Старший научный сотрудник кафедры «Электрические и электронные аппараты» СПбГТУ.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).