

Разработка мультикамерного разрядника экранного типа для молниезащиты ВЛ 35 кВ.

Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Житенёв В.В., Зайналов Р.И.
Пильщиков В.Е., Белько Д.О.

Введение

Для обеспечения молниезащиты ВЛ 35-220 кВ разработаны мультикамерные изоляторы-разрядники (ИРМК) [1], устанавливаемые взамен существующей подвесной изоляции. Однако, в ряде случаев замена изоляции может оказаться нецелесообразной или затруднительной. В этом свете стала актуальной задача разработки мультикамерных разрядников (РМК) для молниезащиты ВЛ, которые будут устанавливаться параллельно защищаемой изоляции, не требуя её замены.

Основным рабочим элементом как ИРМК, так и разрабатываемых РМК является мультикамерная система (МКС) (рис. 1). Она состоит из большого числа электродов, интегрированных в профиль из силиконовой резины. Между смежными электродами МКС отформованы цилиндрические дугогасящие камеры специально подобранной конфигурации, внутри которых образованы искровые промежутки.

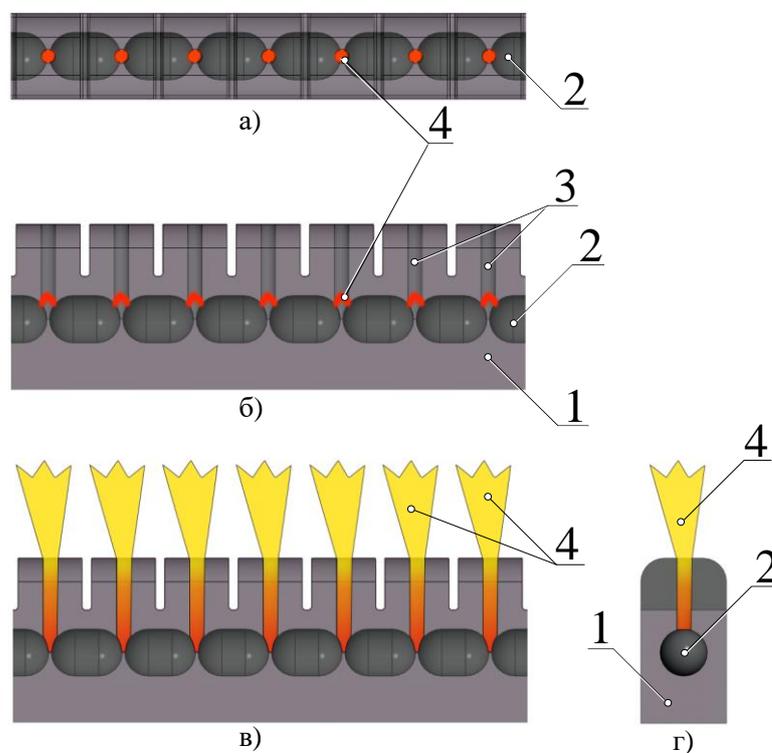


Рис. 1. Фрагмент мультикамерной системы:

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 – дугогасящие камеры; 4 – канал разряда.

Разрядник состоит из двух частей, напоминающих тороидальные экраны (для краткости, будем называть их «экранами») (см. рис. 2), поэтому разрядник получил название РМК экранного типа для ВЛ 35 кВ (РМКЭ-35).

МКС устанавливаются на несущем обруче из изоляционного материала, которые при помощи изоляционных штанг (спиц) закрепляются на арматуре верхнего и нижнего конца гирлянды изоляторов.

Верхний экран устанавливается на серьгу гирлянды, нижний – на ушко. Взаимная ориентация выбирается исходя из обеспечения требуемой величины искрового промежутка (ИП) между промежуточными отводами. Основание экранов выполнено из изоляционного материала и совмещается с МКС методом вулканизации в пресс-форме, что в результате создаёт единую монолитную конструкцию.

Первый конец МКС (1) нижнего экрана через ИП (10) и арматуру гирлянды соединён с проводом (7) ВЛ, а второй конец МКС (1) снабжён стержневым отводом (4), направленным вверх.

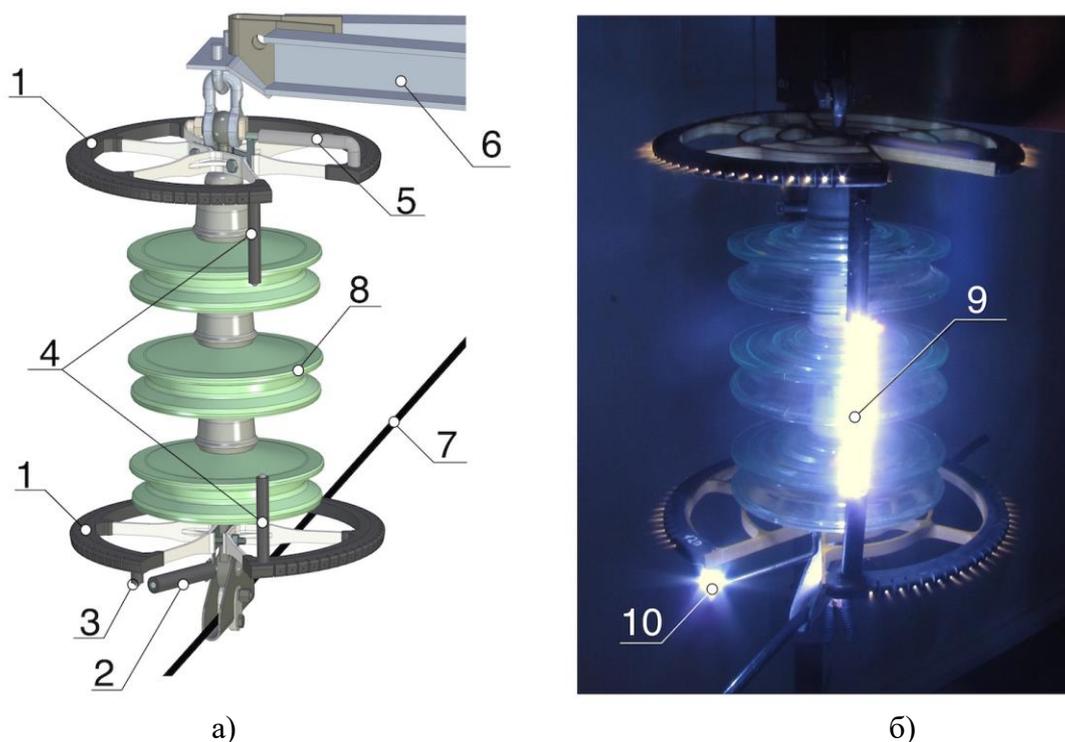


Рис. 2. РМК-Э- 35: а) общий вид; б) фотография испытаний:

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 - искровые промежутки.

Первый конец МКС (1) верхнего экрана снабжён стержневым отводом (4), направленным вниз, а второй конец МКС (1) при помощи металлической штанги (5) и арматуры гирлянды соединён с опорой (6) ВЛ.

При воздействии перенапряжения на ВЛ, например при прямом ударе молнии (ПУМ) в провод (7), срабатывает ИП (10) между арматурой и концом МКС (3) нижнего экрана, а также ИП (9) между стержневыми электродами (4) нижнего и верхнего экранов, и их МКС (1). Ток молниевое перенапряжения протекает от провода (7) через ИП (10) нижнего экрана, далее – по МКС (1) этого экрана, по ИП (9) между промежуточными отводами (4), по МКС (1) верхнего экрана, по его металлической штанге (5), по опоре (6) и уходит в землю (рис. 2б).

Внутри сработавшей от импульса грозового перенапряжения МКС происходит последовательный пробой искровых промежутков в каждой из дугогасящих камер с образованием проводящих плазменных каналов (рис. 1 а,б). В дальнейшем под действием приложенного напряжения сети в камерах начинает нарастать ток, что приводит к разогреву канала дуги, увеличению его диаметра и как следствие повышению давления внутри камер с выносом дуги из разрядного промежутка (рис. 1в,г). Истечение дуги приводит к её удлинению, перемещению в холодном воздухе, охлаждению и увеличению электрического сопротивления канала.

Контакт дуги со стенками камер вызывает испарение силиконовой резины (абляцию), что помимо увеличения давления модифицирует химический состав разряда. Силиконовая резина $(C_2H_6SiO)_n$ при испарении добавляет в него компоненты с высокой энергией ионизации (например, для водорода H 13,6 эВ), понижая тем самым проводимость разрядного канала.

Влияние всех этих факторов, приводит к восстановлению электрической прочности разрядных промежутков в камерах МКС при прохождении сопровождающего тока через ноль и препятствует повторному зажиганию дуги, тем самым помогая ВЛ продолжить свою бесперебойную работу.

Стоит заметить, что способность дугогасительных камер выводить дугу за пределы МКС позволяет обеспечить рассеивание большей части энергии протекающих токов в окружающем пространстве. Это делает конструкцию МКС устойчивой к электродинамическим и термическим воздействиям импульсного тока ПУМ и дуги сопровождающего тока.

Общая постановка задачи.

В разработке РМКЭ-35 необходимо было решить ряд электротехнических и конструкторских задач. Электрические характеристики разрядника должны обеспечивать надёжную координацию срабатывания с защищаемой изоляцией,

а также позволять ему осуществлять гашение дуги сопровождающего тока при любом молниевом воздействии включая ПУМ в фазный провод. Разрядник должен быть устойчив к длительным климатическим воздействиям (температуре, влажности, солнечной радиации, пыли), а также к механическим воздействиям ветровых и гололёдных нагрузок в условиях низких температур окружающей среды.

Для подтверждения соответствия РМКЭ-35 требуемым характеристикам разработана программа испытаний в которую вошли основные электрические, механические и климатические испытания (табл. 1).

Таблица 1. Программа испытаний РМКЭ-35.

№	Виды проверок и испытаний
Электрические испытания	
1	Проверка координации срабатывания разрядника с изоляцией в сухом состоянии и под дождём при воздействии импульсов напряжения с крутым фронтом.
2	Испытания выдерживаемым напряжением промышленной частоты в сухом состоянии и под дождём.
3	Определение 50% разрядных характеристик при воздействии грозовых импульсов стандартной формы 1,2/50 мкс
4	Испытание на отключающую способность
5	Измерение уровня промышленных радиопомех.
Климатические испытания	
6	Воздействие смены температур среды с приложением нагрузки
7	Воздействие соляного тумана
9	Динамическое воздействие пыли
Механические испытания	
10	Испытание на вибропрочность

Диаметр экрана РМКЭ-35 выбирался из условия размещения на нём необходимого числа дугогасительных камер МКС, способных обеспечить стабильное гашение дуги сопровождающего тока при заданном значении приложенного напряжения сети.

РМКЭ-35 предназначен для молниезащиты ВЛ 35 кВ с изолированной нейтралью. В этом случае рассматривался только случай междуфазных к.з. Перенапряжение, возникшее на проводах ВЛ 35 кВ под действием разряда молнии, может привести к срабатыванию двух РМКЭ-35 разных фаз. Наибольшее действующее значение рабочего линейного напряжения сети 35 кВ составляет $U_{н.р.л.} = 35 \times 1,15 = 40,3$ кВ. Оно делится поровну между двумя разрядниками. Поэтому каждый РМКЭ-35 должен обеспечить гашение дуги сопровождающего тока при действующем значении приложенного напряжения 20,2 кВ.

Величина ИП между отводами экранов (см. рис. 2) должна обеспечивать защиту изоляции путём обеспечения координированного срабатывания разрядника при импульсном воздействии, а также позволить сохранить нормированную электрическую прочность изоляции в нормальных эксплуатационных условиях.

Испытания на отключающую способность.

Испытания на отключающую способность проводились на высоковольтном стенде, представляющим собой параллельно работающие генератор импульсных напряжений и токов (ГИНТ), имитирующий импульс молнии, и генератор, имитирующий ток сети промышленной частоты (рис.3). Параметры генератора молнии – амплитудное значение напряжения 300, кВ тока — до 30 кА, длительность импульса тока до полуспада 50 мкс. Генератор сети имеет амплитуду напряжения до 30 кВ с сопровождающим током до 5 кА (3,5 кА_д действующего значения).

При ПУМ в фазный провод ток молнии разделяется на две части, растекающиеся в противоположные стороны от места удара. В зависимости от величины тока молнии и сопротивление заземления опор совместно с перекрытием разрядников на ближайших к месту удара опорах, могут так же сработать разрядники на последующих. Проведённые в [2] расчеты показали, что при токах молнии меньших 100 кА, которые бывают в 95% случаев, ток через разрядник не превышает 30 кА.

Испытания на отключающую способность проведены в трёх режимах с различными амплитудами импульсных токов:

- большого импульсного тока ПУМ 30 кА с $t = 8/50$ мкс;

- малого импульсного тока ПУМ 10 кА с $t = 8/50$ мкс;
- режим обратных перекрытий 2,5 кА с $t = 1/50$ мкс.

К каждому разряднику одновременно прикладывались импульсный ток и напряжение сети промышленной частоты с действующим значением – 20,5 кВ (29 кВ в амплитудном значении). Измерительной аппаратурой фиксировался результат – гашение или негашение дуги сопровождающего тока.

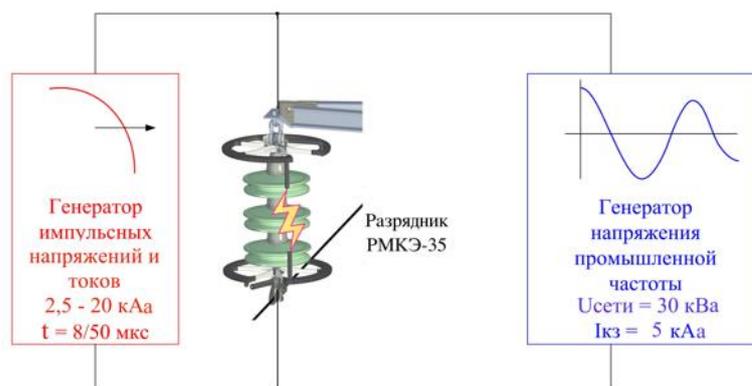


Рис. 3. Блок-схема испытательного стенда.

Каждый из 6 испытанных РМКЭ-35 показал уверенное гашений дуги сопровождающего тока в нуле (рис. 4) при всех вариантах воздействий импульсного тока с сохранением механической целостности МКС.

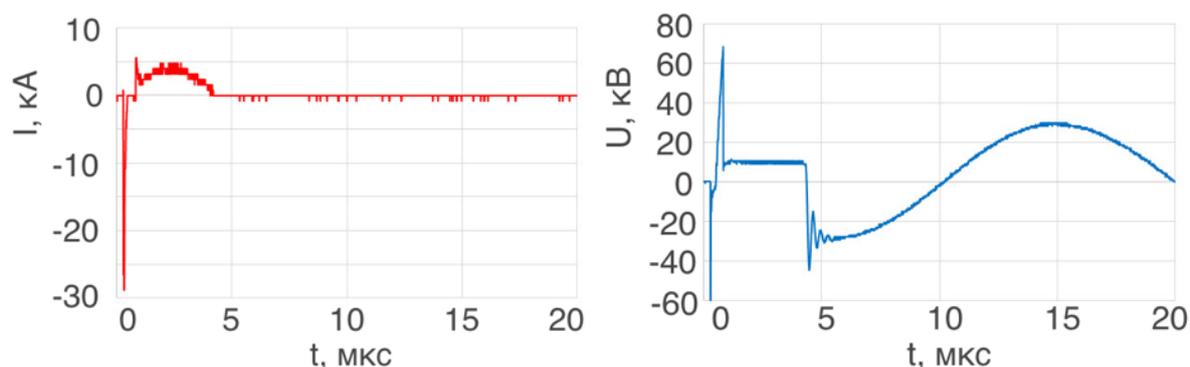


Рис. 4. Типичная осциллограмма напряжения на РМКЭ-35 и протекающего через него тока при гашении дуги сопровождающего тока в нуле.

Проверка координации срабатывания разрядника с изоляцией под дождём при воздействии импульсов напряжения с крутым фронтом.

Проверка координации срабатывания проводилась для определения максимальной величины ИП между промежуточными отводами экранов при котором наблюдалось стабильное координированное срабатывание РМКЭ-35 с гирляндой. Испытания проведены под дождём импульсами напряжения с

крутизной нарастания фронта 2000 кВ/мкс, что является более сложным условием для координированного срабатывания разрядника, чем стандартный грозовой импульс.

Методика испытаний заключалась в приложении импульсов с постепенным уменьшением длины отводов методом половинного деления до появления первого некоординированного срабатывания.

В РФ подавляющее большинство ВЛ 35 кВ эксплуатируются с тремя изоляторами в гирлянде, но в районах с высокой степенью загрязнения применяют до четырёх изоляторов. Поэтому испытания на координацию срабатывания проведены с двумя видами гирлянд (рис. 5а, б), а также с полимерным изолятором (рис 5 в).

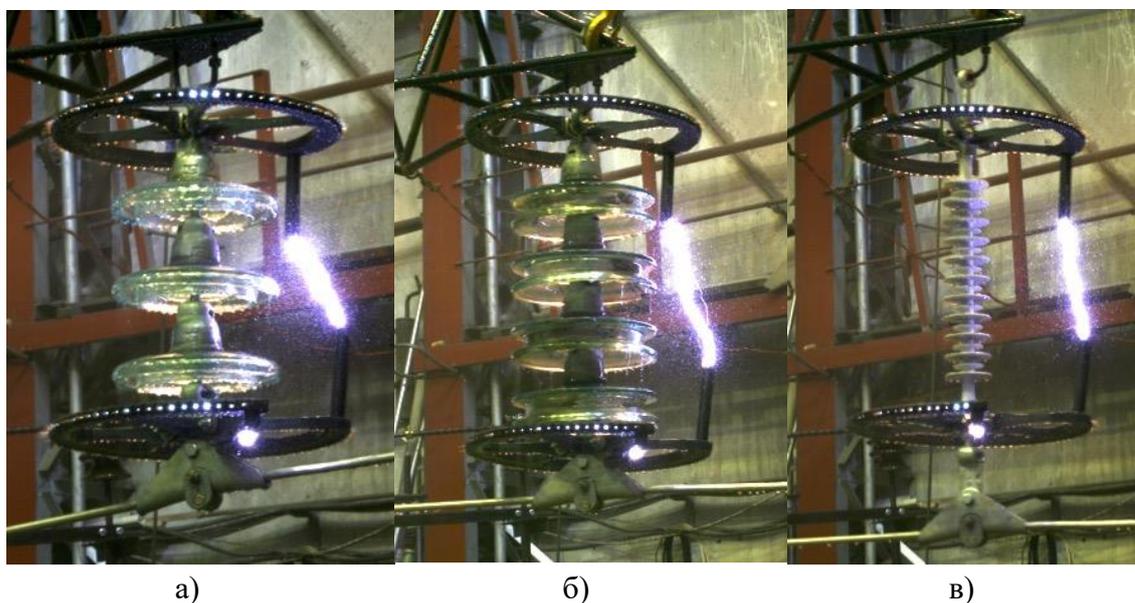


Рис. 5. Испытания РМКЭ-35 на координацию срабатывания:

- а) с гирляндой из трёх изоляторов; б) гирляндой из четырёх изоляторов; в) с полимерным изолятором.

По результатам испытаний определены максимальные величины ИП между промежуточными отводами экранов: 200 мм для гирлянды из трёх изоляторов и 330 мм для гирлянды из четырёх изоляторов и полимерного изолятора. Примечательно то, что электрическая прочность ИП между промежуточными отводами увеличивается пропорционально увеличению электрической прочности гирлянды. По-этому длина промежуточных отводов для разных испытанных типов изоляции (рис 5 а, б, в) остаётся постоянной. Этим фактом обеспечивается универсальность конструкции разрядника для его использования с гирляндами с разным количеством и типом изоляторов.

Исследования и испытания выдерживаемым напряжением промышленной частоты в сухом состоянии и под дождём.

Цель исследований состояла в определении минимальной величины ИП, при котором под дождём в течении одной минуты приложения напряжения промышленной частоты уровня 80 кВ отсутствует дуговое перекрытие. Поиск проводился путём пошагового уменьшения ИП за счёт наращивания отводов до отметки величины предшествующей возникновению дугового перекрытия. Минимальная величина ИП составила - 160 мм.

Суммируя результаты испытаний на координацию срабатывания и выдерживаемое напряжение промышленной частоты определены средние значения величин ИП (180 мм для гирлянды из 3-х изоляторов и 320 мм для 4-х) при постоянной длине координационных отводов верхнего и нижнего разрядных элементов – 150 мм.

После исследований проведены испытания выдерживаемым напряжением промышленной частоты по ГОСТ 1516.3-96 в сухом состоянии и под дождём. Разрядники выдержали приложение напряжения промышленной частоты уровня 95 кВ в течении 5 минут в сухом состоянии и 80 кВ в течении 1 минуты под дождём.

Снятие 50% разрядных характеристик при воздействии грозовых импульсов стандартной формы 1,2/50 мкс.

Для определения возможности применения РМКЭ-35 с видами изоляции отличными от ранее описанных проведены исследования 50% разрядных характеристик разрядников. Исследования проводились в сухом состоянии и под дождём на шести РМКЭ-35, с гирляндами из трёх и четырёх изоляторов с применением отводов, постоянной длины. Усреднённые данные 50% разрядных напряжений после обработки занесены в таблицу 2.

По полученным данным построены графики зависимости 50% разрядного напряжения от присоединительного размера РМКЭ-35 на гирляндах с тремя (440 мм) и четырьмя (570 мм) изоляторами (рис. 6). Продлив на графике прямые в противоположных направлениях, получена возможность осуществлять оценку применимости РМКЭ-35 с различными видами изоляции, зная их 50% разрядные напряжения и присоединительные размеры разрядника. 50% разрядные напряжения изоляции на графике должны находиться по крайней мере на 20% выше чем характеристики разрядника.

Таблица 2. 50% разрядные напряжения РМКЭ-35 при воздействии грозových импульсов перенапряжений.

Количество изоляторов в гирлянде, шт.	Присоединительный размер РМКЭ-35/длина ИП, мм	Состояние изоляции	Значение 50% разрядных напряжений, кВ	
			Положительная полярность	Отрицательная полярность
Три	440 / 180	Сухое	190	257
		Дождь	234	233
Четыре/полномерный	570 / 320	Сухое	247	359
		Дождь	314	290

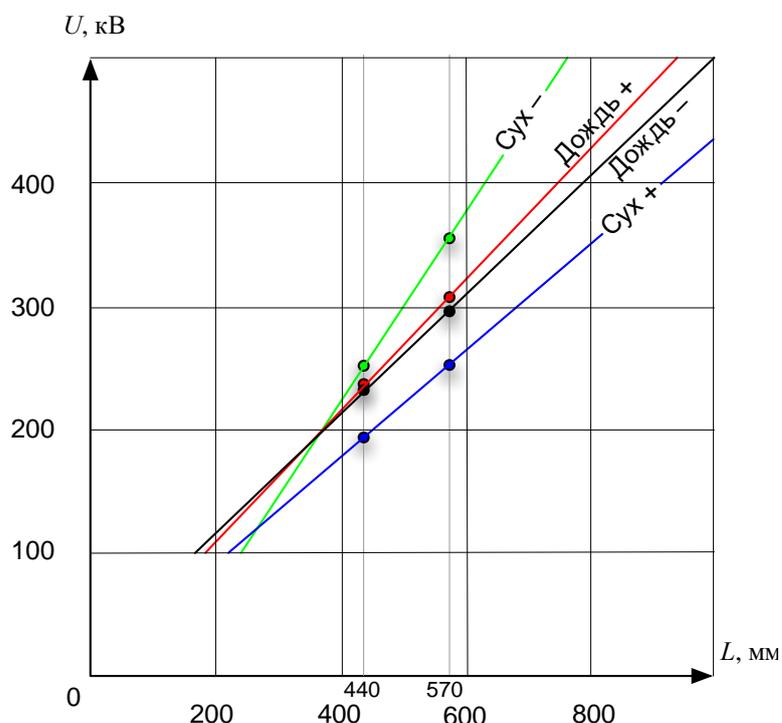


Рис. 6. График зависимости 50% разрядного напряжения от присоединительного размера РМКЭ-35 на гирляндах с тремя (440 мм) и четырьмя (570 мм) изоляторами.

Измерение уровня промышленных радиопомех.

Изначально конструкция РМКЭ-35 предусматривала подвод напряжения к МКС верхнего и нижнего экранов по подводящим электродам, выполненным в виде плоских стальных штанг (рис. 7а). Данное решение выглядело перспективным, поскольку представлялось простым и значительно увеличивало механическую прочность конструкции основания. Однако проведенные расчёты распределения электрического поля на элементах

конструкции разрядника при приложении к нему наибольшего рабочего амплитудного значения напряжения 32,9 кВ показали, что при подводе высокого потенциала непосредственно к МКС максимальная напряженность электрического поля оказалась на электроде первой камеры нижнего экрана, и её значение в данном месте составило $E \approx 50$ кВ/см (рис. 8а), что значительно превышает уровень зажигания короны 30 кВ/см. При такой напряжённости электрического поля в нескольких первых камерах под действием рабочего напряжения будут постоянно происходить частичные разряды, вызывающие появление радиопомех и делая конструкцию подвода напряжения непригодной для использования.

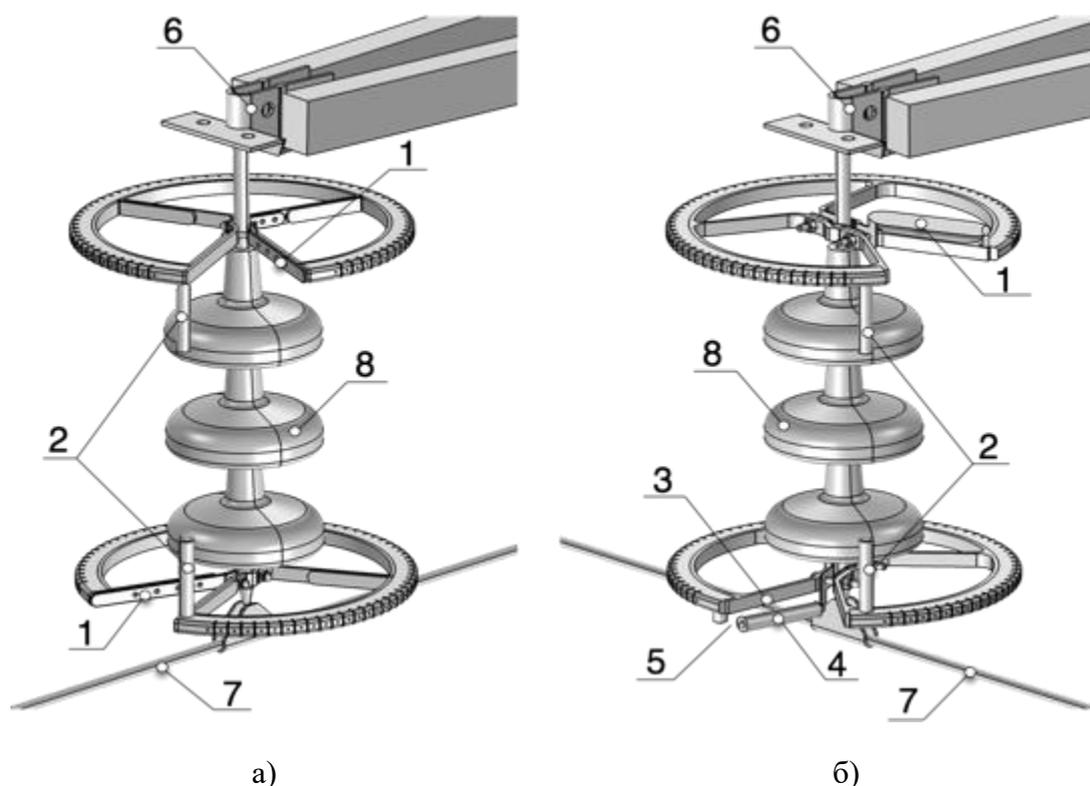


Рис. 7. Конструкция подводящих электродов разрядника РМКЭ-35:

- а) подводящий электрод без искрового промежутка; б) с искровым промежутком;
 1 - стальная штанга; 2 - промежуточные отводы; 3 - изоляционная штанга; 4 - нижний подводящий электрод; 5 - дополнительный искровой промежуток; 6 - траверса; 7 – провод; 8 - изолятор.

Снижение напряжённости электрического поля на МКС нижнего экрана до 8 кВ/см (рис.8б) достигнуто путём организации ИП между МКС и токоведущей арматурой (рис. 7 б).

Для верхнего экрана, имеющего потенциал земли, благодаря экранирующему воздействию траверсы напряжённость электрического поля в первой камере МКС снижается до приемлемого уровня в 20 кВ/см.

Измерение уровня промышленных радиопомех РМКЭ-35 с организованным ИП на нижнем экране показали, что при приложении

напряжения $1,1U_{н.раб} = 44,5$ кВ уровень радиопомех составил 32 дБ, что ниже нормы 55 дБ.

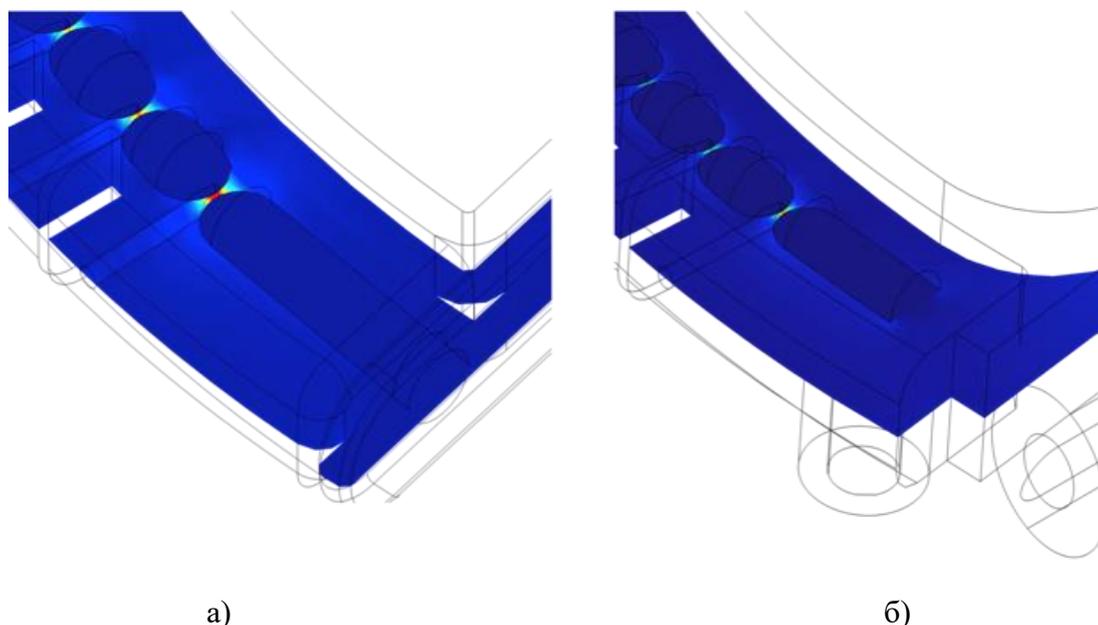


Рис. 8. Визуализация напряжённости электрического поля первых трёх камер нижнего экрана:

- а) подводящий электрод нижнего экрана без искрового промежутка;
- б) с искровым промежутком.

Воздействие смены температур среды с приложением нагрузки.

Необходимые механические характеристики основания экрана обеспечиваются за счёт применения конструкционного пластика – полифениленсульфида (ПФС). Этот материал обладает высокой прочностью, стойкостью к агрессивным воздействиям окружающей среды и используется во многих отраслях промышленности, в том числе – в космическом, авиа и автомобильном строении.

Испытания проведены с целью проверки прочности материала при воздействии экстремально низких и высоких температур.

Рассчитано, что при толщине стенки гололёда 40 мм (наивысшая степень) на один экран будет воздействовать распределенная нагрузка 11 кг с запасом для испытаний нагрузка взята 24 кг.

Методика испытаний 205-4 в соответствии ГОСТ 30630.2.1 подразумевает проведение пяти циклов смены температуры от минус 60°С до плюс 85°С с периодическим приложением распределённой нагрузки и два цикла воздействия повышенной влажности.

Испытания проведены в лаборатории ЦНИИ РТК. Экран размещался на компактной оснастке, помещаемой в термокамеру позволяющей прикладывать

необходимую распределённую нагрузку и в таком виде выдерживался четыре часа в при температуре минус 60°С. Сразу после открытия камеры к нему прикладывалась повышенная нагрузка 24 кг (рис.9) и вместе с ней экран выдерживался в термокамере до полного восстановления исходной температуры минус 60°С. После восстановления температуры нагрузка снималась и испытание повторялось для режима повышенной температуры плюс 85°С. Приложение нагрузки в режиме повышенной температуры имитировало вероятную нагрузку от посадки на экран крупных птиц.



Рис. 9. Испытания экрана РМКЭ-35 в термокамере с распределённой нагрузкой 24 кг.

Проведённые испытания показали, что приложение нагрузки в режимах пониженной и повышенной температур не вызвало остаточной деформации, а также повреждений несущей конструкции основания экранов.

Испытания на вибропрочность.

Проведены испытания основания экрана на вибропрочность с приложением распределённой нагрузки 11 кг (рис.10), имитирующие совместное воздействие ветровой и гололёдной нагрузки. Для определения группы механического исполнения сняты резонансные характеристики по методу 100-1 ГОСТ 20.57.406-81. На всех образцах пиковые значения резонансов обнаружены на частотах от 6 до 25 Гц. На основании полученных результатов выбрана первая группа М1 согласно ГОСТ 17516.1-90 и проведены испытания на вибропрочность в диапазоне частот от 0,5 до 35 Гц, с ускорением 5 м/с² в одном вертикальном направлении, общее время испытаний 6 часов. Повреждений несущей конструкции основания экранов и ослабления узлов крепления не обнаружено.



Рис. 10. Испытания экрана РМКЭ-35 на вибропрочность с распределённой нагрузкой 11 кг.

Воздействие соляного тумана

Испытания проведены с целью проверки эффективности гашения дуги сопровождающего тока при наличии кристаллов соли в разрядных камерах, а также стойкости наружных металлических частей разрядника к коррозии.

Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 15151. Разрядники выдерживались в камере соляного тумана при температуре 27°C при циклическом распылении соляного раствора в течении семи суток.

Внешний осмотр выявил отсутствие следов коррозии на внешних металлических частях разрядника. Заключительные испытания на отключающую способность не показали снижения эффективности гашения дуги сопровождающего тока.

Динамическое воздействие пыли

Конструкция РМКЭ-35 выполнена в общеклиматическом исполнении, поэтому эксплуатация разрядников возможна, в том числе и в районах пустыни, где как известно, не редки случаи возникновения песчаных бурь. По этой причине появляется вероятность заполнения отверстий камер МКС песком или песчаной пылью, что может привести к нарушению работоспособности разрядника.

Испытания РМКЭ-35 на отключающую способность в условиях естественного заполнения песчаной пылью дугогасящих камер МКС проведено после 24 часового динамического воздействия пыли в специальной камере (рис.

11) по методу 212-1.2 ГОСТ 52560-2006. Скорость пылевого потока 10 м/с, концентрация пыли 5г/м³.

По окончании воздействия пыли камеры МКС были заклеены липкой лентой для сохранения в них песка и доставлены на испытания отключающей способности.



Рис. 11. Испытания экранов РМКЭ-35 в камере пыли.

Испытания показали, что отключающая способность РМКЭ-35 не зависит от наличия песка в дугогасящих камерах.

Испытания на стойкость к ультрафиолетовому излучению.

Испытания проведены по нормам ISO 4892-2, метод А, МЭК 62217. Фрагменты основания разрядника и МКС выдерживались в камере светопогоды в течении 1000 часов при плотности потока излучения в интервале длин волн 300÷400 нм - 60 Вт/м². После окончания испытаний проведён визуальный осмотр при помощи микроскопа, который показал отсутствие значительных изменений поверхности образцов.

Заключение и выводы.

Мультикамерный разрядник РМКЭ-35 разработан в качестве альтернативы применению гирлянды мультикамерных изоляторов-разрядников ГИРМК-35 в том случае, когда не целесообразна замена изоляции ВЛ 35 кВ.

Проведённый комплекс электрических испытаний РМКЭ-35 показал их соответствие техническим требованиям, приведённым вначале статьи. На основании вышеизложенного можно ожидать, что РМКЭ-35 сможет осуществлять надёжную защиту ВЛ 35 кВ от перенапряжений, вызванных воздействиями молнии, в том числе ПУМ в фазный провод на протяжении всего 30-летнего срока эксплуатации. Механические и климатические испытания показали стойкость конструкции и материалов разрядника к агрессивным воздействиям окружающей среды.

В таблице 3 приведены основные технические характеристики РМКЭ-35.

Таблица 3. Основные технические характеристики РМКЭ-35

<i>Характеристика</i>	<i>Величина</i>
Класс напряжения, кВ	35
Величина тока к.з. в месте установки действ. значение, кА	3,5
Защита ВЛ от импульсных воздействий, вид	прямой удар молнии обратные перекрытия индуктированные перенапряжения
Минимальный отключающий ресурс, кол-во срабатываний	10
Диаметр экрана с МКС, мм	435
Длина промежуточных отводов, мм	150
Средняя длина ИП, при присоединительных размерах	
440 мм	180
570 мм	320
Уровень промышленных радиопомех, дБ	32

Литература:

Российские издания

[1] Подпоркин Г. В., Енькин Е. Ю., Калакутский Е. С., Пильщиков В. Е., Сиваев А. Д. «Грозозащита ВЛ 10-35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников», «Электричество», 2010 г., №10, стр.11-16.

[2] Подпоркин Г. В. О разработке мультикамерных изоляторов-разрядников для ВЛ 220 кВ без грозозащитного троса // Энергетик. 2010. №12. С 10-14.