

Испытания мультикамерных разрядников закрытого типа многокомпонентной молнией

Коткин Д.В., Енькин Е.Ю., Белько Д.О., Сиваев А.Д., к.т.н., Юль А.С.

Введение

В серийно выпускаемых мультикамерных разрядниках используется рабочий элемент – мультикамерная система (МКС) с камерами открытого типа. При протекании токов по такой МКС образовавшаяся дуга за счёт высокой температуры повышает давление внутри камер, что приводит к её выбросу за пределы разрядника с рассеиванием энергии в окружающее пространство.

В соответствии с [1] более половины молний содержат две и более компонент, разделённых временным промежутком от десятка до нескольких сотен мс. Из закона Пашена известна зависимость величины разрядного напряжения искровых промежутков от величины давления газов. В разрядниках с открытой МКС давление не накапливается и, вследствие этого, разрядное напряжение для каждой из последующих компонент меняться не будет.

В НПО «Стример» разработаны разрядники нового класса, так называемые мультикамерные разрядники закрытого типа (РМКЗ). В отличие от серийно выпускаемых разрядников с открытой МКС, закрытая конструкция корпуса препятствует оперативному сбросу давления в окружающее пространство. В связи с этим, задачей настоящей работы было осуществление проверки величины разрядного напряжения РМКЗ при воздействии второй компоненты молнии после протекания тока первой компоненты прямого удара молнии.

Определение временного интервала между импульсами первой и второй компонент

Перед началом работы необходимо было определить временной интервал между первой и второй компонентами, ориентируясь на данные из литературных источников и нормативной документации. Информацию о параметрах распределения межимпульсного интервала можно получить из двух официальных нормативных документов [1] и [2], которые ссылаются на один и тот же источник – [3]. Согласно их рекомендациям, медианное значение межимпульсного интервала составляет 35 мс.

Однако, ещё много исследователей молний внесли свой вклад в изучение этого параметра. В документе [4] описываются наблюдения скоростными камерами в разных

частях мира за 1989-2012 гг (Аризона, Флорида - США, Сан-Паулу - Бразилия, Южная Африка, Швеция, Австрия, Шри-Ланка, Малайзия). Согласно их обобщенным наблюдениям, среднегеометрическое значение времени межимпульсного интервала составляет около 60 мс.

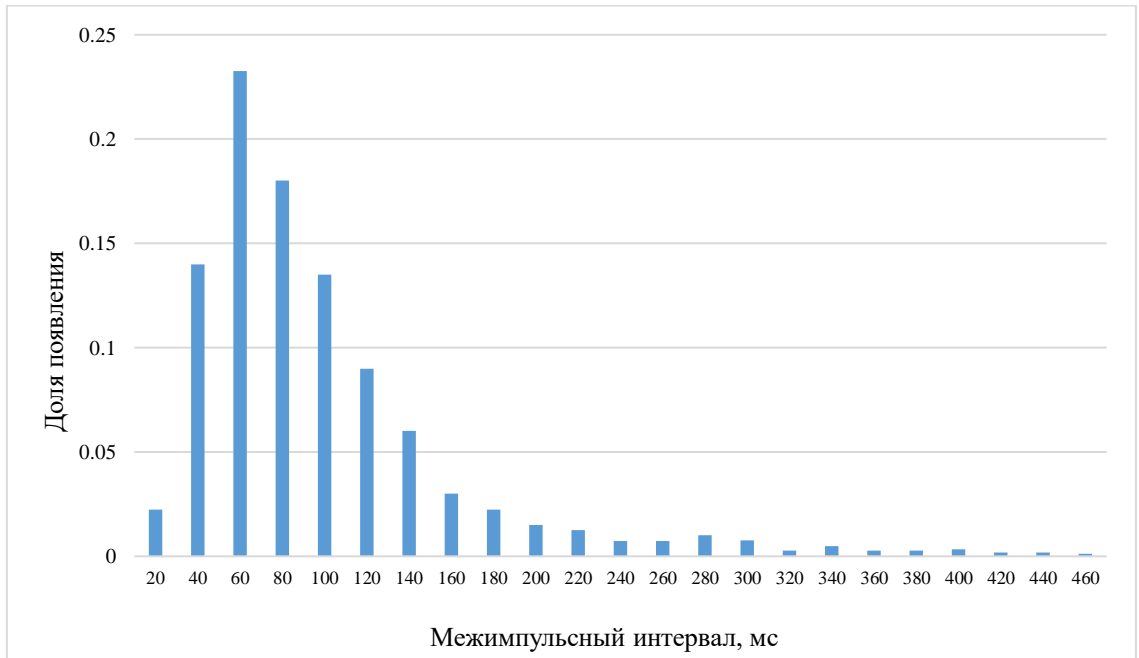


Рисунок 1. Гистограмма распределения межимпульсных интервалов, полученных в Аризоне (США) и Сан-Паулу (Бразилия) из [4].

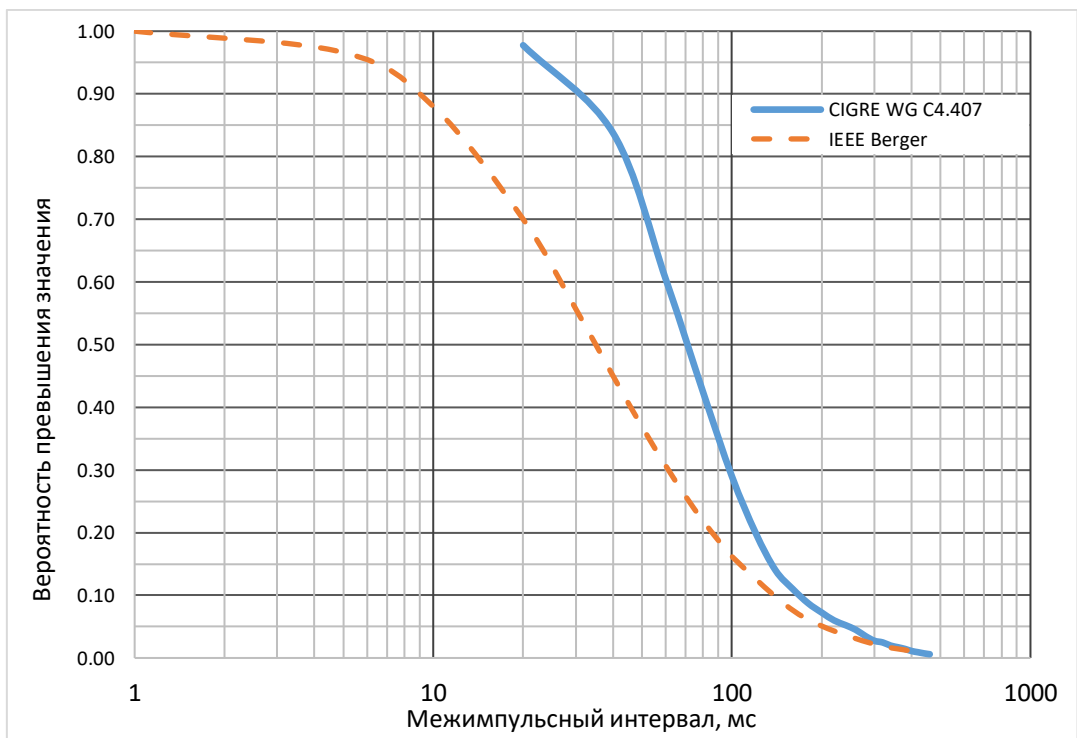


Рисунок 2. Функция распределения межимпульсных интервалов по [1] и [4].

Ориентируясь на более свежие и полномасштабные исследования [4] было выбрано оптимальное значение времени межимпульсного интервала для испытаний – не менее 25 мс, которое покрывает более 95% случаев многокомпонентных молний. На рисунке 1 приведена гистограмма распределения межимпульсных интервалов, полученных в Аризоне и Сан-Паулу на 1210 случаях ударов молнии в землю (совмещение данных из [4]). На рисунке 2 приведены функции распределения межимпульсных интервалов согласно данным из [1, 2] и согласно гистограмме из рисунка 1 по данным [4].

Описание испытательной установки

Для проведения испытаний разработана и собрана установка, позволяющая моделировать воздействие двухкомпонентной молнии на разрядник (рисунок 3).

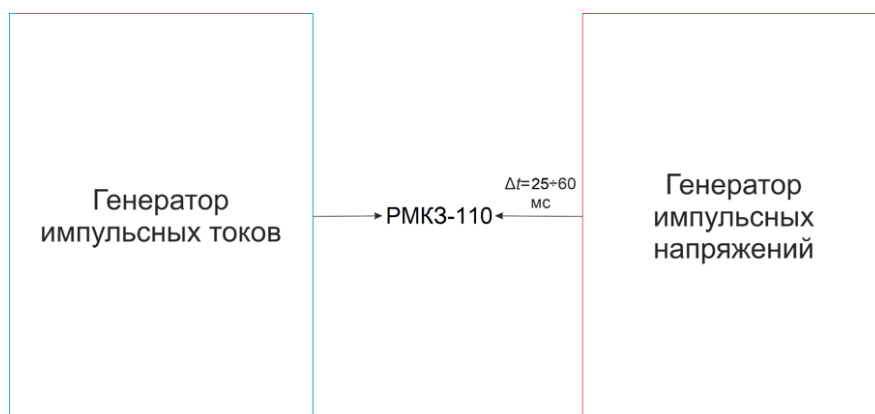


Рисунок 3. Блок-схема испытательной установки ГИТ/ГИН.

Генератор импульсных токов (ГИТ) имитирует прямой удар молнии 30 кА с полной длительностью 50 мкс (рисунок 4а). Одновременно со срабатыванием ГИТа запускается реле времени, отсчитывающее временной интервал до воздействия второй компоненты. Система была настроена так, чтобы время между 2-мя импульсами варьировалось в пределах от 25 до 60 мс. Спустя этот временной промежуток замыкается коммутатор, подключающий ГИН к разряднику. Генератор импульсных напряжений имитирует вторую компоненту молнии (рисунок 4б).

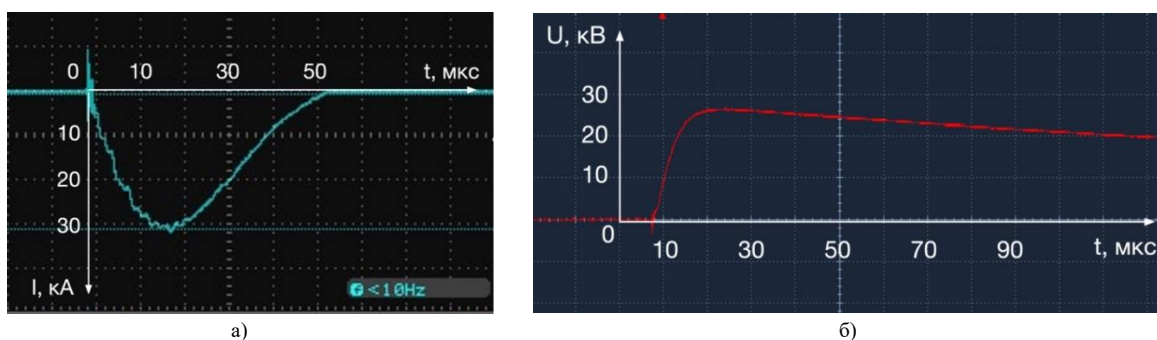


Рисунок 4 – Осциллограммы импульсных воздействий:

а) осциллограмма тока первой компоненты; б) осциллограмма напряжения второй компоненты.

Фиксация временной задержки осуществлялась при помощи скоростной видеокамеры с частотой 240 кадров в секунду по световым вспышкам от коммутирующей аппаратуры ГИТа и ГИНа.

Описание конструкции испытуемых образцов

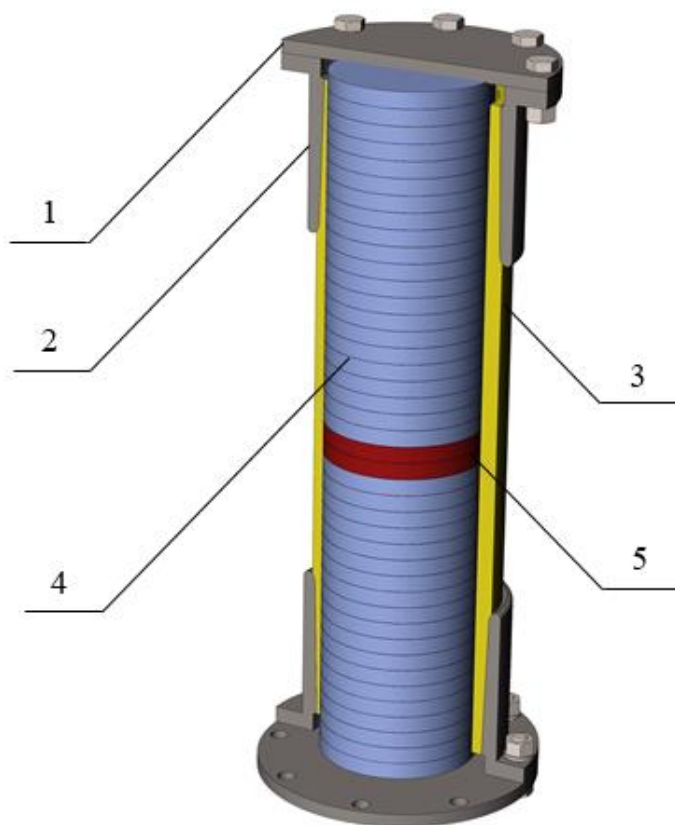


Рисунок 5. Конструкция испытательного образца (в разрезе):

1 – крышка, 2 – оконцеватель, 3 – стеклопластиковый корпус, 4 – наполнитель, 5 – разрядные модули.

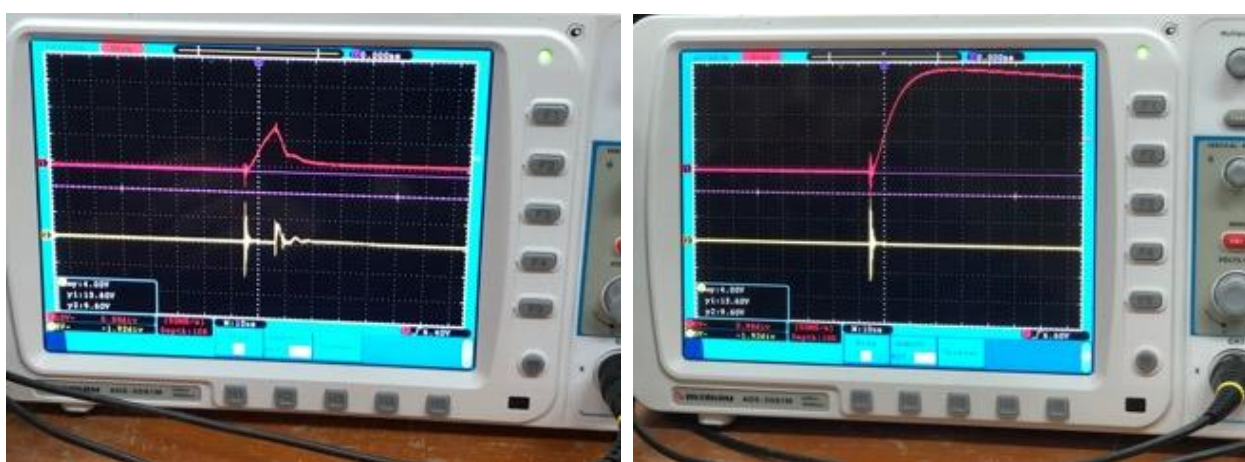
Для проведения исследований было собрано 2 разрядника. Конструкция испытательной установки предполагала испытания на укороченных образцах, состоящих из двух разрядных модулей, которые располагались посередине испытательного образца (рисунок 5). Остальное пространство внутри корпуса заполнялось резиновыми изоляционными дисками без электродов. Для удержания давления внутри корпуса разрядник имел герметично закрывающиеся крышки.

Методика испытаний

Для оценки влияния давления в корпусе, образовавшегося после прохождения тока прямого удара молнии, на уровень разрядного напряжения при воздействии второй компоненты был выбран метод «вверх-вниз» по [5]. Преимущество этого метода

заключается в возможности вычислить разрядное напряжение, произведя наименьшее количество опытов.

Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе разрядник подключался к ГИНу, и подавалась серия импульсов. На каждом импульсе фиксировалось срабатывание или несрабатывание разрядника при помощи осциллографа (рисунок 6). Метод «вверх-вниз» предполагает понижение зарядного напряжения после каждого успешного срабатывания и повышение после каждого несрабатывания разрядника. Серия состояла из 10-ти или 11-ти импульсов, так как из-за особенностей расчётной формулы в случае равного количества успешных и неуспешных срабатываний требовалось нечётное количество воздействий.



а)

б)

Рисунок 6. Осциллограммы напряжения и тока через разрядник при испытаниях:
а) срабатывание разрядника; б) несрабатывание разрядника.

На втором этапе разрядник подключался к генератору импульсных токов и генератору импульсных напряжений. Сначала на образец подавался токовый импульс от ГИТа. Затем, спустя временной интервал, подавался импульс от ГИНа, имитирующий вторую компоненту. Срабатывание разрядника на второй компоненте фиксировал осциллограф.

Результаты обеих серий опытов представлялись в виде таблицы со срабатыванием или несрабатыванием разрядника для каждого значения зарядных напряжений ГИНа. Затем для каждого этапа рассчитывалось значение 50%-го разрядного напряжения образца. Если это значение на второй компоненте не превышает более чем на 10% значения на первой, то результат эксперимента считался успешным.

Результаты испытаний

В качестве основной расчётной формулы для вычисления среднего 50%-го разрядного напряжения была принята эмпирическая формула из [5]:

$$\overline{U}_{50} = U_0 + \Delta U \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right), \quad (1)$$

где U_0 – нулевая ступень (минимальное зарядное напряжение, которое прикладывали 2 или более раз), ΔU – шаг изменения напряжения,

$$A = \sum_{i=0}^m i * n_i \quad (2)$$

и

$$N = \sum_{i=0}^m n_i, \quad (3)$$

где i – номер ступени, m – количество ступеней без учёта нулевой, n_i – количество разрядов, если суммарное число отсутствия разрядов меньше суммарного числа разрядов, или отсутствий разрядов, если суммарное число разрядов меньше суммарного числа отсутствия разрядов, на заданной ступени. Знак «+» формуле (1) ставится в случае, когда суммарное число отсутствия разрядов меньше суммарного числа разрядов, знак «-» - наоборот.

Для оценки погрешности полученных значений \overline{U}_{50} использовалась формула:

$$\delta \overline{U}_{50} = \frac{2\sigma}{\sqrt{N+N'}}, \quad (4)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение для функции разрядного напряжения, N – суммарное число разрядов, N' – суммарное число отсутствия разрядов. Оценка среднеквадратичного отклонения проводилась следующим образом:

$$\sigma = \frac{\sigma^*}{U_{50}}, \quad (5)$$

где σ^* – разница между значениями 50% и 16% импульсных разрядных напряжений. Расчёт этого параметра можно провести с помощью выражения, приведённого в [6]:

$$\sigma^* = 1,62 \Delta U * \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,03 \right), \quad (6)$$

где $B = \sum_{i=0}^m i^2 * n_i$.

Ниже представлены результаты каждой из серий опытов для двух испытуемых образцов.

Образец №1:

№ опыта	Зарядное напряжение ГИНа, кВ	Рез-т
1	32	+
2	31	+
3	30	-
4	31	+
5	30	+
6	29	-
7	30	+
8	29	+
9	28	-
10	29	-

Таблица 1. Испытания разрядника №1 импульсами напряжения без предварительного воздействия тока молнии первой компоненты.

№ опыта	Ток первой компоненты, кА	Зарядное напряжение ГИНа, кВ	Время между компонентами, мс	Результат
1	30	32	24	+
2	30	31	28	+
3	30	30	64	+
4	30	29	60	+
5	30	28	40	-
6	30	29	44	-
7	30	30	52	-
8	30	31	48	+
9	30	30	32	-
10	30	31	28	-

Таблица 2. Испытания разрядника №1 импульсами напряжения после предварительного воздействия тока молнии первой компоненты.

Образец №2:

№ опыта	Зарядное напряжение ГИНа, кВ	Результат
1	32	-
2	33	-
3	34	+
4	33	+
5	32	+
6	31	-
7	32	+
8	31	-
9	32	-
10	33	-
11	34	-

Таблица 3. Испытания разрядника №2 импульсами напряжения без предварительного воздействия тока молнии первой компоненты.

№ опыта	Ток первой компоненты, кА	Зарядное напряжение ГИНа, кВ	Время между компонентами, мс	Результат
1	30	32	52	-
2	30	33	52	+
3	30	32	60	+
4	30	31	40	+
5	30	30	40	+
6	30	29	44	-
7	30	30	48	+
8	30	29	44	-
9	30	30	56	+
10	30	29	56	-
11	30	30	24	+

Таблица 4. Испытания разрядника №2 импульсами напряжения после предварительного воздействия тока молнии первой компоненты.

Сравнение 50% импульсных разрядных напряжений:

– для разрядника № 1 50% импульсное разрядное напряжение **без** воздействия первой компоненты составило **30,5 кВ ± 0,6 кВ;**

– для разрядника № 1 50% импульсное разрядное напряжение **после** воздействия первой компоненты составило **31,1 кВ ± 1,1 кВ;**

– для разрядника № 2 50% импульсное разрядное напряжение **без** воздействия первой компоненты составило **32,2 кВ ± 0,6 кВ;**

– для разрядника № 2 50% импульсное разрядное напряжение **после** воздействия первой компоненты составило **30,2 кВ ± 1,6 кВ**.

Исходя из полученных результатов определено, что в рамках доверительного интервала величины 50%-х разрядных напряжений до и после воздействия тока прямого удара молнии неразличимы с заданной надёжностью 95%.

Выводы.

1. Опираясь на данные из литературных источников выбрана оптимальная временная задержка между первой и второй компонентами молнии - от 25 мс, что покрывает более 95% случаев многокомпонентных молний.
2. Разработана схема и выполнена сборка высоковольтного испытательного стенда для формирования воздействий двухкомпонентной молнии.
3. Разница в значениях 50% импульсных разрядных напряжений РМКЗ-110 при отсутствии и при наличии предварительного воздействия первой компоненты молнии не выявлена.

Список литературы:

- [1] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std. 1410-2010.
- [2] МЭК 62305-1—2010 Менеджмент риска. Защита от молний. Часть 1.
- [3] Anderson R.B., Eriksson A.J., Lightning parameters for engineering application. CIGRE Electra No 69, 1980, pp. 65-102.
- [4] CIGRE Working Group C4.407 Lightning Parameters for Engineering Applications, August 2013.
- [5] ГОСТ Р 55194-2012. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ.
- [6] Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, В.Е. Кизеветтер «Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции», Энергия, 1969, с. 83-86.