

# Мульти-камерные разрядники нового типа для защиты ВЛ 10 кВ и 13,8 кВ от индуцированных перенапряжений

Подпоркин Г. В., Кретов Ю.В., Сотников А.Н., Филиппов И. И.

## 1. Введение

В настоящее время для защиты ВЛ 6-20 кВ с изолированной нейтралью от индуцированных перенапряжений применяются разрядники мультикамерные (РМК) различных типов: РМК10, РМК20, «Красный дракон» и т.д. Все они используют мультикамерную систему (МКС) одного типа [1]. Она состоит из множества миниатюрных камер, образованных между электродами в виде стальных шариков в профиле из силиконовой резины (Рис.1). Камеры имеют выход наружу из профиля в виде цилиндрических колодцев.

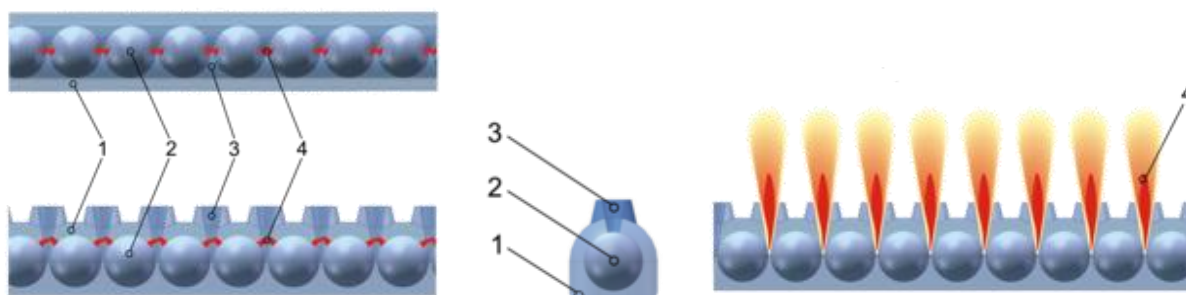


Рис. 1 Мультикамерная система РМК:

1- профиль из силиконовой резины; 2 – промежуточные электроды;  
3 – дугогасящие камеры; 4 – каналы разряда;

При воздействии индуцированного перенапряжения пробиваются искровые промежутки камер, по МКС сначала протекает импульсный ток индуцированного перенапряжения, а затем – сопровождающий ток сети. Происходит резкое расширение канала разряда, вследствие чего внутри камер возникает высокое давление в плазме. Под действием этого давления плазма выдувается наружу, охлаждается за счёт быстрого перемещения в холодном воздухе, сопротивление канала разряда возрастает, ток ограничивается и при переходе через ноль сопровождающего тока сети разряд гаснет (рис.2 а). Такой тип гашения дуги получил название «гашение в нуле». Таким образом, при индуцированном перенапряжении срабатывает разрядник и ограничивает перенапряжение до безопасного для изоляции уровня.

При прямом ударе молнии в провод РМК начинает срабатывать, ток молниевое перенапряжения начинает протекать по МКС, однако затем из камер образуются выхлопы плазмы значительного размера. Они смыкаются между собой, образуя параллельный путь для разряда, причём с существенно меньшим сопротивлением, чем по МКС внутри камер. За счёт

этого основная часть тока молниевое перенапряжения протекает вне разрядника, и он практически не повреждается.

Основные достоинства РМК следующие:

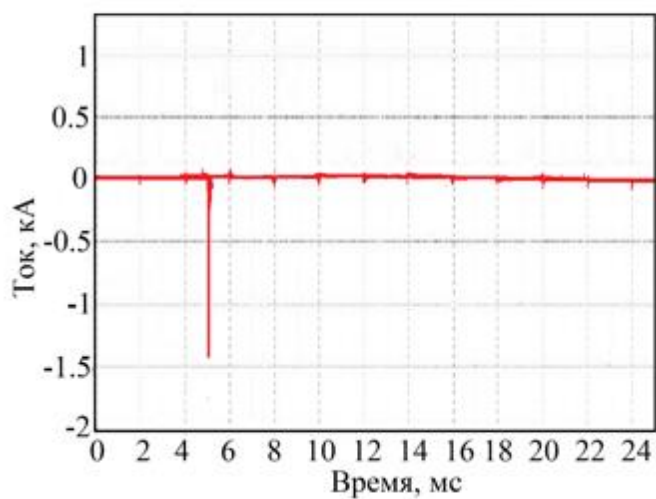
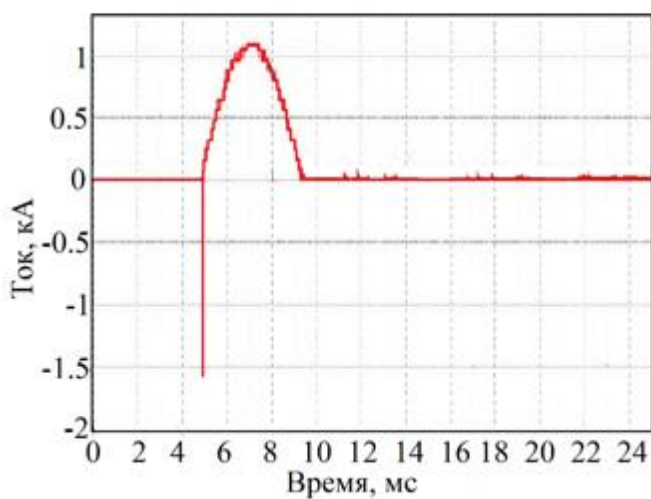
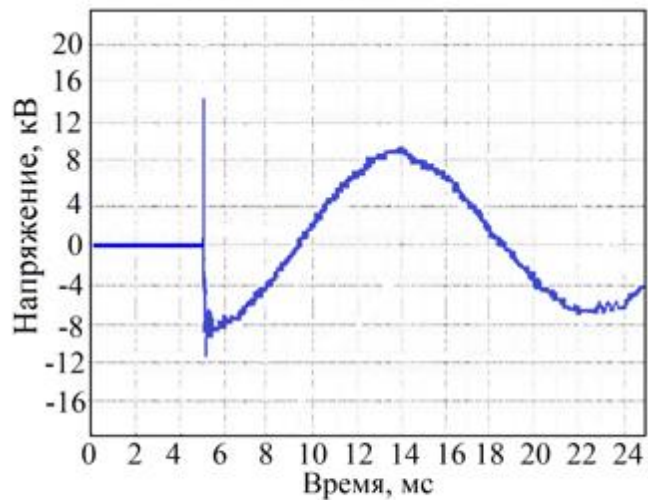
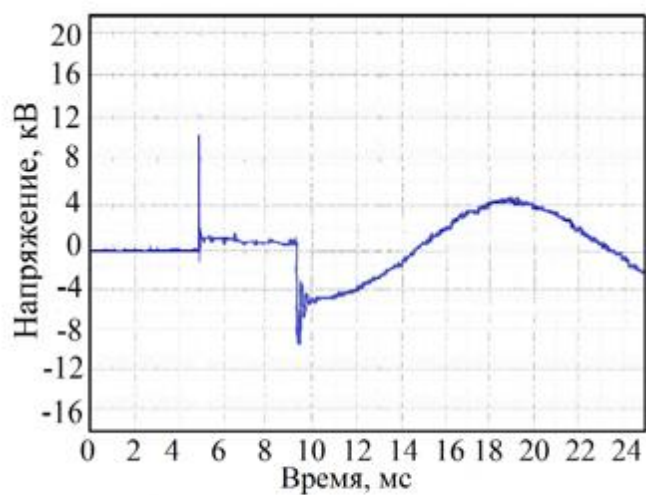
1. Простота конструкции;
2. Высокая надёжность.

Однако, у РМК, обеспечивающих гашение в нуле, есть и недостатки:

1. Значительная эрозия электродов при протекании сопровождающих токов сети.
2. Допускается сопровождающий ток сети не более 700 А.
3. Относительно небольшой ресурс – 10 срабатываний.
4. Разрядники не годятся для защиты ВЛ с заземлённой нейтралью, т.к. в таких сетях токи однофазных к.з. составляют килоамперы.

В последние годы были разработаны МКС нового типа, обеспечивающие гашение импульсного тока молниевое перенапряжения, без сопровождающего тока сети [2 - 4]. Такой тип гашения дуги получил название «гашение в импульсе» (рис. 2б). Эти МКС могут быть применены в разрядниках, обеспечивающих защиту ВЛ от прямых ударов молнии (ПУМ), обратных перекрытий и индуктированных перенапряжений на ВЛ среднего и высокого напряжения.

Основные принципы, использованные в этих МКС, могут быть применены и для разработки более простой и дешёвой МКС для защиты лишь от индуктированных перенапряжений на ВЛ 10-20 кВ. Разрядники, обеспечивающие гашение дуги «в импульсе», лишены перечисленных выше недостатков РМК с гашением «в нуле». Настоящая работа направлена на разработку разрядников для защиты ВЛ 10 кВ с изолированной нейтралью и 13,8 кВ с заземлённой нейтралью.



а)

б)

Рис.2. Осциллограммы гашения дуги: а) в нуле; б) в импульсе

### 3. Конструкции разрядников

Основным элементом разрядников является разрядный модуль, показанный на рис. 3.

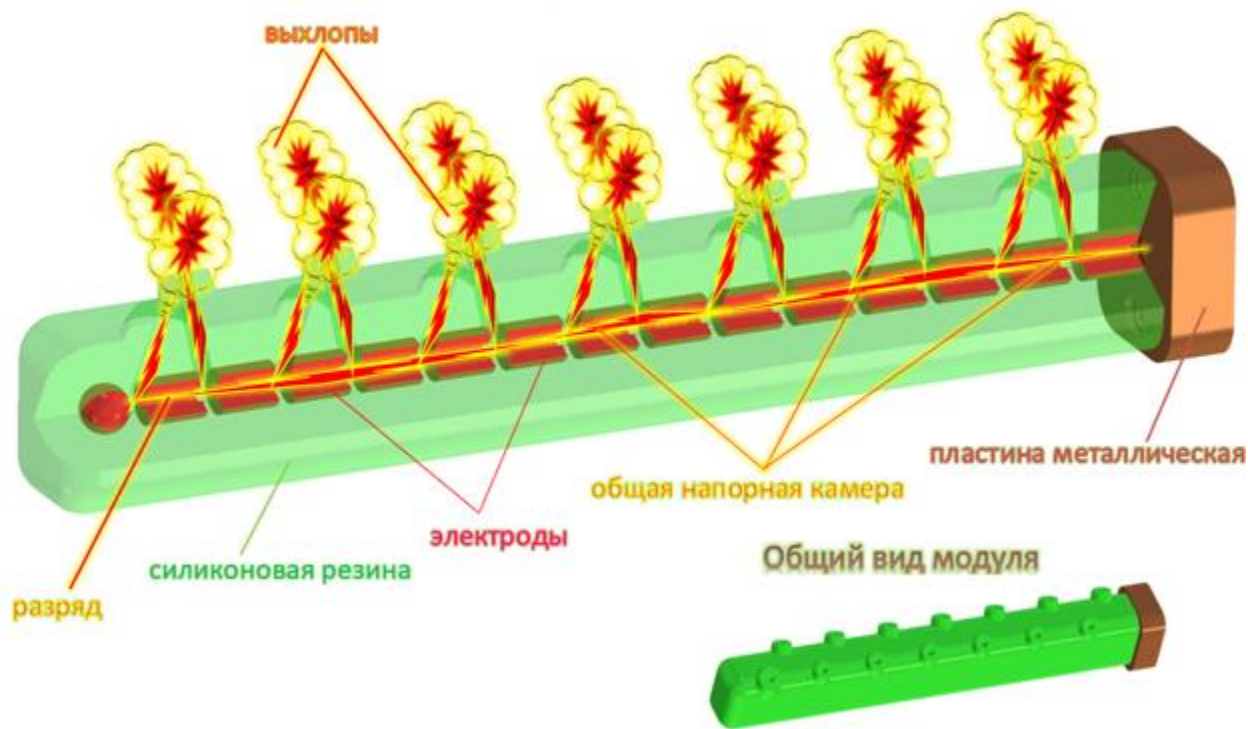


Рис. 3. Разрядный модуль.

Модуль содержит тело, выполненное из силиконовой резины, к которому прикреплена металлическая пластина. Внутри тела запрессованы промежуточные электроды в виде металлических трубок, а крайний (первый) электрод выполнен в виде металлического шарика. Последний электрод (трубка) гальванически соединён с пластиной. Между электродами образованы небольшие искровые промежутки, к которым подходят выхлопные каналы, выходящие наружу из тела разрядника.

- **разрядник для защиты ВЛ 10 кВ с изолированной нейтралью**

Это разрядник мультикамерный, который обеспечивает гашение дуги индуктированного перенапряжения «в импульсе», поэтому его обозначение: РМКИ10. Он содержит один модуль по рис. 3 и устанавливается на штырь изолятора (см. рис.4). Между концом разрядника и проводом имеется искровой воздушный промежуток. При воздействии импульса перенапряжения он пробивается и канал разряда проникает в первый выхлопной канал, находящийся в теле конце разрядника на его конце, и достигает металлических электродов. Далее последовательно срабатывают все искровые промежутки. Более подробно принцип работы разрядников рассмотрен в разделе 4.



а)

б)

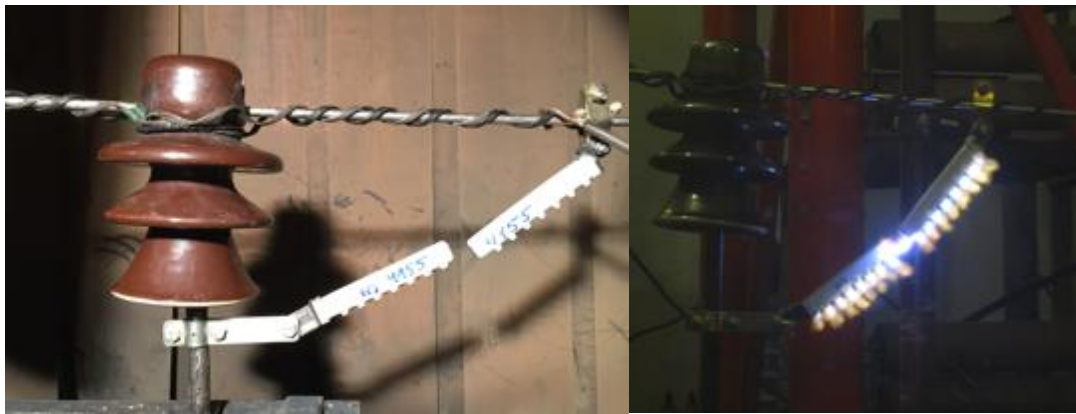
Рис. 4. Разрядник РМКИ10, установленный на штырь изолятора ШФ10Г:

а)- общий вид; б) при воздействии импульса перенапряжения.

- **разрядник для защиты ВЛ 13,8 кВ с заземлённой нейтралью**

Это разрядник мультикамерный, который обеспечивает гашение дуги индуктированного перенапряжения «в импульсе», поэтому его обозначение: РМКИ13,8. Он содержит два модуля по рис. 3. Один модуль устанавливается на штырь изолятора, а второй – на провод (см. рис.5). Между концами модулей имеется искровой воздушный промежуток. При воздействии импульса перенапряжения он пробивается.

Канал разряда проникает в первые выхлопные каналы, находящиеся в телах разрядников на их концах, и достигает металлических электродов. Далее последовательно срабатывают все искровые промежутки обоих модулей. Более подробно принцип работы разрядника рассмотрен в разделе 4.



а)

б)

*Рис. 5. Разрядник РМКИ13,8:*

*а)- общий вид; б) при воздействии импульса перенапряжения.*

#### **4. Принцип работы РМКИ**

При воздействии на МКС индуктированного перенапряжения пробиваются искровые промежутки между трубками, и между ними протекает ток. По мере увеличения тока канал разряда увеличивается и создаётся высокое давление в месте разряда. С одной стороны волна давления приводит к выбросу плазмы наружу из разрядной камеры, а с другой стороны волна давления и частично плазмы устремляется в общую напорную камеру (рис. 5). После вылета плазмы из каналов камер наружу в верхних участках камер образуется пониженное давление, а в общей напорной камере остаётся высокое давление. Под его воздействием поток холодного, неионизированного воздуха устремляется в разрядные камеры, и способствует эффективному гашению импульсной дуги без перехода в дугу сопровождающего тока.

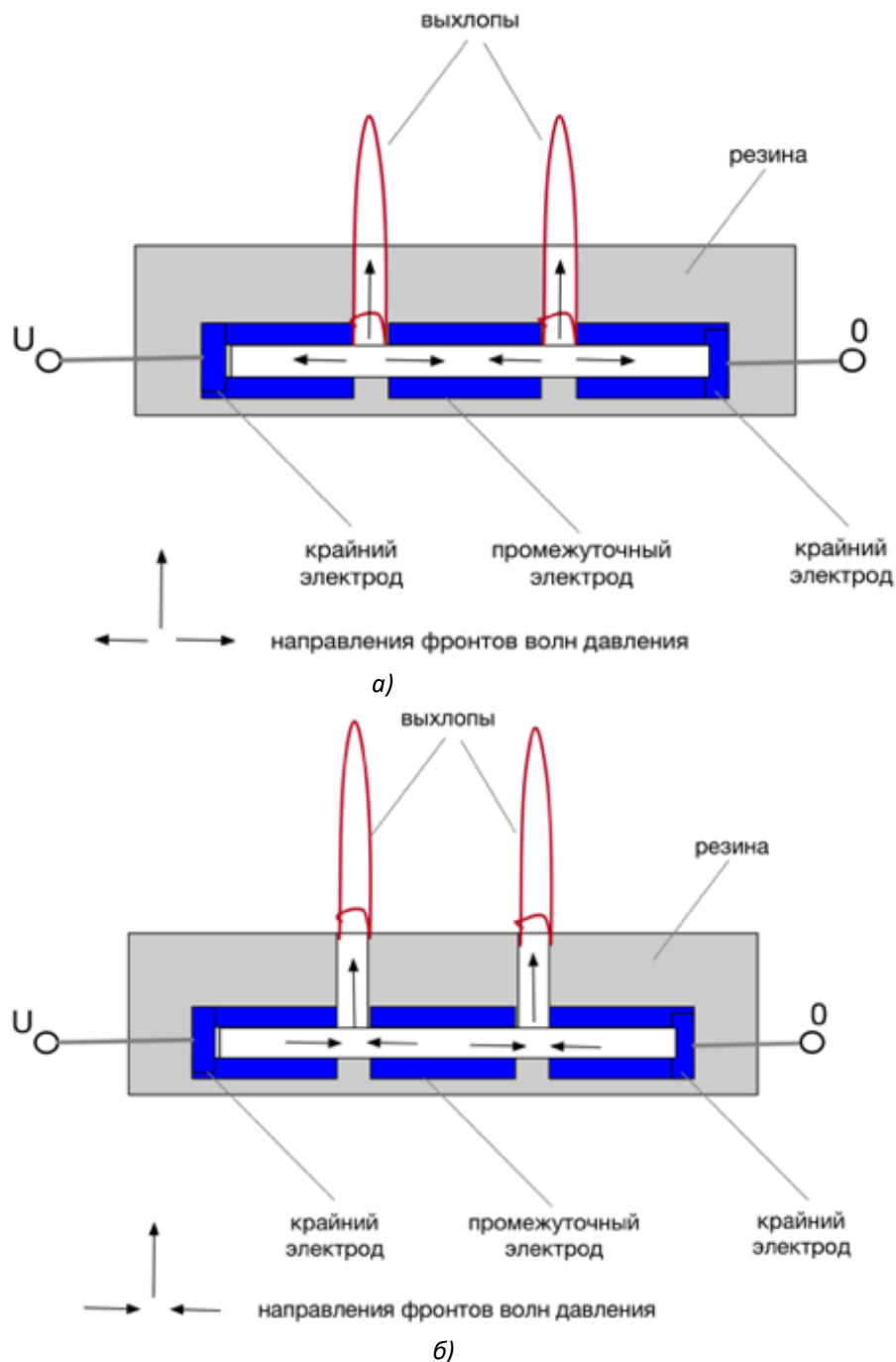


Рис. 6. Иллюстрация принципа работы общей напорной камеры с трубчатыми электродами:  
 а) первая стадия: давление нагнетается в общую напорную камеру;  
 б) вторая стадия: давление из напорной камеры выдувает канал разряда.

## 5. Методика испытаний на гашение дуги

- испытательный импульс, имитирующий индуктированное перенапряжение

На основании анализа опубликованных экспериментальных и расчётных данных было принято решение о том, что для испытаний разрядников для защиты от индуктированных перенапряжений следует использовать импульс напряжения с максимальным значением  $I_M=1,5$  кА, фронтом  $t_\phi=4$  мкс и временем до полуспада  $t_{0,5}=12$  мкс (сокращённо 4/12мкс). Для обеспечения необходимой формы

импульса и с учётом имеющегося оборудования остановились на испытательной схеме, показанной на рис. 7.

Расчётная форма импульса тока и осциллограмма показаны на рис. 8.

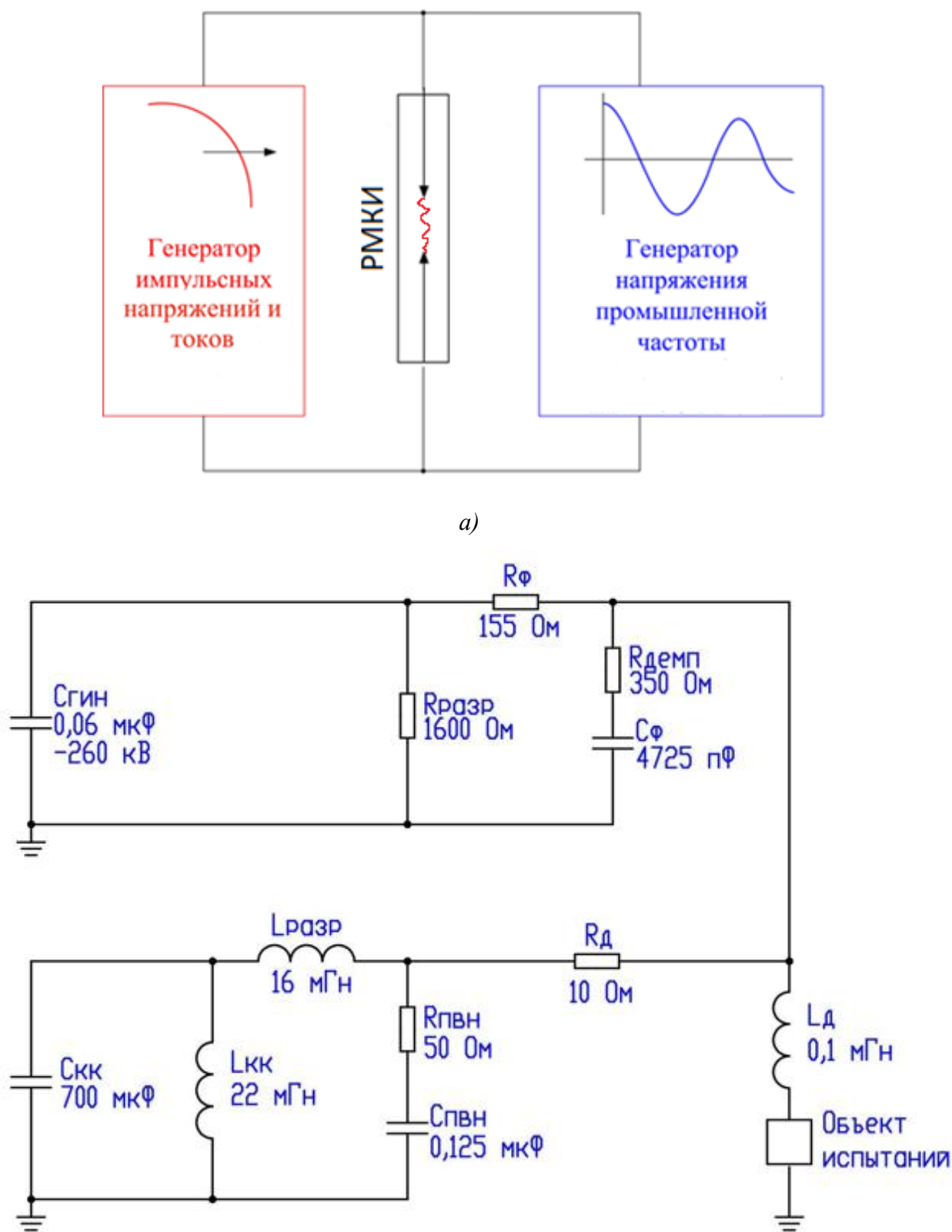


Рис. 7. Испытательная схема: а) блок-схема; б) принципиальная схема.



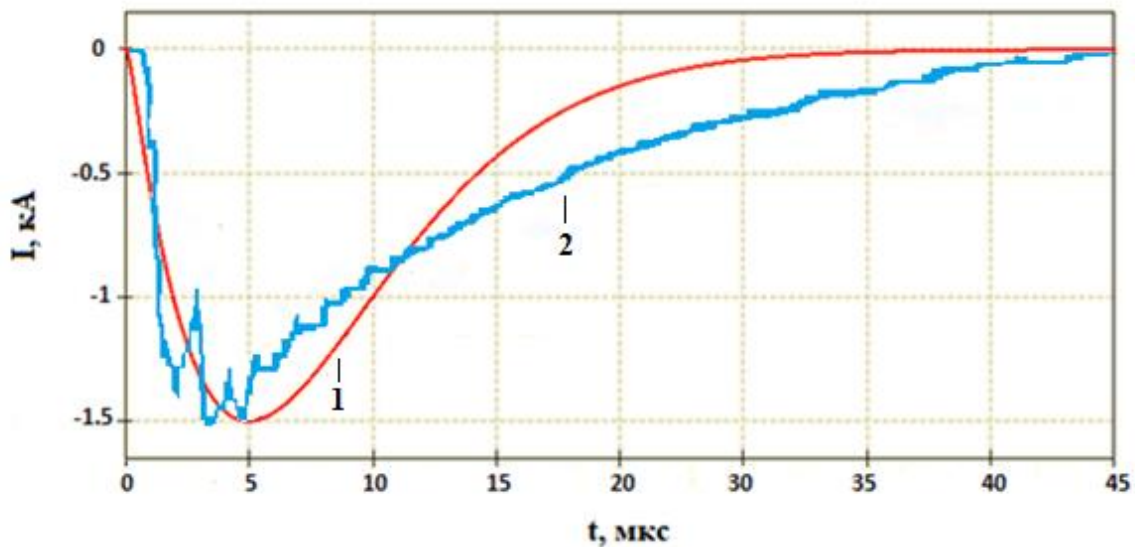


Рис. 8. Испытательный импульс тока амплитудой 1,5 кА, длительностью 4/12 мкс:

1- расчётный; 2 - осциллограмма.

- **определение испытательных напряжений и сопровождающих токов сети**

Максимальное линейное рабочее напряжение ВЛ 10 кВ  $U_{л.макс} = 12$  кВ<sub>д</sub>. Его амплитудное значение  $U^A_{л.макс} = 12 \times 1,41 = 16,9$  кВ<sub>д</sub>. Разрядники устанавливаются по одному на опору с чередованием фаз. При воздействии индуктированного перенапряжения опасной величины срабатывают два разрядника, установленные на разных фазах. При этом на один разрядник приходится амплитудное максимально возможное напряжение  $U^A_{1.макс} = U^A_{л.макс} / 2 = 16,9 / 2 = 8,5$  кВ. Поэтому такое напряжение применялось при испытаниях, т.е. сеть заряжалась до напряжения  $U_{зар} = 8,5$  кВ.

Максимально возможный сопровождающий ток сети  $I_c$  может быть оценен, исходя из того, что при срабатывании двух разрядников на разных опорах и на разных фазах в цепь тока включаются два сопротивления заземления опор. При этом

$I_c = U_{л.макс} / (R_3 + R_3) = 12 / (10 + 10) = 0,6$  кА = 600 А, где  $R_3 = 10$  Ом, и такой ток создавался при испытаниях.

Максимальное линейное рабочее напряжение ВЛ 13,8 кВ  $U_{л.макс} = 15$  кВ<sub>д</sub>. Его амплитудное значение  $U^A_{л.макс} = 15 \times 1,41 = 21,2$  кВ<sub>д</sub>. Разрядники устанавливаются по одному на опору с чередованием фаз. При воздействии индуктированного перенапряжения опасной величины могут сработать два разрядника, установленные на разных фазах. При этом на один разрядник приходится амплитудное максимально возможное напряжение  $U^A_{1.макс} = U^A_{л.макс} / 2 = 21,2 / 2 = 10,6$  кВ. В случае срабатывания одного разрядника на линии 13,8 кВ с заземлённой нейтралью максимально возможное напряжение  $U^A_{1.макс} = U^A_{л.макс} / 1,73 = 21,2 / 1,73 = 12$  кВ, т.е. оно больше, чем в случае срабатывания двух

разрядников на разных фазах. Поэтому такое напряжение применялось при испытаниях, т.е. сеть заряжалась до напряжения  $U_{зар} = 12$  кВ. Ток сети при испытаниях разрядников на 13,8 кВ был 3 кА<sub>д</sub>.

## 6. Результаты испытаний

Сначала разрядники испытывались при воздействии импульсов индуктированных перенапряжений 1,5 кА; 4/12 мкс при параметрах схемы, указанных выше (см. раздел 5). При этом наблюдалось гашение импульсной дуги при отсутствии сопровождающего тока сети, так называемое «гашение в импульсе» (рис. 2б).

Затем подавался импульс 30 кА; 1/50 мкс, имитирующий прямой удар молнии в провод. При этом происходил слив плазменных выхлопов из камер, образование единого канала разряда и протекание тока вне разрядников. Разрядники оставались неповреждёнными и при воздействии импульсов индуктированных перенапряжений обеспечивали гашение в импульсе.

## 7. Выводы

1. Разрядники РМКИ10 и РМКИ13,8 успешно прошли испытания на гашение импульсной дуги, в том числе - после протекания импульсного тока 30 кА, моделирующего прямой удар молнии в провод.
2. После многократных срабатываний эрозия электродов незначительна.
3. Выхлопы плазмы имеют небольшие размеры и не опасны для соседнего оборудования.
4. Время срабатывания меньше, чем у автоматики быстродействующих выключателей.
5. Для РМКИ10 не нужен прокусывающий зажим на проводе.
6. Для него не опасно смещение и кручение провода.
7. РМКИ10 просто устанавливается на ВЛ под напряжением.
8. Разрядник полностью изготавливается в одну запрессовку.
9. Его себестоимость ниже, чем РМК с гашением в нуле.

### Список использованной литературы

1. G. V. Podporkin, E. Yu. Enkin, E. S. Kalakutsky, V.E. Pilshikov, A. D. Sivaev "Overhead Lines Lightning Protection by Multi-chamber Arresters and Insulator-arresters ", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, No. 1, pp.214-221, January 2011.
2. Молниезащита воздушных линий электропередач / Г. В. Подпоркин. – СПб.: ИД «Родная Ладога», 2015.-176 с. : ил.
3. «Lightning Interaction with Power Systems», Volume1: Fundamentals and Modelling, Edited by A. Piantini, IET, 2020, pp. 294-310.
4. G. V. Podporkin, E. Yu. Enkin «Multi-Chamber Disc-Type Lightning Arrester for Medium Voltage Overhead Lines», 35th International Conference on Lightning Protection, 20-26 September 2021 - Sri Lanka.

