

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯДНИК ДЛЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ С РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ 50 кВ

© 2020 г. А. Н. Гусев<sup>а,\*</sup>, А. В. Козлов<sup>а</sup>, А. В. Шурупов<sup>а</sup>,  
А. В. Маштаков<sup>а</sup>, М. А. Шурупов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт высоких температур РАН  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

\*e-mail: a.n.gusev70@mail.ru

Поступила в редакцию 24.04.2019 г.

После доработки 31.08.2019 г.

Принята к публикации 05.09.2019 г.

Описан токосборник с твердотельным разрядником на 268 подходящих и столько же отходящих радиочастотных кабелей РК-50-9 от высоковольтного емкостного накопителя к нагрузке. Разрядник запускается от специального инициатора. В конструкции разрядника имеется ряд элементов, снижающих собственную индуктивность разрядника до 50 нГн, а также повышающих надежность его работы за счет секционирования кабелей (коммутация осуществляется формированием плазменного контакта одновременно в шести точках). Задержка времени срабатывания разрядника составляет ~5.5 мкс при нестабильности времени срабатывания порядка 500 нс.

DOI: 10.31857/S0032816220010140

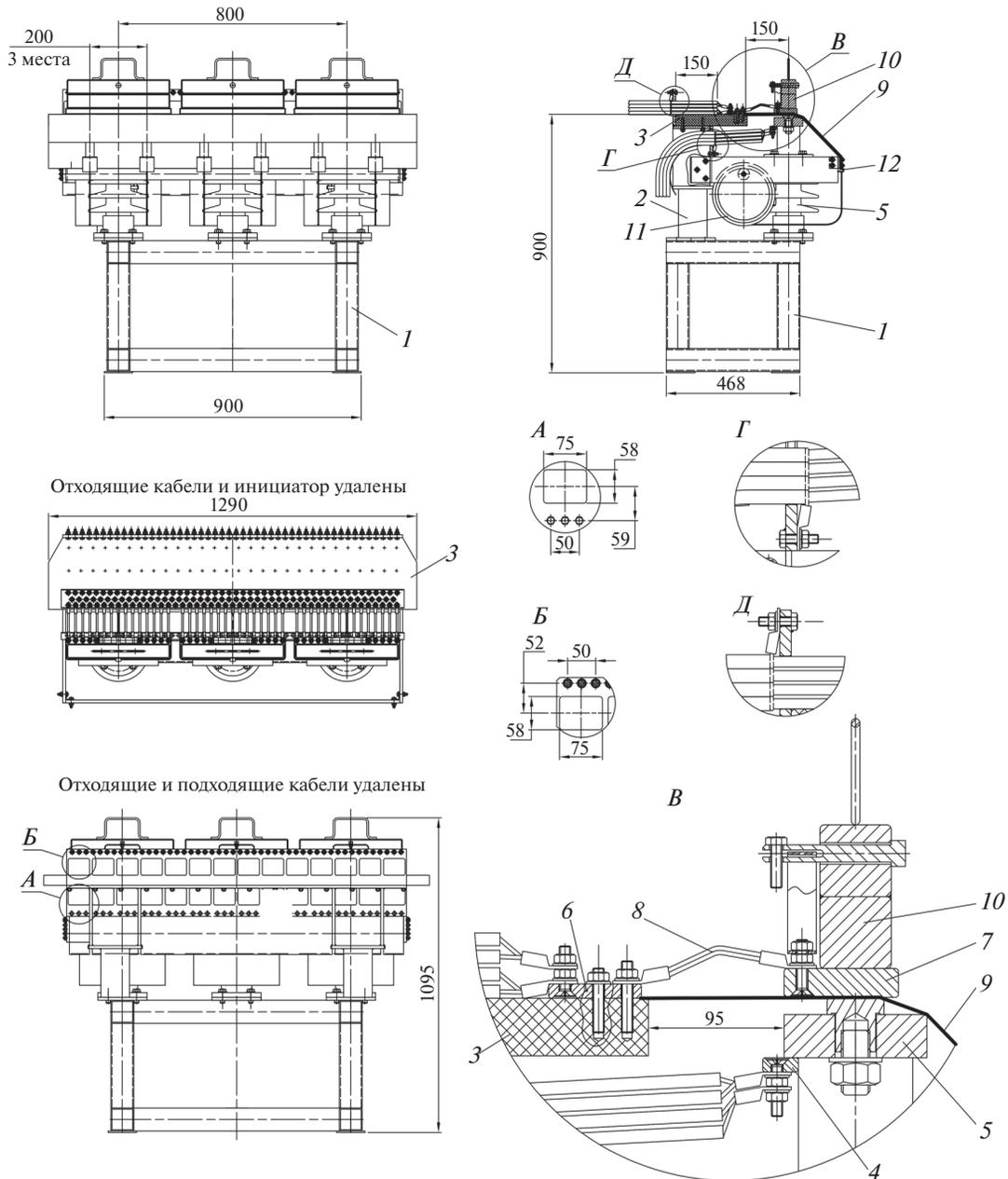
Сильноточный источник питания на основе высоковольтного емкостного накопителя электрической энергии, как правило, должен обладать малой индуктивностью монтажа, что приводит к необходимости коммутации каждого конденсатора как минимум одним радиочастотным кабелем. Ключевым элементом такого источника на основе накопителя является управляемый высоковольтный коммутатор с малым временем срабатывания (<1 мкс), коммутирующий ток амплитудой до 5 МА и выше с минимальной фиксированной задержкой включения.

Основываясь на многолетнем опыте работы с многоканальными газонаполненными и твердотельными разрядниками, можно отметить их главный недостаток на практике – возникновение короткого замыкания при повышении рабочего напряжения. Чтобы повысить надежность работы разрядников, конструкцию сильно усложняют, при этом значительно повышается значение индуктивности устройства. Подтверждение нашим выводам мы нашли в работе [1]. Патентный поиск решений данной проблемы привел к описанию устройства [2], наиболее близкого по электрофизическим характеристикам к тому, что мы разрабатывали. Разрядник позволяет отказаться от сложных технологических операций по смене масляной изоляции и нанесению на твердый диэлектрик металлизированного слоя. Однако он конструк-

тивно не удовлетворяет требованиям нашей задачи, связанной с применением его в импульсных процессах микросекундной длительности. Усовершенствованные твердотельные разрядники, представленные в более современной публикации [3], по совокупности признаков также уступают предложенному нами разряднику.

Исходя из вышесказанного была разработана конструкция нового типа твердотельного разрядника, совмещенного с токовыми коллекторами как для подводящих, так и для отводящих радиочастотных кабелей. Описанный ниже токосборник с твердотельным разрядником предназначен для работы с батареей из 96 конденсаторов ИК-50-3 ( $U_{\text{раб}} = 36$  кВ,  $C_{\text{общ}} = 0.288$  мФ). Сборочный чертеж разрядника представлен на рис. 1, а внешний вид изготовленного токосборника показан на рис. 2, где позиции соответствуют рис. 1.

Основанием токосборника служит рама 1, сваренная из квадратной стальной трубы. К раме приварена дополнительная стальная конструкция 2, являющаяся местом крепления оплеток как подходящих и отходящих радиочастотных кабелей, так и плоского изолятора 3. Подходящие кабели от конденсаторов подведены к нижней части токосборника, а отходящие кабели – к верхней. Для упорядочения и укладки кабелей служат 14 проходных окон (рис. 1, виды А и Б). Под каждым окном установлено по три болта М8, к кото-

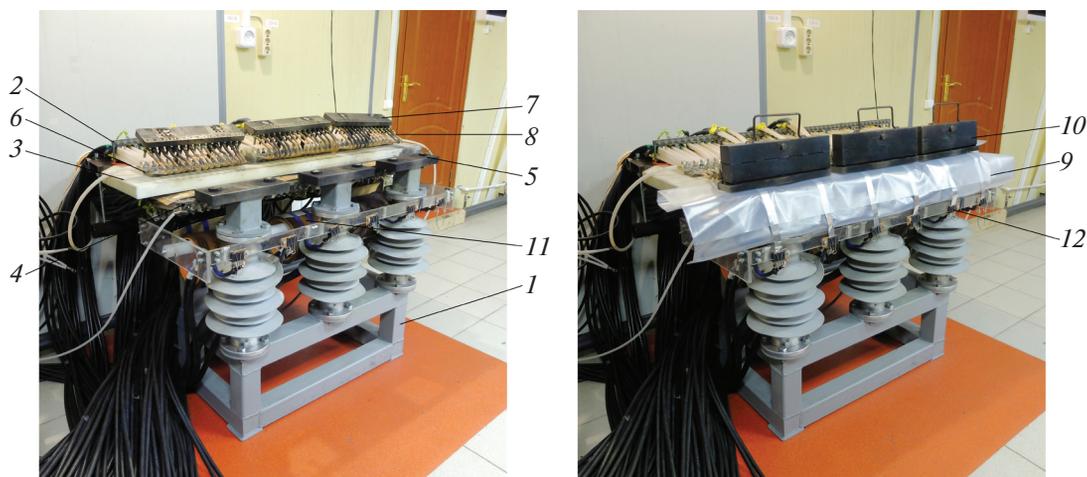


**Рис. 1.** Конструкция разрядника. 1 – рама; 2 – общий электрод коммутации оплеток кабелей; 3 – плоский изолятор; 4 – общая пластина крепления центральных жил подходящих кабелей; 5 – силовая изолированная опора; 6 – общая пластина крепления центральных жил отходящих кабелей; 7 – подвижные контакты; 8 – гибкие мостики; 9 – инициатор; 10 – утяжелитель; 11 – переходный трансформатор; 12 – пружинный зажим.

рым крепятся выводы кабелей (далее “пост”). В каждое из окон может быть уложено по 20 кабелей РК-50-9. Соответственно на каждый пост может быть установлено до четырех выводов (оплетки и центральные жилы кабелей при этом опрессовываются попарно).

В качестве изолятора 3 между подходящими и отходящими пакетами кабелей выступает лист диэлектрика (материал – полиацеталь) толщиной 40 мм. Центральные жилы подходящих кабелей

крепятся на общую пластину 4. Коммутирование подходящих и отходящих кабелей осуществляется через 6 сменных контактов, расположенных попарно на трех силовых изолированных опорах 5, установленных на раме. В качестве изолирующих оснований применены опорные стеклотекстолитовые изоляторы класса 35 кВ. Центральные жилы отходящих кабелей закреплены на общей пластине 6 (вид B на рис. 1), зафиксированной на изоляторе при помощи ряда шпилек. В качестве

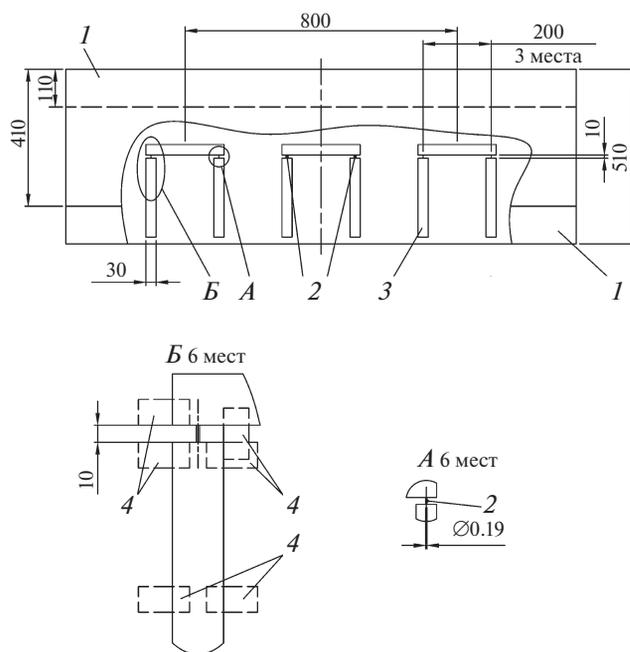


**Рис. 2.** Внешний вид токосборника. 1 – рама; 2 – общий электрод коммутации оплеток кабелей; 3 – плоский изолятор; 4 – общая пластина крепления центральных жил подходящих кабелей; 5 – силовая изолированная опора; 6 – общая пластина крепления центральных жил отходящих кабелей; 7 – подвижные контакты; 8 – гибкие мостики; 9 – инициатор; 10 – утяжелитель; 11 – переходный трансформатор; 12 – пружинный зажим.

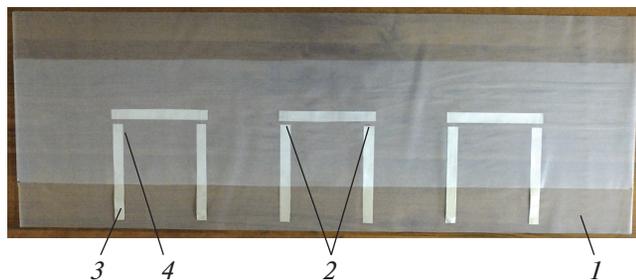
сменных коммутирующих элементов были применены три подвижные пластины 7 из черной стали, соединенные с общей пластиной отходящих кабелей посредством гибких мостиков 8. Основным элементом гибкого мостика является многопроволочный медный кабель заземления в силиконовой изоляции сечением 16 мм<sup>2</sup>. К каждой пластине подведено по 15 мостиков. Между подвижными пластинами отходящих кабелей и шестью сменными контактами, соединенными с подходящими кабелями, укладывается слоистый изолятор 9 (далее “инициатор”), в котором конструктивно заложены элементы его разрушения от блока поджига, что приводит к запуску разрядника. Описание инициатора будет приведено ниже. Разрушение инициатора происходит посредством электровзрыва медных проволочек. При этом при протекании мегаамперного тока через образовавшиеся плазменные контакты в них выделяется значительная энергия. Это приводит к тому, что подвижные пластины “отбрасывает” от силовых изолированных опор, что может приводить к потере контакта между подходящими и отходящими кабелями. Для минимизации этого нежелательного эффекта, на подвижные пластины установлены съемные утяжелители 10, удерживающие пластину на месте до окончания разряда конденсаторной батареи. Ввиду того, что инициатор запускается от отдельного блока поджига со своей конденсаторной батареей, подача импульса тока осуществляется через проходные трансформаторы (1:1) – для гальванической развязки схемы запуска от основного источника питания 11. Контакт между инициатором и вторичной обмоткой переходных трансформаторов обеспечивается с помощью пружинных зажимов 12, установленных на вынесенной вперед диэлектрической

планке. Система управления блоком поджига включена в общую систему управления стендом.

Для обеспечения работы твердотельного разрядника с необходимым быстродействием используется быстрое разрушение изолятора (полиэтилена), расположенного между двумя электродами, соединенными с жилами подводящих и отводящих кабелей. Разрушение изолятора происходит посредством электровзрыва медных проволочек,



**Рис. 3.** Общий вид инициатора. 1 – пакет листов полиэтилена; 2 – иницирующая проволочка; 3 – полосы алюминиевой фольги; 4 – клейкая лента.

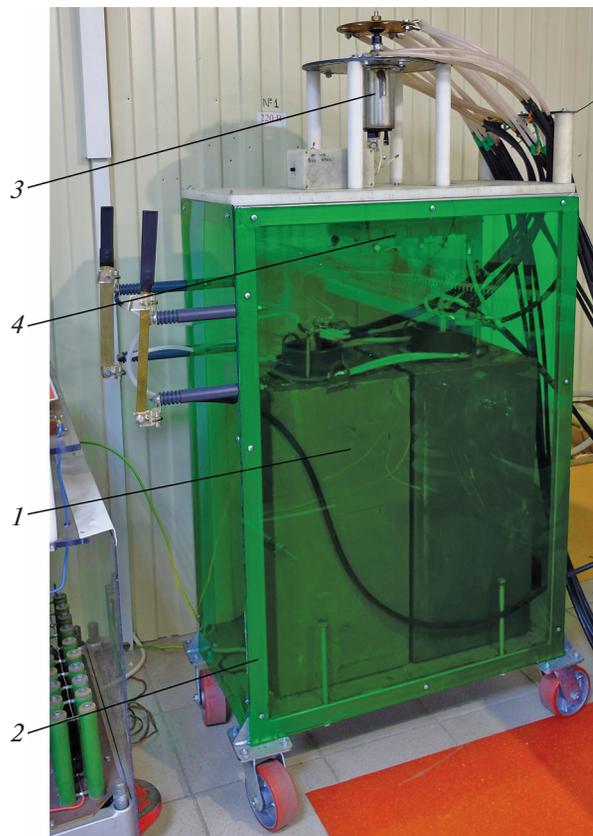


**Рис. 4.** Внешний вид инициатора. 1 – пакет листов полиэтилена; 2 – иницирующая проволочка; 3 – полосы алюминиевой фольги; 4 – скотч.

осуществляемого импульсом тока от генератора на основе игнитронного разрядника ИРТ-6.

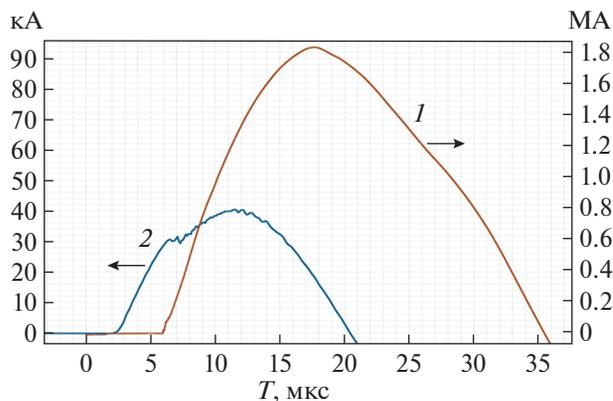
На блок запуска игнитронного разрядника приходит оптический синхроимпульс от общей системы синхронизации. Игнитронный разрядник, в свою очередь, коммутирует емкостный накопитель генератора запуска на первичную обмотку развязывающих трансформаторов, вторичная обмотка которых подключена к подрываемым проволочкам. Взрыв проволочек разрушает полиэтиленовый изолятор и формирует плазменный контакт между электродами одновременно в шести точках. Помимо секционирования разрядника количество точек диктуется необходимостью минимизировать индуктивность разрядника и плотностью тока в каждой точке контакта.

Общий вид инициатора представлен на рис. 3. “Инициатор” представляет собой пакет из четырех листов полиэтилена общей толщиной около 400 мкм (1 на рис. 3). Верхние два листа смещены относительно нижних для удобства соединения между пружинными зажимами и проводниками инициатора. В середину пакета при помощи клейкой ленты закрепляются иницирующие медные проволочки Ø0.19 мм (2), которые располагаются напротив сменных контактов. В качестве проводников, подводящих иницирующий импульс к проволочкам, выступают полосы алюминиевой фольги 3 толщиной 0.1 и шириной 60 мм. В дальнейшем каждая из полос складывается пополам вдоль длинной стороны. Между сложенными краями полосы укладывается конец проволочки. На начальном этапе проволочки относительно фольги держатся только за счет скотча 4, который прижимает верхний край алюминиевой полосы. Схема раскладки полос и крепления их скотчем к листу полиэтилена представлена на рис. 3 (вид Б). Надежный электрический контакт между полосой и проволочкой обеспечивается за счет прижатия утяжелителем при установке на токосборник. При подготовке следующего пуска должна быть проведена замена инициатора. На рис. 4 показан внешний вид инициатора в сборе, где позиции соответствуют рис. 3.



**Рис. 5.** Внешний вид системы иницирования. 1 – блок конденсаторов ИК-25-12; 2 – передвижная платформа; 3 – игнитрон ИРТ-6; 4 – набор разрядных резисторов.

Система иницирования, внешний вид которой показан на рис. 5, представляет собой блок из двух конденсаторов ИК-25-12 (1), установленных на передвижную платформу 2, на ее верхней плите смонтирована схема запуска на основе игнитронного разрядника ИРТ-6 (3). Под верхней



**Рис. 6.** Осциллограммы токов через модельную нагрузку (1) и через проволочки инициатора (2).

плитой установлен набор разрядных резисторов 4 на случай нештатных ситуаций.

Для данной конструкции твердотельного разрядника с блоком поджига удалось добиться задержки времени срабатывания в пределах 5.5 мкс. Применение воздушных тригatronных разрядников в системе запуска уменьшило время задержки до 3 мкс, но повысило вероятность самоходного запуска. Экспериментально показано, что нестабильность времени срабатывания не превышает 500 нс.

Путем секционирования и распараллеливания подводящих и отводящих кабельных линий удалось добиться общей эффективной индуктивности от емкостного накопителя до нагрузки в пределах 50 нГн. В нашем случае нагрузка является, как правило, плазменной, секционирование кабелей позволяет дополнительно симметрировать процесс формирования токовой оболочки.

На приведенных на рис. 6 осциллограммах представлены токи, протекающие через проводочки инициатора и модельную нагрузку.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что предложенная конструкция твердотельного разрядника пригодна для использования его в разрыве кабельных линий в качестве низкоиндуктивного замыкателя для коммутации емкостных батарей на исследуемые плазменные нагрузки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухаров В.Ф., Селемир В.Д., Спиров Г.М., Лобанова И.В. Патент на изобретение RU 2138893 // Оpubл. 27.09.1999.
2. Коршунова Г.С., Махрина В.Н., Пайгина В.М. // Материалы 4-го Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Томск. 1982. Ч. 2. С. 58.
3. Баранов М.И. // Электротехника і електромеханіка. 2009. № 1. С. 55.