

УДК 537.523

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДНИКА МНОГОРАЗОВОГО ДЕЙСТВИЯ

© 2020 г. С. В. Николин¹, С. С. Волков², Т. И. Китаева², *

¹Акционерное общество “Плазма”, Рязань, Россия

²Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования “Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова” Министерства обороны Российской Федерации, Рязань, Россия

*E-mail: kitaeva_46@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Разработаны условия создания мощного электрического дугового разрядника многоразового действия. Экспериментально показана возможность зажигания разряда с помощью маломощного стабильного газонаполненного разрядника с вспомогательным поверхностно-активным резистором и перевода разряда, развивающегося до дугового в атмосфере воздуха, на другой участок разрядного пространства с эрозионно-устойчивыми поверхностями электродов. Разработан и освоен в производстве промышленный дуговой разрядник многоразового действия.

DOI: 10.31857/S0367676520060186

ВВЕДЕНИЕ

Явление дугового электрического разряда используется в газоразрядных приборах большой мощности при коммутации больших токов высокой плотности [1, 2]. Одним из распространенных типов газоразрядных приборов, построенных на использовании дугового разряда, являются электрические разрядники. Они используются в качестве ограничителей случайных напряжений производственной величины и шунтирующих приборов направленного токоотвода. Их работа, как правило, связана с аварийными ситуациями, например, с короткими замыканиями в мощных высоковольтных цепях [3, 4]. Разрядник — двухэлектродный прибор с газовым или вакуумным промежутком устанавливается в действующее электрооборудование, в частности, параллельно участкам цепи, защищаемым от случайного высокого напряжения. При выходе оборудования из строя или попадания стороннего высокого напряжения в разряднике образуется быстродействующий кратковременный дуговой пробой, шунтирующий защищаемый участок цепи и включающий длительно действующую защитную аппаратуру [5].

Изменение состава и геометрии поверхности электродов разрядника в рабочем промежутке в результате электрической эрозии приводит к неизбежному изменению условий последующего срабатывания разрядника или выходу режима срабатывания за пределы допустимых требова-

ний [3–5]. Традиционно сложилось так, что в высокоэнергетических мощных электрических цепях стали использоваться дуговые разрядники разового действия [6]. Необходимые высокая надежность их срабатывания и стабильность характеристик обеспечиваются достаточно просто при их изготовлении. Однако эксплуатационное техобслуживание электрорадиооборудования с разрядниками одноразового действия связана с большими экономическими расходами. Потребность в электрических разрядниках останется даже при самом совершенном электрорадиооборудовании, так как выходы из режимов, пробои, короткие замыкания являются следствиями неустранимых факторов эксплуатации оборудования в экстремальных режимах, внешних случайных воздействий, атмосферного электричества, человеческого фактора.

Целью данной работы являлось формирование условий многократного стабильного зажигания и управления начальной стадией развития дугового разряда для мощных электрических разрядников многоразового действия массового применения.

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАЗРЯДНИКА

Для создания электрического дугового разрядника многоразового действия необходимо бес-

печить трудно совместимые физические условия стабильного срабатывания при напряжении заданной величины и устойчивости поверхности электродной системы к мощным многократным разрядным импульсам. К настоящему времени из-за отмеченной трудности используются дуговые разрядники только разового действия. Поскольку разрядник является прибором формирования искусственного защитного шунтирующего короткого замыкания, то к основным характеристикам относятся величина пропускаемого тока короткого замыкания и длительность его протекания через разрядник, задаваемая постоянной времени срабатывания автоматических систем отключения питания. Так как в течение импульса величина тока меняется, а импульсы во всех случаях являются короткодействующими, то удобно оценивать энергетическую устойчивость разрядника количеством пропускаемого заряда. Количество протекающего заряда во время импульса может быть минимизировано упреждающим иницированием разряда при заданном значении нарастающего напряжения короткого замыкания, поступающего на электроды разрядника. Для дуговых распространенных разрядников разового действия, используемых в контактных сетях, токи короткого замыкания составляют тысячи Ампер, время срабатывания автоматики десятки-сотни миллисекунд, количество пропускаемого заряда сотни Кулон. Особенностью таких токовых импульсов является локальное единовременное выделение импульса без существенного рассеяния не только излучением, но и теплопроводностью и теплопередачей по конструкционным элементам прибора. Локализация выделяющейся энергии на участках контактирования разряда с поверхностями электродов приводит к неизбежному изменению не только их эмиссионных свойств, но и геометрии поверхности и межэлектродного пространства.

Своевременная реакция разрядника на возникающее короткое замыкание обусловлена потенциалом зажигания разряда, который зависит от состава и давления газа в межэлектродном промежутке, от геометрии разрядного пространства, от состояния поверхностей электродов и от поверхностных процессов на начальном этапе разряда [3, 4, 7]. В разряднике, межэлектродное пространство которого сообщается с атмосферой воздуха, потенциал зажигания и развитие разряда зависят от внешних условий и являются нестабильными. Состав газа, обеспечивающий стабильное зажигание разряда, лучше всего сохраняется в замкнутом объеме, но нагрев и плавление поверхностей электродов при разряде сопровождается значительным газовыделением из материалов электродов, что приводит к изменению потенциала зажигания рабочей газовой смеси. Вакуумирование межэлектродного разрядного промежутка с использованием дополнительных устройств поджига дугового

разряда в вакууме, снимает проблему стабилизации состава газовой смеси, но в значительной мере усложняет конструкцию прибора. Кроме того, большие температурно-энергетические воздействия при первом же коротком замыкании и дуговом разряде между электродами нарушают вакуумные условия в приборе, изменяют геометрию межэлектродного промежутка, что приводит к изменению всех исходных условий и характеристик зажигания последующего разряда.

Дуговой разряд обладает свойством шнуrowания. Большие токи создают вокруг разрядной плазмы сильное магнитное поле, стягивающее плазму разряда в шнур и создающее высокую плотность тока на поверхностях электродов с преимущественно электронным током на аноде и ионным током на катоде. Большая кинетическая энергия ионной составляющей приводит к распылению поверхности катода, к его нагреву, испарению, плавлению поверхностного слоя. В результате разрядного импульса изменяется состав поверхности катода, его работа выхода и другие электронные свойства, геометрия поверхности, межэлектродное расстояние. Распыление и испарение изменяют эмиссионные и другие характеристики поверхности анода. Такие изменения, как правило, выводят характеристики зажигания следующего разрядного импульса за пределы допустимых величин. Несопоставимость условий зажигания разряда и энергетических характеристик повторных импульсов при создании многоразового разрядника вызывает необходимость разделения места зажигания разряда и места выделения основной его энергии. При таком способе построения разрядника необходимо обеспечить стабилизацию напряжения зажигания разряда, отвод разряда в начальный период развития на другой участок межэлектродного промежутка разрядника, локализацию разряда на участке устойчивого горения и устойчивого состояния поверхностей электродов к выделяемой мощности.

Стабильные условия зажигания разряда в других газоразрядных устройствах часто обеспечиваются дополнительными поджигающими электродами, с которых разряд переходит на основные электроды, например в дугоплазмотронных источниках ионов. Такой способ зажигания в едином газовом пространстве с обеспечением высокой стабильности напряжения зажигания ставит прецизионные условия к материалу поверхности катода [6–9]. Они обеспечиваются применением полых цилиндрических катодов большой площади с равномерной температурой эмиттирующей поверхности и равномерным составом поверхностной пленки с высокими эмиссионными свойствами, и соответственно равномерным распределением токовой нагрузки по эмиттирующей площади. Массовое использование разрядников во всепогодных условиях выдвигает требование к простоте и надежности конструкции.

Разделение места зажигания разряда и места максимальной отдачи энергии позволяет использовать наиболее простой способ реализации дугового разряда — в атмосфере воздуха с использованием не вакуумированной электродной системы для разрядного промежутка.

В атмосфере воздуха можно обеспечить относительно стабильный процесс горения дугового разряда, однако для зажигания разряда при заданном напряжении необходимо специальное устройство, расположенное вне пределов действия дугового разряда при максимальной отдаче энергии. Назначением такого устройства является формирование ионизованного канала в атмосфере воздуха между электродами разрядника при заданной величине в сотни вольт нарастающего напряжения короткого замыкания. В локально ионизованном канале под действием напряжения короткого замыкания произойдет быстротекущее лавинное нарастание разряда до дугового. При этом на начальном этапе развития межэлектродного разряда, когда выделяемая энергия на электродах мала и не разрушительна для поверхностей электродов, необходимо отвести нарастающий разряд на другой участок межэлектродного пространства, который не участвует в зажигании разряда и энергетически более устойчивый к дуговому разряду.

Перемещение разряда от места зарождения на другой участок можно эффективно осуществлять собственным магнитным полем тока разряда, как суммы электронного и ионного токов. Направленное перемещение плазмы разряда осуществляется силой асимметрии собственного магнитного поля и магнитного поля подводющих проводников, а в целом, конфигурацией магнитного поля контура тока разряда и подводющих проводников по принципу выталкивания несвязанного разряда как участка тока в наружном направлении из контура [5–8]. Сила сопротивления, противодействующая перемещению разряда, возбуждается работой по перемещению катодного конца разряда, связанной с формированием нового эмиттирующего участка поверхности, способного поддерживать малое падение прикатодного потенциала [9–11]. В энергетическом выражении сопротивление обусловлено увеличением прикатодного падения потенциала разряда при перемещении катодного пятна разряда на новый участок поверхности. При малой мощности разряда на начальном этапе поверхности электродов не распыляются, не изменяются, остаются в исходном состоянии, и сила сопротивления перемещению разряда стремится к нулю. Большая магнитная сила, в сравнении с малым катодным сопротивлением, перемещает появившийся разряд еще в начальной маломощной стадии из места с несимметричным магнитным полем в место симметричного поля.

Формирование ионизованного канала в атмосфере воздуха между электродами для зажигания начальной стадии дугового разряда можно осуществить электростимулированной ионизацией [11] газа на поверхности высокоомного сопротивления при пропускании через него тока и при падении напряжения на нем меньше напряжения зажигания разряда дуги. Поверхность такого сопротивления, расположенная между электродами, создает ионизованный мост между электродами. И если падение напряжения на поверхности резистора меньше напряжения между электродами, а концы резистора близко расположены к электродам, то между электродами по ионизованной атмосфере вдоль поверхности резистора образуется электрический разряд, который сразу же оказывается независимым от поверхности резистора и оказывается под действием сил магнитного поля контура собственного тока.

Подачу ионизирующего тока на резистор можно осуществить через прецизионный газонаполненный разрядник, рассчитанный на заданную величину напряжения зажигания, соединенный последовательно с резистором и расположенный произвольно вне межэлектродного пространства. Цепочка резистор с газонаполненным разрядником соединена между электродами основного разрядника и находится под напряжением короткого замыкания. После зажигания дугового разряда в основном разряднике напряжение между его электродами уменьшается до значения ниже напряжения горения газонаполненного разрядника, и последний отключается.

Так как длительность разрядного импульса не превышает десятых долей секунды, то при ресурсе дугового разрядника до 50 срабатываний временной ресурс работы разрядника не достигает и десяти секунд, поэтому нет необходимости разработки специальных условий его отключения после зажигания разряда. Его отключение произойдет по окончании тока дугового разряда.

Длительность зажигания дугового разряда складывается из времени зажигания газонаполненного разрядника, времени ионизации приповерхностной атмосферы резистора, времени захвата разряда от резистора электродами основного разрядника, времени перемещения разряда от резистора в место максимальной отдачи мощности.

ЭКСПЕРИМЕНТ

На основе рассмотренных условий был разработан экспериментальный дуговой разрядник многофазового действия, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Дуговой разрядник содержит катод 5, анод 4 полусферической формы с тугоплавкими вставками 1 и с электрическими выводами 11 и 12, газонаполненный разряд-

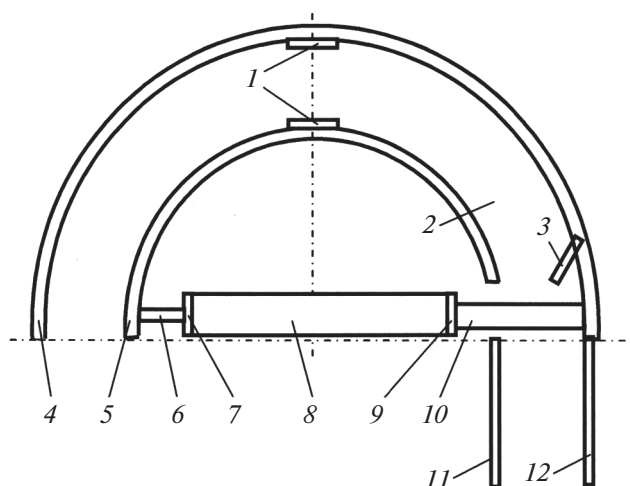


Рис. 1. Схема построения электрического дугового разрядника многоразового действия: 1 – тугоплавкие вставки; 2 – межэлектродное пространство; 3 – съемник разряда; 4 – анод; 5 – катод; 6 – проводник; 7 – катод газонаполненного разрядника; 8 – газонаполненный маломощный разрядник; 9 – анод газонаполненного разрядника; 10 – поверхностно-активный резистор; 11 – электрический вывод катода; 12 – электрический вывод анода.

ник 8 с катодом 7 и анодом 9, поверхностно-активный высокоомный резистор 10, соединенный с анодами 4 и 9 и расположенный в межэлектродном промежутке дугового разрядника. В межэлектродном пространстве 2 расположена наклонная пластина 3, создающая расширяющееся пространство от поверхности резистора 10, близко расположенная к поверхности резистора 10 и сужающая межэлектродное пространство основного разрядника. Катод 7 газонаполненного прецизионного разрядника соединен проводником 6 с катодом 5 дугового разрядника.

При поступлении и нарастании напряжения короткого замыкания на выводах 11 и 12 под напряжением оказывается разрядный промежуток “катод 7–анод 9” газонаполненного разрядника 8. При достижении заданного напряжения зажигания разрядника, например 500 В, происходит пробой, и в разряднике 8 зажигается разряд. Ток разряда проходит по резистору 10 и создает ионизованный слой газа вдоль его поверхности. Так как разность потенциалов между электродами 4 и 5 больше, чем падение напряжения на резисторе 10, то поверхностный резисторный разряд переходит с анода 9 на анод 5, а с другого конца резистора на вспомогательный электрод 3. При этом поверхностный несамостоятельный разряд вдоль резистора 10 переходит в самостоятельный разряд между электродами 4 и 5. Отсутствие внешнего ограничительного сопротивления в цепи разряда приводит к нарастанию тока между электродами до формирования дугового разряда. В начальный

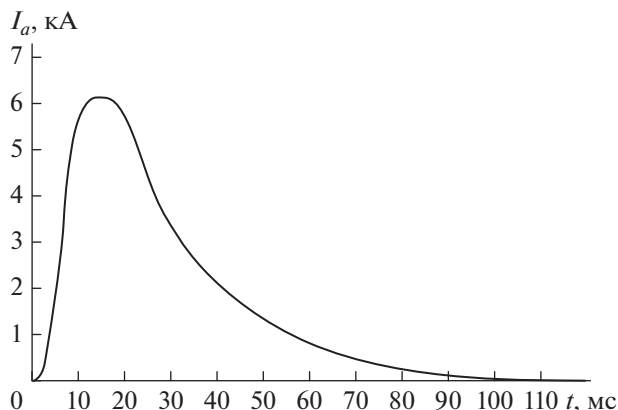


Рис. 2. График зависимости тока анода разрядника I_a , кА от времени t , мс при коротком замыкании контактной сети.

момент развития после отделения разряда от поверхности резистора 10 и образования прямого разряда между электродами 4 и 5, последний оказывается под действием магнитных сил, действующих со стороны выводов 11 и 12, превышающих действие магнитного поля со стороны межэлектродного пространства 2. Асимметрией магнитных сил разряд перемещается на участок с симметричным распределением поля в область расположения тугоплавких вставок 1.

Измерения характера изменения тока дугового разряда за время импульса тока короткого замыкания показали (рис. 2), что скорость нарастания тока дугового разряда ограничивается естественной индуктивностью линий электропитания и составляет, например, для контактных цепей, до 1 МА/с. Измерения тока импульса проведены для напряжения начала пробоя, задаваемого газонаполненным разрядником, равного 1500 ($\pm 10\%$) В. Испытания дугового разрядника проводились также с газонаполненными разрядниками с напряжениями зажигания 500, 1000, 1500, 2000, 2500 В. Количество пробоев составляло 20–50. Измерения напряжения пробоя проводились после каждых пяти пробоев. Во всех случаях напряжение пробоя оставалось на заданном уровне в пределах менее $\pm 10\%$. При времени срабатывания автоматических средств отключения питания 10–20 мс ток разрядника может достигать до 10 кА. Существенную долю энергии в дуговой разряд искусственного короткого замыкания вносит реактивная энергия цепей питания. Из рис. 2 видно, что при полном количестве пропускаемого заряда через разрядник порядка 1000 Кл более 60% поступает как результат накопленной индуктивной энергии внешней электрической цепи. Как показали испытания, выход приборов из строя обусловлен разрушением электродов на участке выделения энергии дугового разряда. Устройство зажигания,



Рис. 3. Внешний вид промышленных дуговых разрядников многоразового действия. Длина разрядника с выводами 255 мм.

содержащее газонаполненный разрядник, резистор, направляющую пластину и края электродов, захватывающие разряд с поверхности резистора, остается работоспособным и после разрушения центральной части электродов дуговым разрядом. Надо отметить, что ресурс работы разрядника в 20–50 пробоев при защитных функциях от короткого замыкания, по общему времени эксплуатации превышает регламентное время профилактического ремонта основного оборудования.

На основе проведенных исследований впервые разработан промышленный вариант дугового разрядника многоразового действия (рис. 3) и передан в серийное производство и широко используется в контактных электрических сетях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность управления начальным процессом зажигания дугового

разряда и перемещения разряда в межэлектродном промежутке от места зарождения разряда на эрозионно-устойчивый участок. Показана возможность зажигания разряда на этапе нарастания напряжения короткого замыкания с помощью цепи из газонаполненного маломощного разрядника и поверхностно-активного высокоомного резистора. Перемещение разряда осуществляется магнитным полем контура тока разряда. Защита устройства зажигания от выделяющейся энергии дугового разряда позволяет использовать разрядник до 50 раз. Разработанные условия зажигания и выделения энергии дугового разряда позволили впервые создать промышленный электрический дуговой разрядник многоразового действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайнутдинов К.С., Николин С.В., Николокин Ю.В., Самородов В.Г.* Коммутирующее устройство. Пат. РФ № 2366051, кл. H01T1/20. 2008.
2. *Гайнутдинов К.С., Николин С.В., Николокин Ю.В., Самородов В.Г.* Коммутирующее устройство. Пат. РФ № 2327265, кл. H01T1/20, H01T2/02. 2007.
3. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Т. 1. Общие вопросы электродинамики газов. М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. 432 с.
4. *Грановский В.Л.* Установившийся ток М.: Наука, 1971. 542 с.
5. *Миткевич В.Ф.* Магнитный поток и его преобразования. М.: Ленанд, 2016. 360 с.
6. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
7. *Волков С.С., Николин С.В., Пузевич Н.Л.* Электрические и магнитные потенциалы. Рязань: РВВДКУ, 2013. 110 с.
8. *Волков С.С., Пузевич Н.Л., Николин С.В.* Физические основы генерации электрической энергии. Рязань: РВВДКУ, 2016. 366 с.
9. *Волков С.С., Пузевич Н.Л., Дмитриев В.В. и др.* Физические основы образования гальванического электричества. Рязань: РВВДКУ, 2016. 300 с.
10. *Волков С.С., Аристархова А.А., Дмитриевский Ю.Е. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 2. С. 158; *Volkov S.S., Aristarchova A.A., Dmitrevskiy Y.E. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 2. P. 138.
11. *Волков С.С.* Эмиссионная электроника. Уч. пособие. Рязань: РГРУ, 2017. 84 с.