

Формирование выброса ионизированных газов из камеры электрических аппаратов

АПОЛЛОНСКИЙ С.М., КУКЛЕВ Ю.В.

При формировании выброса ионизированных газов из камеры электрических аппаратов учтено, что при больших токах отключения дуга является мощным источником электромагнитного и теплового излучения. Ствол дуги представляет собой область, занятую плазмой с высокой температурой и низкой плотностью, и является мощным источником теплового и светового излучения. Под действием теплового излучения дугой происходит нагрев газа и его ионизация. Степень ионизации зависит не только от значения тока дуги, с ростом которого повышается плотность потока излучения, но и от скорости перемещения дуги. В последнем случае поток излучения увеличивается за счет сдвига максимальной температуры дуги ближе к переднему фронту. В статье рассмотрены различные виды дугогасительных и пламегасительных решёток, которые могут быть рекомендованы для использования в современных электрических аппаратах. Они позволяют уменьшить время горения электрической дуги, быстрее восстановить электрическую прочность в объеме камеры, тем самым подготовив ее за короткий промежуток времени к повторению операции «включение-отключение».

Ключевые слова: электрические аппараты, электрическая дуга, ионизированные газы, дугогасительные и пламегасительные решетки, восстановление электрической прочности

Возникающая при разрыве контактов в электрических аппаратах (ЭА) электрическая дуга является газообразным проводником тока. На этот проводник действует магнитное поле (МП), создавая силу, пропорциональную индукции поля и току в дуге; действуя на дугу, МП увеличивает ее длину и перемещает элементы дуги в пространстве. Поперечное перемещение элементов дуги создает интенсивное охлаждение, что приводит к повышению градиента напряжения столба дуги. При движении дуги в среде газа с большой скоростью возникает расслоение дуги на отдельные параллельные волокна, причем чем длиннее дуга, тем сильнее происходит ее расслоение. Дуга является чрезвычайно подвижным проводником. Известно, что действующие на токоведущую часть силы стремятся увеличить электромагнитную энергию контура. Поскольку энергия пропорциональна индуктивности, то дуга под действием собственного поля стремится образовывать витки, петли, так как при этом возрастает индуктивность цепи. Указанная способность дуги проявляется тем сильнее, чем больше ее длина.

Движущаяся в воздухе дуга преодолевает аэродинамическое сопротивление воздуха, которое зависит от диаметра дуги, расстояния между электродами, плотности газа и скорости движения. Опыт показывает, что во всех случаях в равномерном МП дуга движется с постоянной скоростью. Следовательно, электродинамическая сила уравновешивается силой аэродинамического сопротивления. Для создания эффективного охлаждения необходи-

мо, чтобы дуга с помощью МП втягивалась в узкую щель (диаметр дуги больше ширины щели) между стенками из жаростойкого материала, обладающего высокой теплопроводностью. Из-за увеличения теплоотдачи стенкам щели градиент напряжения в столбе дуги значительно выше, чем у дуги, свободно перемещающейся между электродами. Это дает возможность сократить необходимую для гашения длину дуги и время гашения.

Гашение электрической дуги в аппаратах низкого (до 1000 В) напряжения является одной из актуальных проблем. В дугогасительной камере выделяются светящиеся газы, занимающие большой объем и представляющие собой пламя дуги [1]. Причина возникновения выброса пламени — в высокой скорости ионизированного газа, образовавшегося в результате распада дуги. Процессы деионизации, сопровождающие движение плазмы, при этом незначительны. Обладая высокой степенью ионизации, газ вылетает из камеры аппарата в свободное пространство, создавая сильный выхлоп, и занимает большой объем. В нем одинаковая концентрация положительных и отрицательных частиц, поэтому пространственный заряд пламени практически равен нулю. Большая концентрация заряженных частиц способствует увеличению проводимости пламени, что приближает его по свойствам к проводнику. Присутствие паров меди в пламени способствует его поддержанию в течение сотых и даже десятых долей секунды после распада дуги. Борьба с пламенем именно этого рода — одна

из важнейших задач при построении дугогасительных устройств.

Высокая проводимость пламени дуги может вызвать при напряжении несколько десятков вольт перекрытие таких промежутков, которые в нормальных условиях не пробиваются при десятках тысяч вольт. В этом главная опасность пламени. Вторая опасность связана с высокой температурой. Температура пламени ниже, чем температура в самой дуге, однако достаточна для воспламенения легкогорючих материалов или газов, присутствующих в пожароопасных производствах. В пламени дуги происходят опасные для аппаратов химические процессы. Пары меди контактов, попадая в пламя дуги, окисляются при высокой температуре и поглощают кислород воздуха. Оставшийся после этого азот соединяется с парами воды и кислородом, образуя азотную кислоту. Капли кислоты могут образовывать проводящие контактные перешейки и приводить к опасным перекрытиям между токоведущими частями в таких местах, куда ни дуга, ни ее пламя не могут попасть.

Дугогасительная система должна удовлетворять следующим требованиям [8]: заданной коммутационной способности, т.е. значению отключаемых и выключаемых токов при заданных условиях; минимальному времени горения дуги с целью уменьшения износа контактов и дугогасительной камеры; отсутствию недопустимых перенапряжений; минимальным размерам дугогасительной системы и минимальному выбросу пламени и ионизированных газов, могущих вызвать пробой изоляции между частями аппарата и комплектного устройства; минимальным, в первую очередь звуковому и световому, эффектам.

Ниже рассмотрены способы формирования выхлопной системы ЭА, способствующие снижению ионизированной зоны выброса.

Дугогасительные устройства со щелями. В дугогасительных устройствах с широкими продольными щелями дуга и ее пламя занимают чрезвычайно большой объем за пределами камер [2]. Высокая степень ионизации выброса не позволяет токоведущим частям находиться вблизи аппарата. По этой причине увеличиваются размеры комплектных устройств (главным образом закрытых) в 2—2,5 раза по отношению к тем, какие требуют геометрические размеры аппаратов и монтажные схемы их соединений.

Весьма эффективным способом гашения электрической дуги является применение узких продольных щелей и дугогасительных решеток, благодаря которым достигается и некоторое ограничение размеров пламени дуги. Размеры пламени существенно меньше в камере с узкой зигзагообразной щелью. Однако погасить пламя в объеме каме-

ры посредством узких щелей и дугогасительных решеток невозможно. Высота пламени практически не зависит от пути, проходимого дугой по щели, а определяется главным образом шириной щели. Очень узкие щели делать нельзя, так как для предотвращения остановки дуги со всеми вытекающими пагубными последствиями необходимо создать большие значения напряженности МП, что требует весьма громоздких устройств.

Эффективным способом борьбы с пламенем электрической дуги является установка решетки из теплопроводящих металлических пластин над узкой щелью камеры [2]. Получаемая при этом комбинированная система дугогашения, состоящая из камеры с узкой щелью и пламегасительной решетки небольших размеров ($h=5\div 20$ мм), позволяет достичь полной деионизации дуги и ее пламени в объеме дугогасительных устройств при отключении токов, весьма больших значений как в контакторах, так и в автоматических выключателях.

Рекомбинация ионов пламени дуги здесь происходит во время их соприкосновения с металлическими пластинами решетки. Высокие значения теплоемкости и теплопроводности пластин, весьма сильно развитая поверхность их соприкосновения с пламенем и, наконец, довольно значительное расстояние, которое пламени приходится проходить вдоль пластин, способствуют его полной деионизации. Рекомбинация ионов у поверхности холодных металлических пластин происходит гораздо интенсивнее, чем у поверхности диэлектрика. Помимо рекомбинации у поверхностей здесь усиливается рекомбинация ионов в объеме из-за сильного понижения температуры пламени во время его движения вдоль пластин решетки. Важно отметить, что более существенной является длина пластин (пути газов вдоль пластин), нежели их ширина. В рассмотренной системе гашение дуги осуществляется в узкой щели, а деионизация пламени дуги — в металлической решетке. В этом случае, если зона выброса и существует, то она незначительна. Размер камер аппаратов практически не увеличивается. Размеры же закрытых комплектных устройств существенно сокращаются.

Следует отметить, что для камер с узкими щелями и закрытых дугогасительных устройств требуются более дугостойкие материалы (асбоцемент, керамика). Износ таких камер выше, чем камер с широкими щелями. Более эффективное гашение сопровождается большими перенапряжениями в момент погасания дуги. В системе гашения дуги при использовании дугогасительной решетки также применяются пламегасители для борьбы с выбросом ионизированного газа из камеры.

Дополнительно в дугогасительных устройствах используется внешнее магнитное поле, с помощью

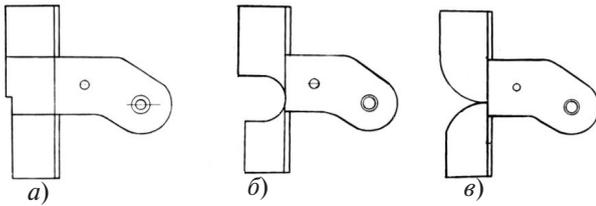


Рис. 1. Конфигурации боковых щек: а – серийная; б – с округленным вырезом; в – лямбдаобразным вырезом

которого можно осуществлять эффективное гашение дуги. Кроме того, этим внешним магнитным полем можно управлять. В качестве примера можно привести исследования [1], выполненные авторами на контакторе КМ2000. Для уменьшения времени гашения дуги была изменена конфигурация магнитопроводов (боковых щёк).

На рис. 2 представлены кривые, отражающие характер распределения магнитной индукции в полости камеры по вертикальной оси в зависимости от форм вырезов, сделанных в боковых щёках.

Как видно, с помощью этого простого технического решения уменьшается поток индукции в промежутке между неподвижными контактами и увеличивается в области интенсивного дугогашения. На основании этих результатов в контактно-дугогасительное устройство серийного исполнения внесены необходимые изменения. В боковых щёках системы магнитного дутья выполнены лямбдаобразные вырезы.

Предложенное техническое решение способствовало не только усилению магнитного потока в полости камеры, но и снижению материалоемкости дугогасительного устройства.

Пламегасительные решетки. Газодинамические процессы значительно усложняются, если за дугогасительной решеткой на некотором расстоянии расположена пламегасительная решетка. Она мо-

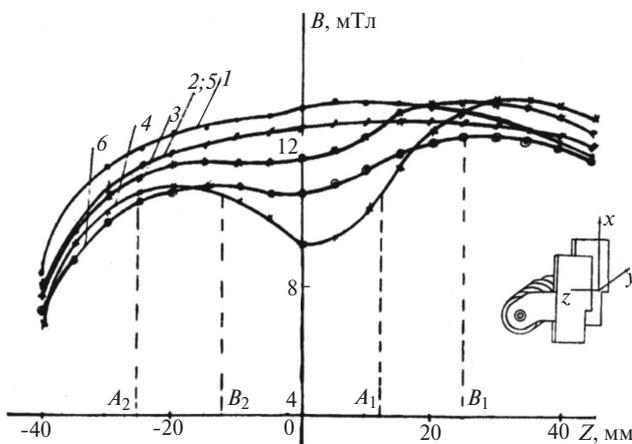


Рис. 2. Влияние формы боковых щек на распределение магнитной индукции: 1, 2 – $B(24, 0, Z)$; $B(10, 0, Z)$ – боковые щёки серийного исполнения; 3, 4 – $B(24, 0, Z)$; $B(10, 0, Z)$ – боковые щёки с округленным вырезом; 5, 6 – $B(24, 0, Z)$; $B(10, 0, Z)$ – боковые щёки с лямбдаобразным вырезом

жет влиять как на движение дуги в области между контактами и дугогасительной решеткой, так и на движение частичных дуг в решетке.

В процессе распада дуги в дугогасительной камере образуется избыточное давление ионизированных газов. В результате возникшего перепада давления ионизированный газ выбрасывается из камеры в свободное пространство, проходя через пламегаситель. Кроме того, на скорость выброса влияют силы Лоренца и Кулона, которые возникают в результате действия индукции магнитного поля на заряженную частицу и взаимодействия между частицами.

Пламегасительная решетка, обтекаемая потоком ионизированного газа, обладает газодинамическим сопротивлением, препятствующим движению плазмы. Это влияет не только на скорость истечения газа, но и на процесс теплообмена в камере и даже на повторные зажигания между пластинами дугогасительной решетки и у входа в нее (рис. 2). Увеличение отдачи тепла плазмой стенкам камеры и пластинам решетки уменьшает степень ионизации зоны выброса.

На рис. 3 показана сложная картина газодинамического процесса. Фотография получена при исследовании газодинамических процессов в ударной газодинамической трубе. Длина первой решетки (дугогасительной) равнялась 45 мм, пламегасительной – 20 мм. Расстояние между решетками составляло 20 мм. Проницаемость обеих решеток соответствовала $\alpha = 0,9$, давление падающей волны $P = 80$ Па.

Задача дугогасительных устройств аппаратов, особенно контакторов, – не только быстро погасить дугу, но и быстро восстановить электрическую прочность в объеме камеры, т.е. подготовить дугогасительную камеру за короткий промежуток времени к повторению операции ВО (включение-от-

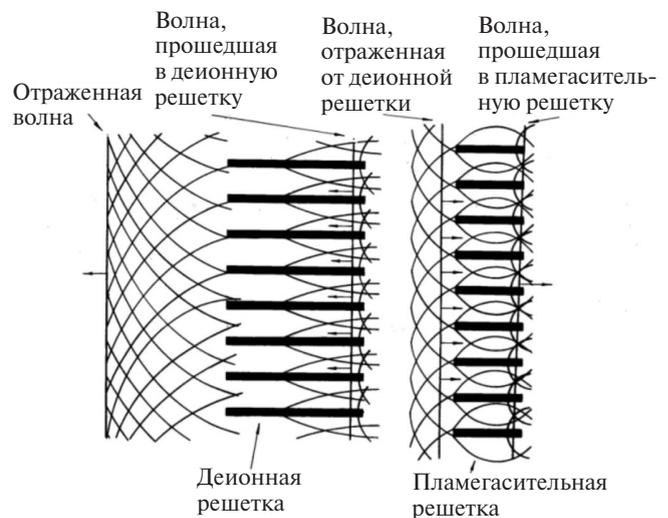


Рис. 3. Влияние пламегасительной решетки, расположенной за дугогасительной, на газодинамические процессы [3]

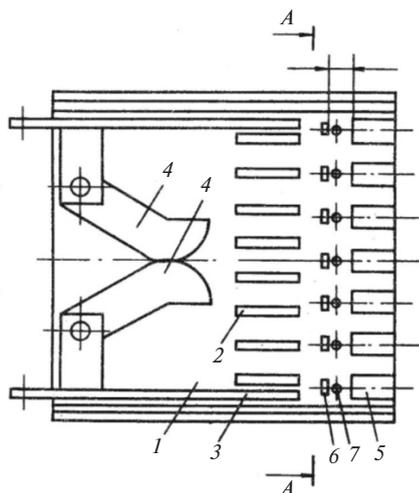


Рис. 4. Дугогасительная камера, содержащая дополнительные отверстия

ключение). С этой целью в автоматическом выключателе [4] между решетками выполнялись отверстия, предназначенные для соединения внутренней полости дугогасительной камеры с атмосферой или с резервуаром, содержащим пламегасящее вещество (рис. 4). Это мероприятие понижает газодинамическое сопротивление пламегасителя и повышает теплообмен.

Дугогасительные решетки с увеличенным теплообменом. С целью снижения размеров дугогасительной камеры в ЭА, применяемых в автономных энергоустановках (на транспортных объектах, в горнорудной промышленности и т.д.), дугогасительные решетки снабжаются рядом конструктивных элементов, которые способствуют принудительному гашению или гашению с оказанием воздействия на ток дуги. В качестве таких конструктивных элементов могут использоваться: электромагниты, создающие магнитное дутьё; многослойные решетки со смещением входных каналов и каналов выхлопа; специальные материалы для стенок, выделяющие газы, способствующие затуханию дуги и т.д.

Борьбу с выбросом ионизированных газов следует вести, когда дуга вошла в дугогасительную ре-

шетку. На данном этапе возникает задача: как можно дольше удержать частичные дуги в решетке.

Для низковольтных коммутационных аппаратов была разработана дугогасительная камера с высокоэффективным гашением дуги [5, 6]. В пластинах делались вырезы, решетка собиралась таким образом, чтобы вырезы на чередующихся пластинах были развернуты на 180° относительно друг друга. На рис. 5,а показана дугогасительная камера с решеткой, на рис. 5,б — изолированная пластина, на рис. 5,в — вид собранной решетки.

Каждая пластина 3 имеет на боковых гранях выступы 4, входящие в пазы пластины 2 и паз 5 в своей нижней части. В пазу 5 размещались контакты, которые на рисунке не показаны. В пластине сделаны два выреза 6 и 7. Сложный вырез 6 состоит из двух параллельных боковой грани канавок, размещенных на разном расстоянии от ребер участков, соединенных наклонным участком 8. Концы прорези 6 отогнут в направлении выступа 4 и перекрывают часть пластин между пазом и боковой кромкой. Прорезь 7 выполнена с наклоном к оси пластины, причем верхний ее конец размещен в зоне наклонного участка 8 прорези 6, а нижний в районе выступа 4.

Электрическая дуга, возникающая при размыкании контактов, размещенных в пазу 5, входит в решетку, частичные дуги перемещаются в ней. При подходе частичных дуг к краям прорезей образуется единая зигзагообразная электрическая дуга, на поддержание которой дополнительно расходуется тепловая энергия, что ускоряет распад дуги. Сделанные на пластинах вырезы перераспределяют скопления электронов и изменяют внешнее электрическое поле, что облегчает входение дуги в решетку.

Патентные исследования отечественных и зарубежных специалистов с целью изыскания конструктивных решений позволяют увеличить продолжительность пребывания частичных дуг в решетках. Ряд положительных решений были предложены фирмами ФРГ [5, 7]. Ими рекомендовалось делать в произвольной форме ряд вырезов на пластинах или использовать перфорированные пластины, т.е. пластины с отверстиями в их нижней части. Это способствовало увеличению времени пребывания частичных дуг в решетке.

Дугогасительные решетки с минимизированной ионизированной зоной выброса. Опыты по исследованию ограничения выброса ионизированного газа проводились на установке, схема которой представлена на рис. 6 [7]. Дуга возбуждалась между параллельными электродами 1 длиной 500 мм, расположенными в изоляционной щели шириной 20 мм. Одна из стенок, образующих щель, была стеклянной. Это дало возможность наблюдать дугу в ре-

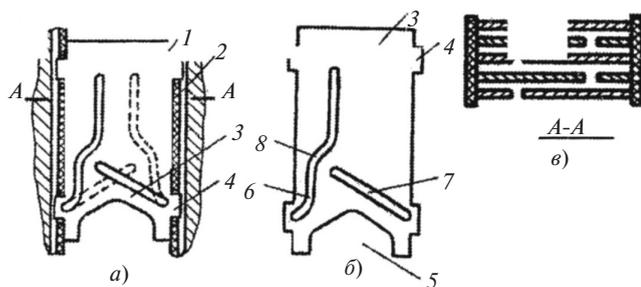


Рис. 5. Дугогасительная камера с измененным видом пластин решетки для аппарата АКЗ

шетке и зону выброса ионизированных газов. Расстояние между электродами 34 мм. В щели устанавливалась решетка 2, состоящая из набора медных пластин длиной 250 мм и толщиной 2 мм.

Дуга двигалась под действием собственного магнитного поля электродов и внешнего магнитного поля, создаваемого параллельными катушками 3. С помощью внешнего магнитного поля ($B=0,09$ Тл) дуга втягивалась в решетку и гасла. Образовавшийся ионизированный газ выбрасывался в сторону двух металлических сеток 4. Первая сетка с ячейкой 5 мм располагалась на расстоянии 75 мм от верхних торцов пластин решетки, вторая с ячейкой 3 мм – на расстоянии 25 мм от первой сетки; толщина сеток 2 мм. Отрицательный потенциал подавался только на первую сетку через ограничительное сопротивление R от катода установки (рис. 6). Значение R изменялось от 200 до 400 Ом. Внешнее магнитное поле охватывало область расположения обеих сеток. Отключение осуществлялось при токе 27 кА и напряжении 220 В.

Во время опытов электронным осциллографом регистрировались значения напряжения на сетках и ток на электрических зондах, которые характеризовали степень ионизации плазмы как под первой сеткой, так и над второй. Зонд представлял собой две медных проволоочки диаметром 1,5 мм, отстоя-

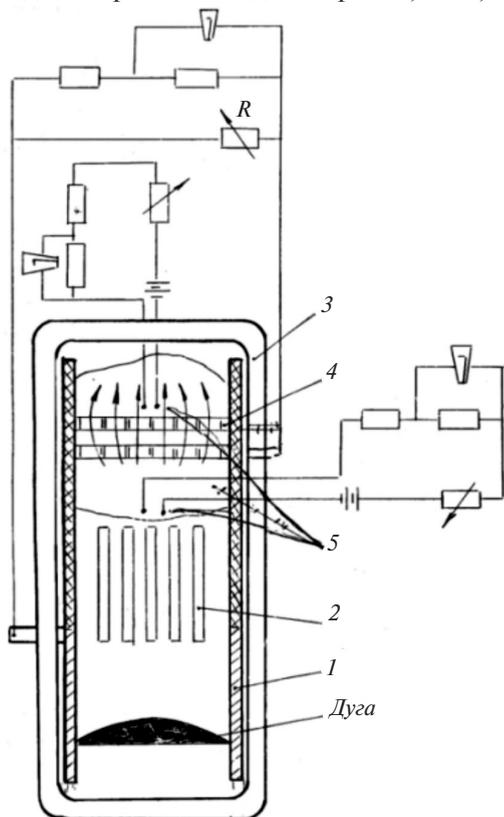


Рис. 6. Экспериментальная установка и измерительные цепи: 1 – электроды; 2 – дугогасительная решетка; 3 – катушка внешнего магнитного поля; 4 – пламегаситель; 5 – электрические зонды; R – ограничительное сопротивление

щие друг от друга на 7 мм. Нижний зонд устанавливался на расстоянии 25 мм от верхних торцов пластин решетки, а верхний находился над второй сеткой, на удалении 15 мм от нее. Схема измерительной цепи зондов представлена на рис. 6.

Для регистрации влияния сеток на зону выброса ионизированного газа проводилась киносъемка.

Результаты экспериментов. Ионизированный газ, возникший в результате распада дуги в дугогасительной решетке, выбрасывается за ее пределы и взаимодействует с металлическими сетками, которые были не заряжены или была заряжена только первая сетка. Наблюдаемая авторами картина взаимодействия плазменного потока с металлическими сетками показала, что ионизированный газ занимал пространство, которое распространялось на расстояние 80 мм над второй сеткой.

При обтекании незаряженных металлических сеток ионизированным газом на их поверхности возникает отрицательный заряд. Возникновение отрицательного потенциала на поверхности сетки относительно обтекающей ее плазмы подтверждает образование отрицательного заряда на ее поверхности. Экспериментально установлено, что значение потенциала соответствует 80 В. Это приводит к возникновению дополнительного сопротивления движению плазмы.

При наложении отрицательного заряда на первую сетку между ней и набегающей плазмой возникает потенциал 150 В. В этом случае выброс ионизированного газа соответствовал 15 мм над второй сеткой.

Зависимость отношения тока I_1 под первой сеткой к току I_2 над второй от заданного потенциала на первой сетке показала, что при увеличении потенциала до 150 В значение отношения токов растет медленно, а следовательно, медленно растут и деионизационные процессы под решеткой. Дальнейшее увеличение потенциала приводит к резкому росту отношения токов, что говорит о возрастающей роли отрицательного заряда сетки на процесс деионизации. Наложение внешнего электрического заряда ускоряет процесс деионизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. – Л.: Энергоатомиздат, 1989, 303 с.
2. Беляев В.Л., Куклев Ю.В. Расчет электродинамических сил в токоподводах с учетом их объемных геометрических параметров. – Электротехника, 2000, № 7, с. 56–58.
3. Куклев Ю.В. Газодинамические процессы в дугогасительных устройствах низковольтных электрических аппаратов: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. – Ленинградский политехнический институт, 1982, 174 с.
4. А.с. 1171867 (СССР). Пламегаситель дугогасительной камеры/В.Д. Горкин, В.П. Горнышев, Ю.В. Куклев, Е.Ф. Жигалко. – БИ, 1985, № 29.

5. Пат. 2041528 (РФ). Дугогасительная камера/Ю.В. Куклев, В.В. Кулакова. Оpubl.09.08.95.

6. Виноградов А.Л., Куклев Ю.В. Устранения ионизированной зоны выхлопа контакторов постоянного тока. — Труды X Международной практической конф. Praha Publishing House «Education and Science» s.r.o. 2013, с. 52—55.

7. Аполлонский С.М., Куклев Ю.В. Физические процессы в электрических аппаратах. Т. II. Дугогасительные устройства и проблемы совместимости электрических аппаратов. — Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2012, 476 с.

8. Электрические и электронные аппараты. Т. 1. Электромеханические аппараты: Учебник для вузов/Под ред. А.Г. Годжелло, Ю.К. Розанова. — М.: Издательский центр «Академия», 2010, 352 с.

[27.12.2017]

А в т о р ы: Аполлонский Станислав Михайлович окончил электромеханический факультет Высшего

военно-морского инженерного ордена Ленина училища им. Ф.Э. Дзержинского в 1959 г. В 1988 г. защитил докторскую диссертацию «Комплексная задача расчета и снижения электромагнитных полей для обеспечения безопасности элементов электроэнергетики» в Ленинградском кораблестроительном институте. Научный консультант ООО «Центр электроме- хатроники».

Куклев Юрий Васильевич окончил механико-математический факультет Ленинградского государственного университета в 1963 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию «Газодинамические процессы в дугогасительных устройствах низковольтных электрических аппаратов» в Ленинградском политехническом институте. Доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Северо-Западного технического открытого университета. у

Elektrichestvo, 2018, No. 5, pp. 57–62

DOI:10.24160/0013-5380-2018-4-57-62

Generation of Ionized Gas Discharge from the Electric Apparatus Chute

APOLLONSKII Stanislav M. (JSC «Electromechanotronics Centre», St. Petersburg, Russia) — *Scientific consultant, Dr. Sci. (Eng.)*

KUKLEV Yurii V. Northwestern Technical Open University (St. Petersburg, Russia) — *Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)*

In considering the discharge of ionized gases from the chute of electrical apparatuses, it is taken into account that the arc ignited under the conditions of high breaking currents is a powerful source of electromagnetic and thermal radiation. The arc column is a region occupied by plasma having high temperature and low density and behaving as a powerful source of thermal and light radiation. Under the effect of heat radiated from the arc, the gas is heated and ionized. The ionization degree depends not only on the arc current (the higher the arc current, the higher the radiation flux density), but also on the arc motion velocity. In the latter case, the radiation flux increases due to the shift of the arc maximal temperature closer to its front edge. The article considers different types of arc and flame splitters that can be recommended for being used in modern electrical apparatuses. Application of these devices helps decrease the arc burning time and the time taken to restore the electrical strength in the chute volume, due to which a shorter period of time is required for the chute to get ready for repeating the closing-opening operation.

Key words: *electrical apparatuses, electric arc, ionized gases, arc and flame splitters, restoration of chute electric strength.*

REFERENCES

1. Rodshtein L.A. *Elektricheskiye apparaty* (Electrical apparatus). Leningrad, Energoatomizdat, 1989, 303 с.

2. Belyayev V.L. *Elektrotehnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 2000, No. 7, pp. 56—58.

3. Kuklev Yu.V. *Gazodinamicheskiye protsessy v dugogasitel'nykh ustroystvakh nizkovol'tnykh elektricheskikh apparatov: Avtoref. diss. ... kand. mekhn. nauk* (Gas-dynamic processes in arc suppression devices of low-voltage electric devices. Authors abstract of Cand. Sci. (Eng.)). Leningrad Polytechnical Institute, 1982, 174 p.

4. A.s. 1171867 (SSSR). *Plamyagasitel' dugogasitel'noi kamery* (C.a. No. 1171867 (USSR). Flame arrestor for arc suppression chamber)/V.D. Gorkin, V.P. Gorenyshev, Yu.V. Kuklev, Ye.F. Zhigalko. Bulletin of inventions, 1985, No. 29.

5. Pat. No. 2041528 (RF). *Dugogasitel'naya kamera* (Arc chute)/Yu.V. Kuklev, V.V. Kulakov. Publ. 09.08.95.

6. Vinogradov A.L., Kuklev Yu.V. *Trudy X Mezhdunarodnoi prakticheskoi konf.* (Proc. of the X International Practical conf.). Praha Publishing House «Education and Science» s.r.o. 2013, pp. 52—55.

7. Apollonskii S.M., Kuklev Yu.V. *Fizicheskiye protsessy v elektricheskikh apparatakh. T. II. Dugogasitel'nye ustroystva i problemy sovместимости elektricheskikh apparatov* (Physical processes in electrical apparatus. Vol. II. Arc quenching device and compatibility issues of electric vehicles). — Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2012, 476 p.

8. *Elektricheskiye i elektronnye apparaty. T. I. Elektromekhanicheskiye apparaty: Uchebnik dlya vuzov* (Electrical and electronic devices. Vol. I. Electromechanical devices: Textbook for universities)/Edit. by A.G. Godzhello, Yu.K. Rozanov. Moscow, Publ. centr «Akademiya», 2010, 352 p.

[27.12.2017]