

УДК 621.316.5

**АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ КОММУТАЦИОННЫХ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ АППАРАТОВ**

**ANALYSIS OF PHYSICAL PROCESSES OF WEAR
OF ELECTRIC CONTACTS IN LOW VOLTAGE SWITCHING DEVICES**

А. А. Григорьев¹, М. А. Ваткина²

A. A. Grigoryev¹, M. A. Vatkina²

*¹ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический
университет им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары*

²ООО «Научно-производственное предприятие “ЭКРА”», г. Чебоксары

Аннотация. Дается анализ экспериментальных и теоретических исследований, посвященных выяснению физической природы эрозионных явлений на коммутирующих контактах электрических аппаратов, описываются физические процессы, причины и механизм износа контактов в условиях бездуговой коммутации тока, проблемы дугогашения в коммутационных низковольтных аппаратах для тяжелых режимов работы. Рассматриваются методы и принципы создания перспективных низковольтных гибридных аппаратов на основе силовой электроники, обсуждаются преимущества новых коммутационных гибридных аппаратов, в которых полностью решается проблема исключения электрической дуги из процесса коммутации.

Abstract. The article provides the analysis of experimental and theoretical studies on physical nature of erosion of switching contacts in electric apparatus. The physical processes, reasons and mechanisms of contacts' wear in the arcless commutation of current are described as well as the problems of arc suppression in low voltage switching devices used under severe operating conditions. The methods and principles of creating low voltage hybrid apparatus based on power electronics are covered; the advantages of new switching hybrid apparatus in which the electric arc is eliminated from the process of switching are discussed.

Ключевые слова: *электрическая дуга, коммутирующие контакты, механический износ, электрический износ, электрическая эрозия, гибридный аппарат, бездуговая коммутация, силовой полупроводниковый ключ.*

Keywords: *electric arc, switching contacts, mechanical wear, electric wear, electric erosion, hybrid apparatus, arcless commutation, power semiconductor switch.*

Актуальность исследуемой проблемы. Проблемы электрических контактов коммутационных низковольтных аппаратов (НВА) весьма разнообразны. Это связано с условиями их эксплуатации, многообразием конструктивной номенклатуры, сложностью физических процессов, а также с непрерывным повышением требований к коммутационным электрическим аппаратам (увеличиваются их номинальные токи, токи короткого замыкания, повышаются требования к частоте работы, износоустойчивости, надежности и долговечности). Общее представление о многообразии возникающих проблем может дать анализ физических процессов, происходящих в замкнутых, замыкающих и размыкающих контактах, и особенностей, определяемых средой, в которой работают электромеханические коммутирующие контакты НВА [1], [22], [29].

Для выявления наиболее рациональных путей создания перспективных коммутационных НВА, увеличения их надежности и срока службы необходимо рассмотреть и сравнить существующие физические методы и принципы коммутации. Основными узлами, определяющими ресурс коммутационного НВА постоянного тока, являются контакты – важнейший фактор надежности и коммутационной износостойкости. Они производят замыкание, размыкание и переключение электрических цепей и являются местами перехода тока из одной токоведущей контакт-детали в другую. Контакты включающих и выключающих электрических коммутационных НВА в условиях эксплуатации могут непрерывно с разной частотой срабатывания переходить из одного положения в другое, а также длительно находиться как в замкнутом, так и разомкнутом положении [14], [23], [27], [29]. Режим работы контактов НВА характеризуется временем цикла коммутации и повторностью включения, определяющими уровень нагрева материала контактов. От параметров коммутируемой цепи (напряжения и тока) зависит вид электрического разряда между контактами, а следовательно, разновидность процесса электрического износа контактов.

Механический износ электрических контактов не привлекал к себе широкого внимания вследствие своего более низкого уровня износа (на порядок и более) по сравнению с электрическим. Между тем механические процессы, связанные с ударом и трением, чрезвычайно важны в практике применения контактов. Они имеют самостоятельное значение в коммутационных контактах, когда имеется в виду обеспечение надежного контакта в длительной эксплуатации в условиях образования на контактных поверхностях разного рода пленок и загрязнений, и могут вообще выходить на передний план при оценке надежности и долговечности контактов. Это относится к случаям работы контактов с недогрузкой по току и уменьшения до минимума или полного исключения воздействия дуги на контакты в условиях коммутации в «бестоковую паузу» на переменном токе и в условиях гибридной бездуговой коммутации «сухой» цепи постоянного тока, что требует поэтапного решения этой проблемы.

Механической коммутацией можно условно назвать процессы приведения в движение, перемещения и остановки элементов коммутационных электрических НВА [23]. Перемещение подвижной системы НВА создает условия для реализации их основной функции – коммутации электрических цепей контактной системой. Теория процессов, происходящих при механической коммутации, достаточно полно отражена в литературе [2], [23].

Вопросам электрического износа посвящены многочисленные исследования, позволяющие далеко продвинуться в понимании физики и количественной оценки явления

износа. Интерес к подобным исследованиям, которые особенно актуальны в условиях бездуговой коммутации в НВА, не ослабевает и в настоящее время. Износ коммутационных контактов в НВА является результатом комплекса электрических, механических и климатических воздействий и не поддается простому разделению на электрическую, механическую и химическую составляющие [7], [23].

Коммутирующие контакты НВА могут находиться в двух возможных состояниях: разомкнутом и замкнутом. Очень важным для характеристики их работоспособности являются процессы перехода из одного состояния в другое и наоборот. В процессе замыкания расстояние между контактами уменьшается, при достижении некоторого расстояния между ними создаются условия для пробоя и возникает дуга замыкания, после соприкосновения контактов дуга гаснет. Если в данном случае имеет место вибрация контактов (дребезг), то при каждом разрыве цепи вновь возникают электрические разряды, которые приводят к эрозии контактов или могут оказаться причиной их сваривания. Величина эрозии при замыкании контактов зависит как от отключаемого тока, так и от времени вибрации контактов, т. е. времени, в течение которого на контакты воздействуют электрические разряды. Поэтому радикальным методом повышения надежности и увеличения срока службы контактной НВА является уменьшение длительности горения электрической дуги до ее полного исключения из процесса коммутации [3], [4], [16], [28].

Материал и методика исследований. Целью исследований является анализ существующих физических методов и принципов коммутации низковольтных цепей. Фундаментальным вкладом в развитие теории физических процессов электрического износа являются работы ученых О. Б. Брона, К. К. Намитокова, В. Т. Омельченко, Р. С. Кузнецова, Г. А. Буткевича, И. С. Таева, В. И. Раховского и др. [12], [21].

Для создания современных коммутационных НВА необходимы фундаментальные исследования в целях повышения ресурса их работы и экономии дефицитных материалов контактов НВА, пока изготавливаемых на базе серебросодержащих материалов. Учитывая ограниченные запасы серебра, необходимо искать пути более экономного использования и замены драгоценных металлов на базе исследований износостойкости другими контактными материалами.

Классификация коммутирующих контактов по размыкаемой мощности, току и напряжению (определяющих характер их электрического износа) является довольно условной, так как она основана на учете внешних признаков, а не физической природы явлений. В данной классификации в качестве главного критерия принято брать величину тока. По величине коммутируемого тока контакты могут классифицироваться на слаботочные (токи от долей до единиц ампера), среднеточные (токи от единиц до сотен ампер) и сильноточные (токи от сотен до десятков тысяч ампер) [7], [15].

Кардинальное значение для среднеточных и сильноточных коммутационных НВА имеет износ контактов под действием электрической дуги. Этот износ происходит как в результате выгорания, так и разбрызгивания металла контактов. Показано [13], что обгорание контактов в низковольтных аппаратах зависит от величины тока, продолжительности горения дуги и материала контактов. Во многих аппаратах оптимальные условия коммутации могут быть достигнуты при применении разнородных контактных материалов [14], [24].

На основании анализа результатов исследований процесса электрического износа контактов и специфических особенностей различных форм эрозионных явлений, приведенных в работах [17], [25], на рис. 1 предложена классификационная схема электрической эрозии.

Можно выделить следующие основные факторы, влияющие на физический процесс электрического износа контактов коммутационных НВА: 1) конструктивные параметры; 2) параметры цепей электромагнитного привода; 3) свойства материала контактов; 4) параметры и особенности дугогашения; 5) параметры коммутируемой электрической цепи; 6) параметры режима работы; 7) параметры окружающей среды.



Рис. 1. Классификационная схема электрической эрозии

Эрозия контактов связана с их разрушением, являющимся следствием образования контактного перешейка (мостика) из расплавленного материала контактов в начальной стадии их расхождения, сопровождающейся переносом материала с одного контакта на другой. При токах выше минимальных, когда между контактами уже возникает дуга размыкания, характерной является эрозия катода, которая происходит вследствие бомбардировки катода положительно заряженными ионами и практически не зависит от нагрева контактов. Величина напряжения не оказывает активного влияния на износ контактов при замыкании, однако при напряжении ниже 24 В износ может существенно уменьшиться из-за влияния сопротивления дуги на ток при вибрации контактов. При размыкании напряжение может влиять на износ контактов, если оно оказывает воздействие на время нахождения дуги на рабочей поверхности контакта и на ток в дуге. Чем выше пики напряжения, тем больше энергия и длительность горения дуги размыкания и тем сильнее износ контактов. При увеличении индуктивности цепи повышаются пики напряжения и длительность горения дуги, что способствует эрозии и износу контактов (особенно при постоянном токе).

В области среднеточных и сильноточных коммутационных НВА основной причиной нарушения нормальной работы контактов является дуговой (электрический) износ, вызываемый термическим и электродинамическим действием дуги. Износ контактов слаботочных аппаратов при замыкании и размыкании цепи, в которой электрическая дуга не образуется, практически ничтожен. При наличии дуги обычно оба контакта теряют материал. Конструкция коммутационного НВА должна быть такой, чтобы износ электрических контактов в течение предусмотренного числа коммутаций не приводил к нарушению его работы. Величину износа контактов оценивают по потерям массы или объема или по линейному изменению суммарной высоты контактной пары, определяемой по изменению величины провала контактов [14], [23], [24].

Основным видом износа контактов коммутационных НВА в условиях бездуговой коммутации тока является мостиковая эрозия материала контактов в короткой дуге, изложенная в работе [19]. В данной работе были получены результаты экспериментальных исследований жидких металлических мостиков, возникающих на медных и металлокерамических контактах при размыкании силовых электрических цепей (для количественного определения мостиковой эрозии электрических контактов), а также установлено, что время существования мостика обратно пропорционально величине ускорения при размыкании контактов, так как для достижения одной и той же длины мостика при прочих равных условиях требуется меньшее время при большем ускорении разведения контактов.

Причины износа металлических контактов в условиях бездуговой коммутации на основе физических представлений указаны в работе [27]. В ней также было отмечено, что протекание электрического тока между двумя замкнутыми контактами происходит не по всей поверхности контакта, а лишь в отдельных участках (опорных пятнах). В работе экспериментально установлено, что жидкие контактные мостики служат источником эрозии поверхности контактов при отсутствии дугового разряда, и введено понятие «тонкого» переноса, т. е. чисто мостикового, не зависящего от формы контактов, в отличие от грубого – дугового переноса. По сложившейся традиции весь наблюдаемый износ коммутирующих контактов принято разделять на электрический и механический.

Настоящая статья посвящена рассмотрению некоторых проблем низковольтной аппаратуры, в частности износу электрических контактов применительно к условиям бездуговой коммутации тока с анализом имеющихся по этому вопросу работ, где основным фактором электрического износа контактов является мостиковая эрозия, вызываемая «тонким» переносом материала.

Результаты исследований и их обсуждение. Несмотря на значительные успехи в области изучения физики процессов и механизма электрического износа, еще не достигнуто единого мнения по многим спорным вопросам. Это прежде всего объясняется большими трудностями экспериментального характера, имеющими место при определении таких важных характеристик электрической дуги, как плотность тока на контактах, температура и напряженность поля в различных частях разряда, соотношение электронной и ионной составляющей тока и др., что привело к появлению многочисленных теорий и гипотез. В настоящее время общепризнанной является тепловая теория эрозии контактов на основе теплофизических представлений [11], [21], [22] [23] и электроискрового способа обработки металлов [9].

Известно, что электрические контакты современных аппаратов должны удовлетворять таким требованиям, как:

- 1) малое электрическое сопротивление материала контактов и малое контактное электрическое сопротивление;
- 2) незначительная эрозия контактов, связанная с разрушением контактной поверхности и переносом материала с одного электрода на другой;
- 3) отсутствие свариваемости при замыкании и размыкании контактов, а также склонности к образованию мостиков;
- 4) механическая, термическая и химическая стойкость контактов;
- 5) высокая теплопроводность [25].

На основании многочисленных экспериментальных данных и теоретических исследований было установлено, что ни чистые металлы, ни их сплавы не могут в полной мере удовлетворять вышеперечисленным требованиям. При этом также выяснилось, что суще-

стствует принципиальная возможность совмещения целого комплекса необходимых свойств в материалах со сложной гетерогенной структурой, которые состоят из компонентов, химически не взаимодействующих ни в твердом, ни в жидком состояниях [18], [25]. В контактной технике такие материалы, изготавливаемые различными методами порошковой металлургии (пропиткой, экструзией, термическим прессованием), получили название металлокерамических композиций, или псевдосплавов [18].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что при коммутации электрических цепей контактными коммутационными НВА в межконтактном промежутке, как правило, возникает (как при замыкании контактов, так и при их размыкании) электрическая дуга.

В коммутационных НВА дуга включения, обусловленная электрическим пробоем межконтактного промежутка, практически отсутствует, и износ контактов при включении объясняется их вибрацией – процессом, происходящим в узкой щели между вибрирующими контактами. Все это приводит к износу контактов при включении, причем и в этом случае основной причиной износа является наличие преддуговой стадии и дуги на замыкающих контактах [22], [26]. Физические процессы, происходящие в электрических контактах НВА при протекании через них тока, разнообразны и сложны. Они определяются конструкцией контактов, их материалом, условиями эксплуатации и др. [2], [21], [23], [27]. Вопросы контактно-эрозионных явлений в слаботочных контактных НВА под действием малых токов подробно рассмотрены в литературе [17], [14], [23].

Известно [27], что всякий раз, когда величина тока в цепи и напряжение на дуговом промежутке превосходят свои минимальные значения, вслед за взрывом жидкого металлического мостика между контактами формируется сначала короткая, а затем плазменная дуга.

Диаграмма разделения мостиковой и дуговой стадий эрозии схематически представлена на рис. 2 [18].

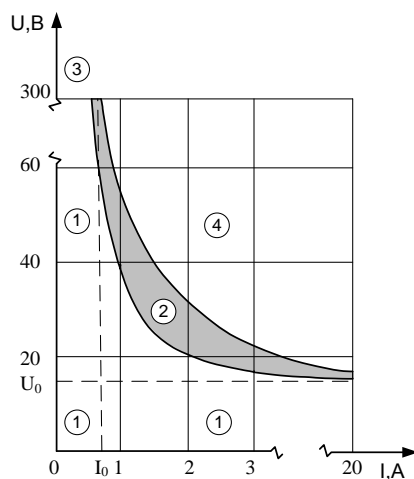


Рис. 2. U - I диаграмма разделения мостиковой и дуговой стадий эрозии контактов

В области 1 ($U < U_0$ при всех значениях I , а также $I < I_0$ при $U < 300$ В) явления газового разряда отсутствуют. В этом случае структурные нарушения контактной поверхности появляются в результате мостикового переноса материала.

При увеличении напряжения в цепи до значений $U > U_0$ при токе $I > I_0$ происходит переход разряда сначала к нестационарной (область 2), а затем к стационарной дуге размыкания (область 4) [27]. Минимальный ток дуги I_0 (ток среза) для различных металлов лежит в пределах 0,5–10 А [10]. Загрязнение поверхности контактов (окисление), как правило, ведет к уменьшению минимальных значений тока и напряжения дуги [25].

Таким образом, величина минимального тока дугообразования зависит от материала контактов, состояния контактных поверхностей, среды, индуктивности цепи и напряжения. При токах более низких, чем минимальный ток дугообразования, теоретически контакты должны размыкать цепь без дуги (при соответствующем напряжении). Индуктивность цепи, окисление контактов, влажность воздуха понижают минимальный ток дугообразования. Контакты в цепях постоянного тока должны размыкаться по возможности быстро и резко до промежутка такой длины, при которой НВА способен быстро прервать ток нагрузки, чтобы свести к минимуму повреждение контактов от дуги. В цепях переменного тока контакты испытывают меньшее повреждение от дугообразования, если они размыкаются медленно, так как дуга прекращается при первом реверсе тока.

Мостики могут возникать как при замыкании, так и при размыкании контактов. Если скорость замыкания контактов достаточно велика и при этом отсутствует вибрация, то мостиковый перенос при замыкании контактов отсутствует [20], причем мостиковая эрозия на размыкающихся контактах на несколько порядков больше, чем на замыкающихся [27]. Существенный вклад в изучение мостиковой эрозии при размыкании электрических контактов слаботочных цепей внесли работы [7], [19], сильноточных цепей – [1], [27]. Известно, что ни одна из существующих теорий не в состоянии достаточно полно и непротиворечиво описать физические процессы и механизм мостиковой эрозии. Так, в последнее время велись попытки создания новой теории, способной дать более или менее полный математический анализ процессов, происходящих при размыкании контактов. Такая теория, названная тепловой, изложена в работе В. Т. Омельченко [19]. На основе данной теории разработаны рекомендации для необходимого выбора как однородных, так и разнородных контактных материалов, которые обеспечивают повышенную износостойкость и надежность работы электрических НВА.

При размыкании контактов коммутационных НВА их переходное сопротивление растет довольно быстро, так что изменения тока нагрузки практически не происходит. Вследствие этого растет падение напряжения, увеличиваются мощность джоулевых потерь и температура площади касания, в результате некоторые участки контактных поверхностей расплавляются, а дальнейшее перемещение подвижного контакта приводит к появлению мостика расплавленного металла. Механические растягивающие усилия, нагрев мостика до температуры кипения, электродинамические силы отталкивания способствуют разрыву мостика. При соответствующих условиях после разрыва мостика могут возникнуть различные формы электрического разряда для среднеточных и сильноточных цепей. Если ток и напряжение превышают некоторые минимально необходимые значения (рис. 2), то между контактами появляется дуговой разряд (для медных контактов эти значения составляют соответственно 0,43 А и 13 В) [8].

Наличие электрической дуги обуславливает такие нежелательные явления, как эрозия, оплавление, сгорание и разбрызгивание материала контактов, что приводит к умень-

шению провала контактов, к увеличению их нагрева и в конечном итоге к сокращению срока службы аппарата. Отказы, которые наблюдаются при работе коммутационных НВА, в основном объясняются перечисленными ниже явлениями, сопровождающими электрическую дугу. В зависимости от условий эксплуатации НВА коммутирующие контакты выходят из строя по таким причинам, как эрозия (мостиковый перенос), электрический и механический износ (потеря массы, изменение формы и размеров контакт-деталей), химический износ (коррозия – главным образом окисление), сваривание (потеря способности к размыканию) и отрыв контактов (контакт-деталей) от контактодержателей [9].

В разряженном воздухе (его давление составляет 760–1 мм. рт. ст.) отключить ток более 100 А в НВА без специальных мер дугогашения с однократным разрывом контактов возможно лишь при напряжении не более 15–20 В. В этом случае раствор контактов не превышает допустимых величин (5–10 мм). Если же в НВА коммутация в вакууме осуществляется несколькими парами контактов, то должны быть приняты меры для электрической изоляции одного раствора контактов от другого. Это необходимо для того, чтобы не допустить отказа – перекрытия дугой неподвижных контактов при изменении направления ее движения в вакууме [21].

Отказ контактов коммутационного НВА – это такое видоизменение его свойств, которое существенно снижает качество, надежность и приводит к неработоспособности, т. е. к неспособности управлять состоянием электрической цепи. Работа электрических контактов коммутационных НВА сопровождается целым комплексом электрических, механических и климатических воздействий, которые приводят к физико-химическим изменениям, формоизменению и разрушению материала контактной поверхности, что объединяется понятием «электрический износ» контактов. Понятие электрической эрозии чаще всего ассоциируется с разрушением поверхности контактов (электродов) под действием электрических разрядов. Применительно к контактам электрических НВА в условиях бездуговой коммутации электрической эрозией называют износ контактов, находящихся под напряжением в момент их замыкания и размыкания. Механизм эрозии в этих двух случаях различный. Более того, в каждом из них процесс эрозии может быть обусловлен разными причинами.

Одним из видов электрической эрозии является мостиковая эрозия, вызывающая направленный перенос металла от одного контакта к другому (обычно от анода к катоду). Этот вид эрозии количественно мал, но опасен, так как вызывает образование игл и глубоких кратеров. При этом характерны отказы контактов из-за «заклинивания»: возникающие иглы не позволяют контактам либо замкнуться, либо разомкнуться. Окисление контактных точек, не подвергавшихся воздействию электрической дуги, выражено слабо. Контактная проводимость в этом случае нарушается главным образом под влиянием внешних загрязнений или пленок, образующихся вследствие атмосферной коррозии.

Проблема устранения электрической дуги полностью решается в бесконтактных (статических или электронных) НВА (без использования электромеханических контактов), создаваемых на основе силовых полупроводниковых приборов (СПП) [28].

Бесконтактные аппараты обладают рядом достоинств по сравнению с контактными аппаратами, которые объясняются свойствами СПП. Однако при этом теряется ряд ценных свойств контактных аппаратов. Сопоставление контактных и бесконтактных НВА показывает, что контактные НВА имеют неоспоримые преимущества в тех случаях, когда при относительно больших токах и напряжениях требуется обеспечить простой коммутационный режим [28].

В настоящее время одним из перспективных направлений в решении проблемы исклечения дуги из процесса коммутации в НВА является создание гибридных аппаратов (ГА) нового поколения, объединяющих в себе элементы контактных и бесконтактных аппаратов, которые сочетают положительные качества обоих типов аппаратов [3], [4], [5], [6]. Достоинства такой бездуговой гибридной коммутации очевидны [28]. Электромеханические контакты в ГА служат для проведения тока нагрузки в длительном режиме (функция пропускания тока), а СПП сокращают длительность горения дуги или вовсе исключают ее возникновение при переключениях (функция коммутации), объединяя достоинства контактных и бесконтактных аппаратов.

Первые фундаментальные исследования, направленные на изучение физических процессов эрозии шунтированных контактов в ГА, изложены в работе [16]. В этих аппаратах контакты шунтировались неуправляемыми СПП – тиристорами. Радикальным методом уменьшения износа, повышения надежности и увеличения износостойкости коммутационных НВА является сокращение длительности горения дуги [16], [22], [28]. Короткие дуги появляются как при размыкании, так и при замыкании контактов в ГА, однако вследствие специфики отключения цепей, шунтированных СПП, эти дуги при размыкании имеют большую длительность, а следовательно, обладают большим разрушающим действием. Кратковременный дуговой разряд, возникающий при размыкании электрических контактов в НВА с бездуговой коммутацией, сопровождается поступлением на поверхность электродов теплового потока. Металл под действием теплового импульса нагревается до высокой температуры, и на его поверхности развивается довольно интенсивное испарение, причем энергия, затраченная на испарение, на порядок выше энергии плавления. В связи с этим при рассмотрении тепловых явлений на контактах можно пренебречь энергией плавления [29].

Существенный интерес представляет такой параметр, как время существования короткой дуги при отключении контактами ГА постоянного тока, оказывающего большое влияние на величину эрозии контактов в этой стадии. Во время существования короткой дуги наблюдается феномен неподвижности опорных точек дуги, в зоне которых происходит интенсивный электрический износ контактов – изменение их геометрии и объема за счет испарения и мостикового переноса материала [1], [17].

Рассмотрим основные особенности коммутационных ГА [16]:

1) падение напряжения на включенном аппарате определяется контактной группой электромеханического привода (ЭМП), и поэтому его значение мало, одновременно устраняется недостаток бесконтактного аппарата – значительное падение напряжения на открытых СПП;

2) СПП с параллельным (шунтирующим) включением в ГА работают в кратковременных режимах. Это дает возможность применять СПП на номинальные токи гораздо меньше отключаемых;

3) импульсный режим работы СПП позволяет избавиться от громоздких систем их охлаждения и тем самым значительно снизить габариты, вес и стоимость ГА;

4) в ГА возможно электрическое отделение нагрузки от сети при применении мостиковых главных контактов с двумя разрывами или вспомогательных контактов ЭМП;

5) при включенном ГА шунтирующие СПП защищены от действия длительных перегрузок по току и от сверхтоков сквозных коротких замыканий;

6) так как контакты ГА практически не участвуют в процессе коммутации, их электрический износ близок к механическому;

7) электрические контакты ГА в процессе размыкания подвергаются действию мостиковой эрозии от короткой дуги.

Существующие схемы бездуговой коммутации не исключают появления короткой дуги, что отражается на сроке службы и надежности работы электрических контактов ЭМП в ГА. Наряду с этим следует отметить преимущества нового поколения ГА [3], [4], [5], [6]:

а) в сравнительно простых оригинальных схемах бездуговой коммутации, защищенных патентами, достигнуто оптимальное управление управляемого силового транзисторного ключа (СТК), которое полностью исключает электрическую дугу из процесса гибридной коммутации;

б) перспективные ГА, работающие с заданным законом бездуговой коммутации, построены на новом способе гибридной коммутации, в основу которой положена идея последовательного соединения полностью управляемых СТК с контактами ЭМП;

в) отсутствие электрической дуги при коммутации позволяет применять ГА для работы во взрывоопасных средах. Сокращение длительности горения дуги (или вовсе исключение ее возникновения) дает возможность в определенных случаях отказаться от громоздких и сложных дугогасительных устройств.

Резюме. Таким образом, по сравнению с известными способами гибридной коммутации, построенной на принципе шунтирования контактов ЭМП неуправляемыми СПП, ГА нового поколения построены на перспективном способе бездуговой гибридной коммутации, в основу которой положена запатентованная идея последовательного соединения полностью управляемых СТК с контактами ЭМП.

В практическом аспекте рассмотрены проблемы гибридных НВА в связи с эрозийными процессами, сформулированы задачи и указаны направления их исследования в условиях бездуговой коммутации при размыкании электрических контактов низковольтных силовых цепей постоянного тока, решение которых находится в прямой связи с созданием закона гибридной коммутации.

В настоящее время назрела необходимость создания нового поколения ГА, работающих с заданным законом бездуговой гибридной коммутации. С этой целью необходимо поэтапно провести научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в рамках теоретических и экспериментальных исследований по повышению коммутационной износостойкости ГА, оптимизации электромеханической контактной и бесконтактной систем, выбору контактных материалов с минимальным электрическим износом и защитой контактов от вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брон, О. Б. Проблемы электрических контактов в силовых аппаратах / О. Б. Брон // Электрические контакты. – М. : Наука, 1973. – С. 7–15.
2. Буткевич, Г. В. Электрическая эрозия силовых контактов и электродов / Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин, Н. А. Веденчиков. – М. : Энергия, 1978. – 253 с.
3. Ваткина, М. А. Исследование возможности создания нового поколения низковольтных гибридных аппаратов с заданным законом бездуговой коммутации / М. А. Ваткина, А. А. Григорьев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 2 (78). – С. 29–38.
4. Ваткина, М. А. Перспективы развития низковольтных коммутационных гибридных аппаратов нового поколения на основе принципа гибридной коммутации / М. А. Ваткина, А. А. Григорьев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 4 (80). Ч. 2. – С. 46–55.

5. Григорьев, А. А. Основные тенденции инновационного развития коммутационных гибридных аппаратов нового поколения / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2012. – № 4 (76). – С. 58–63.
6. Григорьев, А. А. Создание нового поколения низковольтных гибридных аппаратов с бездуговой коммутацией для специальной электротехники / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 2 (78). – С. 49–58.
7. Декабрун, И. Е. Состояние инженерно-технических исследований в области слаботочных релейных контактов / И. Е. Декабрун // Электрические контакты. – М. : Наука, 1973. – С. 15–19.
8. Залесский, А. М. Электрическая дуга отключения / А. М. Залесский. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 266 с.
9. Золотых, Б. Н. Физические основы электрофизических и электрохимических методов обработки : учебное пособие. Ч. 1 / Б. Н. Золотых. – М. : МГУ, 1975. – 106 с.
10. Кесаев, И. Г. Катодные процессы электрической дуги / И. Г. Кесаев. – М. : Наука, 1968. – 244 с.
11. Ким, Е. И. Исследование температурных режимов контактов в различных стадиях работы / Е. И. Ким, В. Т. Омельченко, С. Н. Харин // Сильноточные электрические контакты. – Киев : Наукова думка, 1970. – С. 45–56.
12. Кравцевич, И. И. Исследование электрической эрозии некоторых контактных материалов в различных стадиях горения слаботочной дуги размыкания / И. И. Кравцевич, И. Г. Некрашевич, А. В. Смирнов // Вестник Белорусского университета. – 1975. – № 1. – С. 34–37.
13. Кубышкин, В. В. Эрозия катодов с различной работой выхода в импульсном разряде / В. В. Кубышкин // Сильноточные электрические контакты. – Киев : Наукова думка, 1970. – С. 70–73.
14. Кузнецов, Р. С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В / Р. С. Кузнецов. – М. : Энергия, 1970. – 543 с.
15. Мелашенко, И. П. Электрические коммутирующие контакты и материалы для них / И. П. Мелашенко // Обзорная информация ТС-23. – М. : Информэлектро, 1976. – С. 31.
16. Могилевский, Г. В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения / Г. В. Могилевский. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
17. Намиток, К. К. Изменение переходного сопротивления контактов в различных средах / К. К. Намиток, И. В. Пархоменко // Электрические контакты и электроды : мат. конф. – Киев : Наукова думка, 1977. – С. 50–54.
18. Некрашевич, И. Г. Мостиковый перенос на волокнистых электродах / И. Г. Некрашевич, А. В. Смирнов // Вестник Белорусского университета. – 1975. – № 1. – С. 26–29.
19. Омельченко, В. Т. Теория процессов на контактах / В. Т. Омельченко. – Харьков : Вища школа. Харьк. ун-т, 1979. – 126 с.
20. Разумихин, М. А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов / М. А. Разумихин. – М. : Энергия, 1964. – 81 с.
21. Раховский, В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме / В. И. Раховский. – М. : Наука, 1970. – 536 с.
22. Самервилл, Д. М. Электрическая дуга / Д. М. Самервилл. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 120 с.
23. Таев, И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И. С. Таев. – М. : Энергия, 1973. – 423 с.
24. Теодорович, О. К. Материалы для контактов высоковольтных и низковольтных тяжелонагруженных аппаратов / О. К. Теодорович // Электрические контакты и электроды : мат. конф. – Киев : Наукова думка, 1977. – С. 5–10.
25. Францевич, И. Н. Исследование износа композиционных электроконтактов на основе вольфрама и меди или вольфрама и серебра в тропических условиях на кораблях / И. Н. Францевич // Электрические контакты и электроды : мат. конф. – Киев : Наукова думка, 1977. – С. 107–110.
26. Харин, С. Н. К вопросу о сваривании сильноточных контактов / С. Н. Харин // Электрические контакты и электроды : мат. конф. – Киев : Наукова думка, 1977. – С. 14–15.
27. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 464 с.
28. Электрические и электронные аппараты : учебник для вузов / под ред. Ю. К. Розонова. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
29. Jones, F. L. The Physics of Electrical Contacts / F. L. Jones. – Oxford : Clarendon Press, 1957. – 110 p.