

УДК 621.316.5

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ
КОММУТАЦИОННЫХ ГИБРИДНЫХ АППАРАТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ГИБРИДНОЙ КОММУТАЦИИ**

**PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF NEW GENERATION
LOW VOLTAGE COMMUTATION HYBRID SWITCHGEARS BASED
ON HYBRID COMMUTATION PRINCIPLE**

М. А. Ваткина¹, А. А. Григорьев²

М. А. Vatkina¹, А. А. Grigoryev²

¹ООО «Научно-производственное предприятие “ЭКРА”», г. Чебоксары

²ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический
университет им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары

Работа выполнена в рамках целевой программы фундаментальных исследований РФФИ на этапе разработки инициативного научно-исследовательского проекта № 14-08-01010.

Аннотация. Исследуются инженерные пути перспективного развития высокоресурсных коммутационных гибридных аппаратов нового поколения, предназначенных для оперативной коммутации электроэнергии в автономных системах электроснабжения. Рассматриваются схемотехнические принципы построения новых гибридных аппаратов, проблемы синтеза оптимального управления коммутационными процессами бездуговой гибридной коммутации электрических цепей постоянного тока, возможность использования микроэлектромеханических систем и микросистемной техники. Обсуждаются преимущества гибридной бездуговой коммутации для обеспечения высокой надежности и повышения ресурса бортовых низковольтных гибридных аппаратов с длительным сроком активного функционирования. Приводятся особенности освоенного промышленностью гибридного аппарата – комбинированного реле РКН11.

Abstract. The article studies the engineering perspectives for the development of new generation commutation hybrid switchgears which can provide prompt commutation of electricity in autonomous power supply systems. It also considers the circuit principles of designing new hybrid switchgears, the commutation of constant current in electric circuit, the chance of employing microelectromechanical systems and microsystem equipment. The article discusses the advantages of hybrid arcless commutation that could contribute to high reliability and the increase in the efficiency of on-board low voltage hybrid switchgears with long lasting active operation. And it gives the peculiarities of hybrid switchgears (combined relay RKN11) which have been implemented in industry.

Ключевые слова: гибридный аппарат, гибридная коммутация, нормально открытый силовой полупроводниковый ключ, микросистемная технология.

Keywords: hybrid switchgear, hybrid commutation, normally openpower semiconductor key, microsystem technology.

Актуальность исследуемой проблемы. Коммутационные низковольтные электромагнитные аппараты с использованием обычных средств принудительного дугогашения при помощи дугогасительных камер непригодны для применения в космических аппаратах с

длительным сроком активного функционирования ввиду резкого снижения коммутационных возможностей в условиях глубокого вакуума. Поэтому существующие бортовые коммутационные аппараты для защиты от длительного воздействия факторов космоса помещают в герметичные газонаполненные отсеки, благодаря чему искрение контактов уменьшается и продлевается срок службы контактов и самого аппарата в целом. Однако существенно повышается стоимость, увеличиваются габариты и масса бортовой аппаратуры.

Технический уровень отечественных коммутационных аппаратов по ряду показателей уступает уровню зарубежных аналогов, в частности по количеству срабатываний низковольтной коммутационной аппаратуры. Несмотря на такое состояние дел с их разработкой и производством, требования к современной коммутационной аппаратуре продолжают неуклонно возрастать.

Принципиально новые гибридные аппараты (ГА) с компонентами, использующими нетрадиционные принципы бездуговой гибридной коммутации, отвечают требованиям электрооборудования, предназначенного для применения в бортовых системах электропитания с длительным сроком функционирования.

Развитие современной техники требует совершенствования электротехнических систем и комплексов, в частности коммутационных контактных и бесконтактных электрических аппаратов, которые являются одним из основных средств автоматизации производства и технологических процессов, предназначенных для коммутации (включения, отключения, переключения) и защиты электрических нагрузок.

Важнейшим элементом коммутационного аппарата, определяющим его надежность и коммутационную износостойкость, является электрический ключ. В зависимости от конструктивного исполнения электрических ключей коммутационные аппараты подразделяются на контактные и бесконтактные. У контактных электромеханических аппаратов электрический ключ реализуется в виде системы контактов, перемещающихся с помощью электромагнитного привода относительно друг друга. При соединении контактов электромеханический ключ (ЭМК) переходит в замкнутое состояние, а при разъединении – в разомкнутое. Бесконтактные (полупроводниковые, электронные или твердотельные) электрические аппараты не имеют подвижных контактов. В них ключевые свойства создаются благодаря применению силовых полупроводниковых приборов (СПП) [28].

Материал и методика исследований. Целью исследований является обоснование перспективности направления по созданию высокоресурсных многофункциональных коммутационных ГА нового поколения, предназначенных для оперативной коммутации и защиты электроэнергии в автономных системах электроснабжения. Особое внимание уделяется решению задачи полного устранения дуги из процесса коммутации, сюда входят схмотехнические способы и конструктивно-технологические подходы. Рассматривается проблема поиска оптимального управления коммутационными процессами гибридной коммутации электрических цепей [7], [8], [9], [10], [11], [12],[13].

В работе исследуются инженерные пути полного или частичного устранения электрической дуги из процесса гибридной коммутации, которая является одним из важнейших факторов обеспечения надежности и повышения ресурса коммутационных ГА нового поколения, предназначенных для оперативной коммутации и защиты электрических цепей постоянного тока. Анализ отечественных и зарубежных разработок в данной области науки показал, что в настоящее время известны четыре основных принципа гибридной коммутации:

1. Принцип параллельного (шунтирующего) построения ГА – ЭМК электромагнитного аппарата подсоединяются параллельно СПП бесконтактного аппарата [15], [28];

2. Принцип параллельно-последовательного построения ГА – одна пара ЭМК электромагнитного аппарата соединяется параллельно с управляемым СПП бесконтактного аппарата, а вторая пара ЭМК соединяется последовательно с СПП бесконтактного аппарата [4], [5], [17], [28];

3. Принцип последовательного построения ГА – ЭМК электромагнитного аппарата соединяются последовательно с полностью управляемым силовым транзисторным ключом (СТК) [16], [18], [21], [22], [25];

4. Принцип каскодного построения гибридного (SiC-Si) СТК – высоковольтный транзистор VJFET (SiC) и низковольтный MOSFET (Si) объединяются каскодно кристаллами отдельных приборов по гибридной технологии [19], [29], [30]. На этом принципе перспективным видится также построение ГА, когда нормально открытый СТК соединяется с низковольтным ЭМК на основе использования микроэлектромеханических систем (МЭМС) в сочетании с микросистемной техникой (МСТ) [14], [18], [26].

Результаты исследований и их обсуждение. Принцип каскодного построения силовых ключей не является принципиально новым, но он перспективен. Поиски «идеального» гибридного ключа на базе каскодной схемы гибридного соединения отдельных кристаллов приборов со статической индукцией (как транзисторной, так и тиристорной индукционной структурой), управляющего через структуру «металл-окисел-полупроводник» (МОП-транзистор), продолжаются всеми ведущими мировыми фирмами. МОП-транзисторы потребляют малую мощность по цепи затвора, что упрощает построение схем управления этими ключами [6], [19], [27].

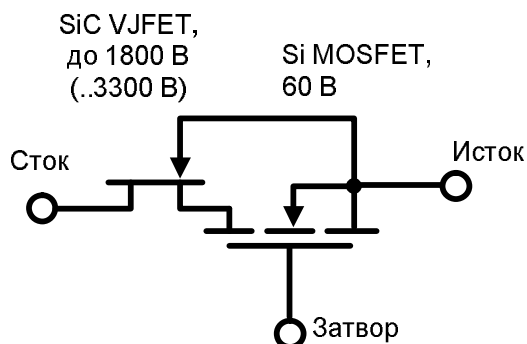


Рис. 1. Каскодная схема гибридного ключа SiC-Si на основе высоковольтного транзистора VJFET и низковольтного транзистора MOSFET

В ближайшие годы в специальных областях использования силовой электроники (автомобильной, аэрокосмической и военной) ожидается применение гибридных СТК на основе полупроводниковых материалов с большой шириной запрещенной зоны, в первую очередь из карбида кремния (4H-SiC) – высоковольтных силовых полевых транзисторов (с изолированным затвором SiC-JFETs и управляемых p-n-переходом низковольтных SiC-MOSFET). Проявляют интерес к созданию каскодных гибридных СТК и ведущие европейские производители. Компания Siemens AG разработала каскодную схему гибридного СТК на основе вертикального высоковольтного VJFET (SiC) и управляющего низковольтного MOSFET (Si) транзисторов, представленную на рис. 1 [30].

Наряду с этим классом составных СПК перспективным видится развитие коммутационных ГА на основе каскадного принципа гибридной коммутации. Появление перспективных нормально открытых силовых полупроводниковых ключей – SIT-транзисторов – дало возможность разработки отечественных коммутационных ГА нового поколения с последовательным включением нормально открытого СТК и ЭМК низковольтного электромагнитного аппарата [16]. На этом принципе ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релейстроения» разработал и освоил ГА – комбинированные реле серии РКН11, структурная схема которого приведена на рис. 2 [18], [25], [26].

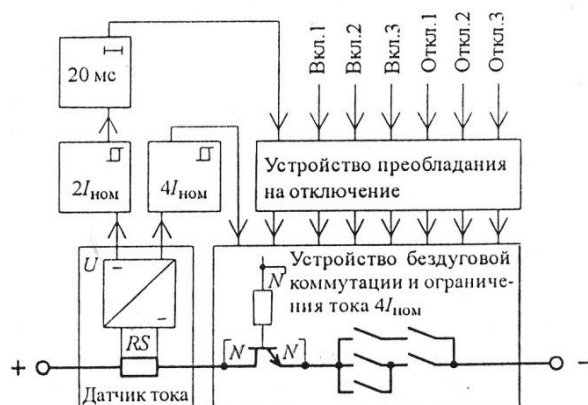


Рис. 2. Структурная схема ГА – комбинированного реле серии РКН11

ГА серии РКН11 предназначен для оперативной коммутации и защиты цепей постоянного тока в негерметичных отсеках автономных систем электроснабжения космических аппаратов с длительным сроком активного функционирования. Основными особенностями ГА являются: бездуговая коммутация, ограничение аварийных токов, управление по трем входам на включение и отключение с резервированным выходом, отсутствие потребления мощности по цепям управления как в отключенном, так и во включенном состояниях [25].

Принцип последовательного построения ГА по запатентованному техническому решению [21] представлен на рис. 3 (а), где приняты следующие обозначения: 1 – транзистор со статической индукцией, 2 – резистор, 3 – прямовключенный диод, 4 – конденсатор, 5 – контакты, 6 – первая выходная клемма, 7 – вторая выходная клемма, 8 – дополнительный резистор. В качестве нормально открытого управляемого СТК использован транзистор со статической индукцией. Технический результат – обеспечение в отключенном состоянии полной гальванической развязки нагрузки от источника питания без введения усложняющих дополнительных контактов в цепь управляющего электрода СТК.

Принцип последовательного построения ГА по техническому решению, защищенному патентом [22], представлен на рис. 3 (б), где приняты следующие обозначения: 1 – контакты, 2 – полевой транзистор с встроенным каналом и изолированным затвором, 3 – резистор, 4 – прямовключенный диод, 5 – первая выходная клемма, 6 – конденсатор, 7 – вторая выходная клемма, 8 – обратновключенный диод.

В качестве нормально открытого управляемого СТК использован полевой транзистор со статической индукцией с встроенным каналом и изолированным затвором. Технический результат – повышение надежности и упрощение за счет улучшения ключевых характеристик ГА путем устранения тока утечки в отключенном состоянии и снижения остаточного напряжения во включенном состоянии на нормально открытом СТК.

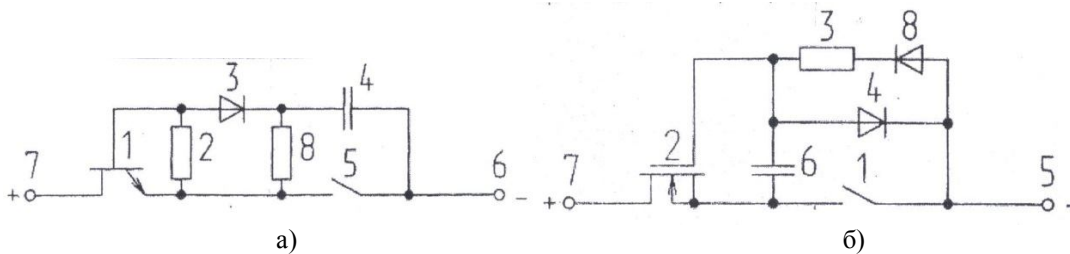


Рис. 3. а) электрическая схема ГА для бездуговой коммутации электрической цепи при использовании в качестве нормально открытого управляемого СТК транзистора со статической индукцией; б) электрическая схема ГА для бездуговой коммутации электрической цепи при использовании в качестве нормально открытого управляемого СТК полевого транзистора с встроенным каналом и изолированным затвором

Минимальные габариты в сочетании с наиболее простой и надежной схемой имеют также ГА, выполненные по третьему параллельно-последовательному принципу гибридной коммутации на управляемых силовых транзисторных ключах [5], [17], [24].

Появление и освоение в последние годы силовых транзисторных интегральных модулей обуславливает целесообразность и перспективность выполнения ГА с использованием транзисторных модулей [17]. В частности, в [24] подчеркивается, что будущее развитие ГА связано с использованием силовых транзисторов, интегрированных с электрическими управляемыми контактами новых поколений, что позволит решить проблему создания ГА с оптимальным законом бездуговой коммутации [7], [9].

В ГА с транзисторными ключами из процесса коммутации практически полностью исключается электрическая дуга и ввиду полной управляемости транзисторов обеспечиваются оптимальные режимы коммутации [7], [9], [28].

Известные технические решения по созданию ГА постоянного тока в зависимости от способа обеспечения бездуговой или практически бездуговой коммутации можно разделить на следующие основные группы:

- ГА с управляемыми полупроводниковыми элементами, осуществляющими бездуговой процесс коммутации [1], [2], [3], [4], [5], [16], [17], [18], [20], [21], [22], [24];
- ГА с неуправляемыми полупроводниковыми элементами, обеспечивающими на время отключения «отсечку» источника питания от нагрузки [15], [28];
- ГА с шунтирующими контактами конденсаторами, обеспечивающими емкостную систему коммутации [15].

Таким образом, при разработке ГА, предназначенных для коммутации цепей низкого напряжения, к которым предъявляются требования минимальных габаритов и высокой надежности, наибольшее практическое применение могут найти коммутационно-защитные ГА с полностью управляемыми СТК, которые объединяют положительные качества как контактных электромагнитных аппаратов, так и бесконтактных аппаратов [24], [28].

ГА с СТК можно выполнять с бездуговой коммутацией ввиду полной управляемости транзисторов [7], [9]. При этом на основе общей теории оптимального управления критериями оптимальности при отключении могут являться минимальные перенапряжения на контактах при заданном времени отключения и минимальное время отключения при заданных допустимых перенапряжениях на отключающих элементах. Достижение указанных параметров процесса отключения возможно только при строго определенных законах изменения как тока, так и напряжения на контактах в течение всего процесса отключения. Поскольку оптимальный (в смысле быстродействия) процесс бездугового разрыва цепи постоянного тока есть частный случай идеального процесса, трактовка понятия оптимального процесса может быть дана с помощью математического аппарата с использованием ЭВМ.

Схемы управления транзисторным ключом ГА в зависимости от способа формирования сигнала управления СТК можно разделить на следующие виды:

- с формированием сигнала бесконтактными датчиками положения якоря [4], [5];
- с формированием сигнала вспомогательным контактом [17];
- с формированием сигнала силовыми мостиковыми контактами [16];
- с формированием сигнала от команд управления реле [1], [3];
- с формированием сигнала током нагрузки [15].

ГА с формированием сигнала бесконтактным датчиком приведен на рис. 4 [5], он содержит две пары ЭМК 1, 3, электромагнитный привод 8 указанных ЭМК, управляемый СТК 2 и датчик 6 замыкания контактов, причем электромагнитный привод 8 механически связан с ЭМК парами 1 и 3 через подвижные элементы. При этом контактная пара ЭМК 1 через силовые выводы СТК 2 подключена параллельно второй паре ЭМК 3, дополнительный элемент 9 выполнен в виде выступа или постоянного магнита, установленного на подвижном элементе первой пары ЭМК 1, причем выходы датчика 6 замыкания контактов подключены к точке соединения первой пары ЭМК 1 с выводом СТК 2. По команде на включение сначала замыкается первая пара ЭМК 1, затем включается СТК 2, после чего замыкается вторая пара ЭМК 3. При этом реализуется заданный алгоритм работы бездуговой гибридной коммутации СТК с главными ЭМК дистанционного переключателя ДП-1-100 [23].

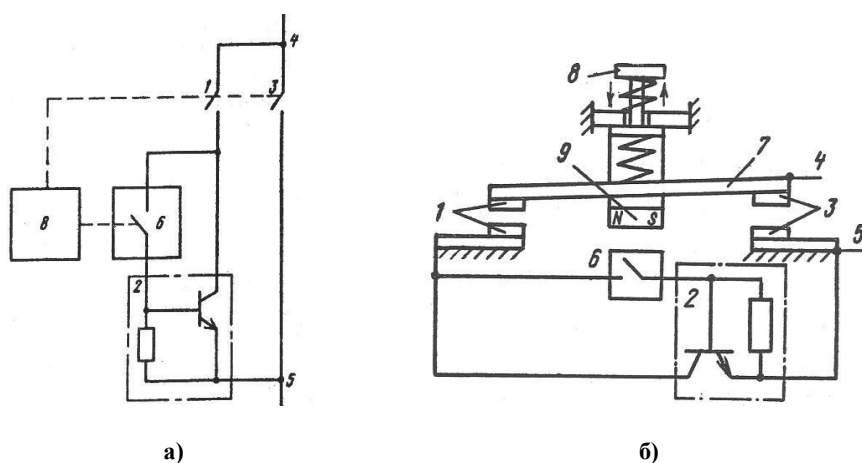


Рис. 4. Схемы управления транзисторным ключом ГА с формированием сигнала бесконтактным датчиком положения якоря:
 а) принципиальная электрическая схема ГА для бездуговой коммутации электрической цепи;
 б) конструктивная схема ГА с постоянным магнитом

ГА со схемой формирования сигнала управления вспомогательным контактом, осуществляющим включение управляемого СТК введением третьей пары вспомогательных ЭМК 9, один из которых подключен к управляющему выводу 10 СТК 4, а другой – к общей точке соединения первой и второй контактной пары 1, 2, расположенной относительно первой и второй контактной пары 1, 2, приведен на рис. 5. Достигается определенный заданный алгоритм работы трех контактных пар с СТК 4, при котором последовательно замыкается и размыкается цепь практически без дугообразования на ЭМК, при этом первая (изолирующая) контактная пара первой замыкается и последней размыкается, в то время как вторая (шунтирующая) главная контактная пара последней замыкается и первой размыкается, а третья (управляющая) контактная пара последовательно замыкается и размыкается второй [17].

Реализация оптимального заданного закона бездуговой коммутации требует системного подхода к проблеме создания низковольтных коммутационных ГА. Суть такого подхода состоит в разработке системы гибридной коммутации, учитывающей свойства контактно-бесконтактной цепи, в которой реализованы законы оптимального управления и обеспечивается бездуговая коммутация цепи постоянного тока в целом. Применение методов математического оптимального синтеза управляемых систем гибридной коммутации позволяет комплексно решать задачу создания бездуговых коммутационных ГА, в которых оптимальные коммутационные режимы играют существенную роль. Система алгебраических и дифференциальных уравнений, являющаяся развернутой математической моделью ГА, связывает его массу со свойствами его функциональных узлов. Эта система уравнений является совокупностью электрических, энергетических, конструктивных и тепловых соотношений. В основу синтеза включено условие о том, что номинальные и переходные токи нагрузок не должны разогревать силовые элементы (СТК, ЭМК) ГА до предельных температур. Методика проектирования ГА должна быть оформлена в виде алгоритма и автоматизированной программы их оптимального синтеза по критерию минимума массы, включая расчеты нестационарных режимов ГА на каждом шаге оптимизации. Для сложных взаимосвязанных, взаимодействующих цепей ГА оптимальные законы отключения могут быть получены лишь численными методами с использованием ЭВМ.

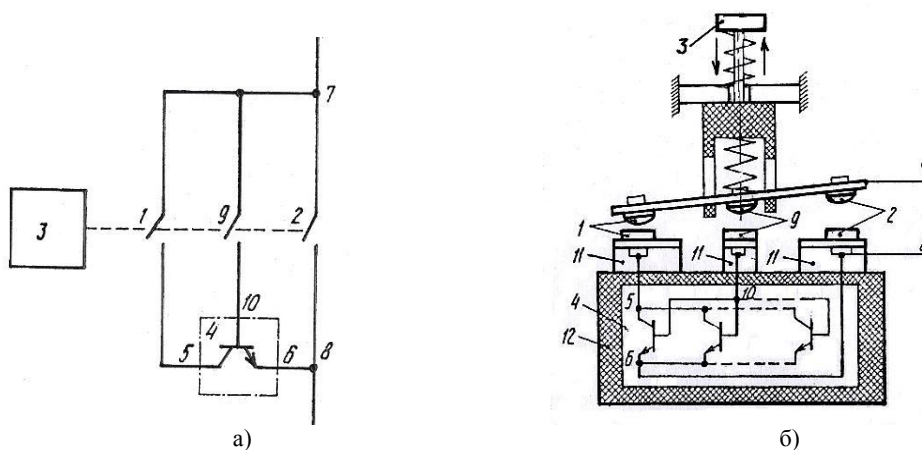


Рис. 5. Схемы управления транзисторным ключом ГА с формированием сигнала вспомогательным контактом:
 а) принципиальная электрическая схема ГА для бездуговой коммутации электрической цепи;
 б) конструктивная схема выполнения ГА применительно к гибриднему выключателю

Как отмечается в [28], наиболее предпочтительными, получившими широкое применение в ГА, являются схемы с формированием сигнала управления посредством силовых мостиковых контактов с двумя разрывами, приведенные на рис. 6 (а, б) [16].

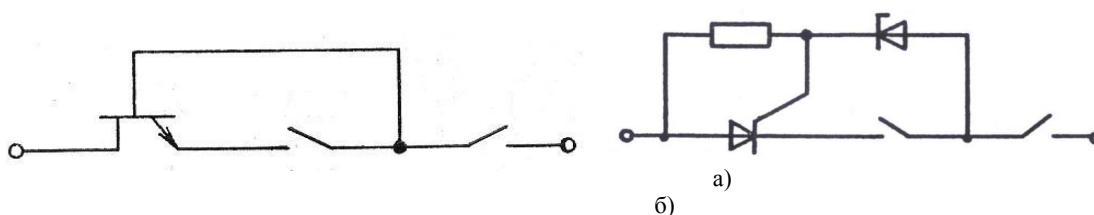


Рис. 6. Схемы управления ГА с формированием сигнала мостиковыми контактами:
 а) с использованием SIT-транзистора со статической индукцией;
 б) с использованием запираемого тиристора

Гальваническая развязка нагрузки от источника питания, получаемая введением дополнительного ЭМК, увязанного во времени с работой главного ЭМК и управляемого СТК, может достигаться в ГА путем: а) регулировки главных контактов с задержкой на замыкание и дополнительных – с задержкой на размыкание или введения соответствующих кинематических связей между ними [17]; б) использования в качестве дополнительного ЭМК дополнительного реле аналогично техническим решениям по изобретениям [2], [3]; в) выполнения реле многопозиционным.

Для создания новых ГА с заданным законом гибридной коммутации целесообразно осуществление гальванической развязки за счет введения в ГА дополнительных ЭМК, механически заблокированных с главными ЭМК, как, например, в изобретении [17], позволяющем выполнить ГА с заданным алгоритмом работы СТК с главными ЭМК первой и второй пары на базе дистанционного переключателя типа ДП-1-100 [23].

Приведенные схемы ГА имеют определенные достоинства и недостатки безотказной гибридной коммутации, статической и динамической точности воспроизведения законов оптимального управления. При создании ГА, отвечающего современному уровню техники, наряду с оптимальным выбором по конструктивным признакам его основных элементов – электромеханического аппарата и полностью управляемого СТК – необходимо осуществлять их правильный выбор по схмотехническим принципам и технологическим признакам.

Одним из путей создания перспективных коммутационных ГА является использование микросистемной техники в сочетании с нормально открытыми силовыми полевыми транзисторами. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, проведенных в [14], подтвердили возможность создания новых коммутационных ГА с токами до 10 А и с напряжениями до 120 В на базе последовательного соединения нормально открытых полевых транзисторов и большого числа параллельных МЭМС-реле.

Резюме. Исследования по созданию высокоресурсных коммутационных гибридных аппаратов нового поколения на основе последних достижений силовой электроники и микросистемной техники доказывают перспективность применения нормально открытых силовых управляемых полупроводниковых ключей, включенных последовательно с контактами МЭМС-реле для обеспечения бездуговой гибридной коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1159077 СССР, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации / А. А. Григорьев и др. ; заявл. 20.12.82 ; опубл. 30.05.85, Бюл. № 20.
2. А. с. 1164799 СССР, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / А. А. Григорьев, В. И. Плотников, А. Л. Виноградов ; заявл. 06.01.84 ; опубл. 30.06.85, Бюл. № 24.
3. А. с. 1251199 СССР, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / А. А. Григорьев и др. ; заявл. 27.11.84 ; опубл. 15.08.86, Бюл. № 30.
4. А. с. 1387060 СССР, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / А. А. Григорьев, В. И. Плотников ; заявл. 02.10.86 ; опубл. 07.04.88, Бюл. № 13.
5. А. с. 1568097 СССР, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / А. А. Григорьев ; заявл. 18.04.88 ; опубл. 30.05.90, Бюл. № 20.
6. *Бономорский, О. И.* Тенденции развития комбинированных полупроводниковых ключей с полевым управлением / О. И. Бономорский, П. А. Воронин // Электронные компоненты. – 2002. – № 6. – С. 18–22.
7. *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 имени И. Я. Яковлева. – 2013. – № 2 (78). – С. 29–38.
8. *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 имени И. Я. Яковлева. – 2013. – № 2 (78). – С. 49–58.
9. *Григорьев, А. А.* К проблеме создания гибридных аппаратов с заданным законом бездуговой коммутации / А. А. Григорьев, А. В. Никитин // Научно-информационный вестник докторантов, аспирантов, студентов. – 2013. – № 1 (20). – С. 37–42.
10. *Григорьев, А. А.* Особенности создания гибридных аппаратов нового поколения с заданным законом бездуговой коммутации / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Сервис автомобильного транспорта и безопасность дорожного движения : сб. науч. ст. – Чебоксары : Чуваш. гос. пед. ун-т, 2013. – С. 70–79.
11. *Григорьев, А. А.* Основные тенденции инновационного развития коммутационных гибридных аппаратов нового поколения / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина, В. А. Филиппов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева. – 2012. – № 4 (76). – С. 58–63.
12. *Григорьев, А. А.* Перспективные направления инновационного развития коммутационных гибридных аппаратов нового поколения для бортовой аппаратуры автономных систем и комплексов / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Использование инновационных технологий в сервисном обслуживании транспорта : сб. науч. ст. – Чебоксары : Чуваш. гос. пед. ун-т, 2012. – С. 17–32.
13. *Григорьев, А. А.* Основные тенденции инновационного развития коммутационных аппаратов низкого напряжения / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Инновационные технологии восстановления сборочных единиц и сервисного обслуживания автомобильного транспорта : сб. науч. ст. – Чебоксары : Чуваш. гос. пед. ун-т, 2011. – С. 101–110.
14. *Иванов, И. П.* Оценка возможностей создания с использованием микроэлектромеханических систем новых коммутационных аппаратов / И. П. Иванов, С. А. Моисеев // Труды XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭЭ-2008. – Алушта, 2008. – С. 302.
15. *Могилевский, Г. В.* Гибридные электрические аппараты низкого напряжения / Г. В. Могилевский. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
16. *Патент* 1721653 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / А. А. Григорьев и др. ; заявл. 22.06.89 ; опубл. 23.03.92.
17. *Патент* 2050616 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Гибридный бездуговой аппарат / А. А. Григорьев ; заявл. 26.05.92 ; опубл. 20.12.95.
18. *Патент* 2192682 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / В. И. Плотников, А. Л. Виноградов, С. А. Моисеев ; заявл. 05.07.2000 ; опубл. 10.11.02.
19. *Патент* 2199795 Российская Федерация, МПК Н 01 L 29/74. Полупроводниковое ключевое устройство с полевым управлением / О. И. Бономорский, П. А. Воронин ; заявл. 05.04.01 ; опубл. 27.02.03.
20. *Патент* 2255390 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / В. И. Плотников, С. А. Моисеев, М. А. Григорьева ; заявл. 12.01.04 ; опубл. 27.06.05.

21. Патент 2282265 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / М. А. Григорьева и др. ; заявл. 25.05.04 ; опубл. 20.08.06.
22. Патент 2298249 Российская Федерация, МПК Н01Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / М. А. Григорьева и др. ; заявл. 14.07.04 ; опубл. 27.04.07.
23. Переключатель дистанционный серии ДП-1. Технические условия ТУ 16-526.455-79. – Чебоксары : Чебоксарский электроаппаратный завод, 1979.
24. Плотников, В. И. Возможное направление разработки коммутационных аппаратов для автономных систем автоматики / В. И. Плотников, А. А. Григорьев, Е. В. Самарин // Труды ВНИИР. Аппаратура управления. – 1980. – № 11. – С. 73–76.
25. Реле комбинированное серии РКН11. Технические условия ТУ3425-023-00216823-94. – Чебоксары : ВНИИР – Прогресс, 1994.
26. Сагарадзе, Е. В. Перспективы развития комбинированных коммутационно-защитных аппаратов специального назначения с применением нормально открытых силовых полупроводниковых приборов / Е. В. Сагарадзе, В. М. Кариков, В. И. Плотников, С. А. Моисеев, Е. В. Самарин, М. А. Григорьева // Электрическое питание : научно-техн. сб. Специальный выпуск. – М. : Электронинвест, 2004. – С. 127–132.
27. Флоренцев, С. Н. Силовая электроника начала тысячелетия / С. Н. Флоренцев // Электротехника. – 2003. – № 6. – С. 3–9.
28. Электрические и электронные аппараты : учебник для вузов / под ред. Ю. К. Розанова. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
29. Bhat, A. K. S. IGT-Gated Bipolar MOS Hybrid Cascode Switch / A. K. S. Bhat // Applied Power Electronics Conference and Exposition. – N. Y., 1988. – P. 236–245.
30. Mitlehner, H. Dynamic Characteristics of High Voltage 4H SiC Vertical JFETs / H. Mitlehner, W. Bartsch, K. Dohnke, P. Friedrichs, R. Kaltschmidt // Power Semiconductor Devices and IC's. ISPSD'99. IEEE International Symposium. – Toronto, 1999. – P. 339–342.