

УДК 621.316.5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ ГИБРИДНЫХ АППАРАТОВ
С ЗАДАННЫМ ЗАКОНОМ БЕЗДУГОВОЙ КОММУТАЦИИ**

**PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF NEW GENERATION ARCLESS
COMMUTATION LOW VOLTAGE HYBRID SWITCHGEARS**

М. А. Ваткина¹, А. А. Григорьев²

M. A. Vatkina¹, A. A. Grigoryev²

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

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

Аннотация. Исследуются возможные пути создания нового поколения низковольтных гибридных аппаратов с заданным законом бездуговой коммутации и переход на новый уровень технологии по созданию низковольтных гибридных аппаратов на основе силовой электроники и микросистемной техники для электротехнической отрасли. Рассматривается одно из успешно развивающихся направлений комбинированных полупроводниковых ключевых устройств с полевым управлением, основанных на каскодном соединении низковольтного мощного МОП-транзистора с высоковольтной транзисторной структурой. Обсуждаются преимущества новых коммутационных гибридных аппаратов на основе каскодного соединения нормально открытого высоковольтного полупроводникового ключа и механических контактов малогабаритных низковольтных электромагнитных реле.

Abstract. The article studies the perspectives for development of new generation arcless commutation low voltage hybrid switchgears and switching to a new level of technologies for creation of low voltage hybrid switchgears on the basis of power electronics and microsystem machinery for electrotechnical industry. It also considers one of most successfully developing trends in integrated field office semiconductor key mechanisms based on the chain connection between a low voltage high power MOS transistor and a high voltage transistor structure. The article dwells upon the advantages of the new hybrid switchgears based on the chain connection between a normally open high voltage semiconductor switch and mechanical contacts of small-sized low voltage electromagnetic relay.

Ключевые слова: гибридный аппарат, бездуговая коммутация, силовой транзистор, микросистемная техника.

Keywords: hybrid switchgear, arcless commutation, power conductor, microsystem machinery.

Актуальность исследуемой проблемы. В настоящее время практически во всех отраслях (электротехнической, космической, авиационной, автомобильной и т. д.) возрастает необходимость в замене устаревших традиционных электромеханических (электромагнитных) аппаратов на коммутационные аппараты нового поколения, работающие на новых принципах бездуговой коммутации [4], [5], [6].

С момента начала промышленного использования низковольтной коммутационной аппаратуры появилась проблема, связанная с повышением надежности и коммутационной износостойкости механических контактов электромагнитных аппаратов. Известно, что проблемы износа и дуговой эрозии контактов под воздействием электрической дуги касаются различных типов электрических аппаратов. Причем при огромном их разнообразии имеются также существенные различия в процессах, протекающих при коммутации электрической цепи. С самого начала исследований дугового износа контактов низковольтной аппаратуры было замечено, что имеются существенные различия характера износа контактов слаботочной и силовой коммутационной аппаратуры, предназначенной для коммутации токов в сотни ампер.

Поскольку данная работа посвящена вопросам коммутационной низковольтной аппаратуры, рассмотрим проблемы, связанные с исследованием новых принципов бездугового построения для низковольтной аппаратуры. Процессы, связанные, в частности, с износом контактов в слаботочных, вакуумных и высоковольтных коммутационных аппаратах, рассматриваться не будут. Гибридный принцип коммутации применяется в основном в коммутационных аппаратах низкого напряжения. В связи с этим данная статья посвящена проблемам коммутации только низковольтных электрических аппаратов. Для реализации этой проблемы необходимо провести исследования по оптимизации схемотехнических принципов построения гибридных аппаратов (ГА). Принципы построения и алгоритмы работы ГА постоянного и переменного токов во многом сходны [16].

В последние годы проведено большое количество научных исследований по данной тематике и накоплен довольно обширный научный материал в этой области. Однако процессы, протекающие при коммутации электрических силовых цепей посредством электромеханических контактов и силовых транзисторных ключей низковольтных гибридных аппаратов, настолько сложны, а явления, их сопровождающие, так многообразны, что изучить их полностью и создать закон бездуговой коммутации, близкий к оптимальному, на сегодняшний день не представилось возможным. Эта проблема не может найти своего разрешения на протяжении нескольких десятилетий – с момента начала исследования гибридного принципа коммутации.

До последнего времени разрабатывались ГА, в которых ток во включенном состоянии проходит через электромеханические контакты (ЭМК), а коммутация электрической цепи выполняется полупроводниковым прибором, например, силовым транзисторным ключом (СТК), подключенным параллельно ЭМК. Такие ГА с параллельным (шунтирующим) включением ЭМК и СТК [9] получили обозначение «ГАШ» [6]. Основные принципы построения ГАШ, а также динамика перехода тока из ЭМК в СТК достаточно полно освещены в технической литературе [16].

Появление нормально открытых СТК, имеющих низкое начальное сопротивление и, соответственно, незначительные падения напряжения в проводящем состоянии [15], открыло возможность создания простых и надежных ГА с последовательным включением ЭМК и СТК [10], [11], [13], [14], получивших обозначение «ГАП» [6]. Поскольку в ГАП можно использовать одновременное прерывание тока ЭМК и СТК, то схему управления СТК удастся выполнить предельно простой, без вспомогательного источника питания и каких-либо специальных элементов, по сравнению с ГАШ, обеспечив только электрическую связь управляющего электрода СТК с одним из контактов [10], [11].

Материал и методика исследований. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных разработок коммутационных аппаратов показал, что резервы существенного

улучшения их характеристик на традиционных принципах построения исчерпаны. Поэтому особую актуальность приобретает проблема создания нового поколения низковольтных коммутационных ГА с заданным законом бездуговой коммутации [8].

Поиск путей создания коммутационных низковольтных аппаратов с бездуговой коммутацией привел к необходимости использования последних достижений в таких областях техники, как силовая электроника, микроэлектронные технологии, микроэлектромеханические системы (МЭМС) и микросистемная техника (МСТ), которые позволяют качественно улучшить характеристики коммутационных аппаратов и придать им новые функции и свойства. Это позволяет провести исследования по созданию гибридных аппаратов, работающих с заданным законом бездуговой коммутации на основе элементов МЭМС/МСТ – технологии ближайшего будущего [1], [7].

В связи с этим одним из путей создания коммутационных аппаратов нового поколения является их электронизация с использованием интегральной и микроэлектронной технологий, обеспечивающих наряду с бездуговой коммутацией электрических цепей высокую надежность и качество ГА, предназначенных для оперативной коммутации в низковольтных системах электроснабжения (СЭС), устанавливаемых как на стационарных, так и на подвижных автономных установках и летательных аппаратах.

За последние десятилетия появились разнообразные микроэлектронные технологии создания бесконтактных (статических) и электромеханических (электромагнитных) МЭМС-реле и соответствующие конструктивные решения. В настоящее время электромагнитные МЭМС-реле обладают существенными преимуществами перед твердотельными (статическими) реле и по многим параметрам приближаются к электромагнитным (классическим) реле. Для создания изделий микроэлектромеханики, в том числе и МЭМС-реле, в основном используются те же технологии, что и для создания изделий микроэлектроники. Все это вселяет уверенность, что в недалеком будущем МЭМС-реле прочно обоснуются на рынке электронных компонентов. Электромагнитные МЭМС-реле являются сравнительно новым изделием на рынке МЭМС-компонентов, хотя сама идея создания МЭМС-реле далеко не нова [1], [7].

Проектные решения в разработках новой техники и качество принимаемых решений в значительной мере зависят от точности и достоверности принимаемых схемотехнических решений и математических моделей с учетом вероятностных внутренних параметров систем различной физической природы – электромеханических контактов (ключей) (ЭМК) и силовых транзисторных ключей (СТК), а также внешних эксплуатационных воздействующих факторов. Создание совокупности алгоритмов вероятностного анализа и синтеза параметров электромеханических систем (ЭМС) и силовых полупроводниковых приборов (СПП) как интегрированных взаимодействующих объектов при одновременном рассмотрении их функциональных моделей занимает центральное место в проведении научно-исследовательской работы по созданию оптимального ГА, работающего с заданным законом бездуговой коммутации [8].

Анализ научно-технической литературы показал, что для решения проблемы создания нового поколения ГА с заданным законом бездуговой коммутации и схемотехнической реализации оптимального управления подсистемой ЭМК-СТК необходимо провести исследования по следующим направлениям:

1. Исследование по использованию МЭМС-реле, применяемых в переключательных системах, где требуются высокое сопротивление в разомкнутом и низкое – в замкнутом состоянии, быстроедействие и высокая надежность.

2. Исследование гибридной контактно-бесконтактной (комбинированной) коммутации с применением МЭМС-реле и СТК для создания ГА, предназначенных для бездуговой коммутации низковольтных СЭС постоянного и переменного тока.

3. Выбор новых принципов бездуговой коммутации, реализация оптимального управления интегрированными и взаимодействующими подсистемами ЭМК-СТК с учетом условий эксплуатации в составе бортовой аппаратуры.

4. Выбор принципа реализации оптимального закона бездуговой коммутации как интеграции взаимодействующих подсистем различной физической природы ЭМК-СТК, алгоритмов вероятностного анализа и синтеза параметров ЭМС и СПП с учетом их взаимного влияния на переходные процессы бездуговой коммутации в статических и динамических режимах ГА в целом.

5. Разработка методики оптимального проектирования ГА в виде совокупности средств прикладного программного обеспечения системы автоматизированного производства (САПР) и ЭВМ.

6. Для целей моделирования подсистемы ЭМК-СТК использование пакета программ анализа электрических и электронных цепей Pspice и программы поверочных электромагнитных расчетов. Программа Pspice позволяет объединить модели различных систем в одну общую компьютерную модель в полном соответствии с реальной физической структурой и произвести моделирование подсистемы ЭМК-СТК в переходных и установившихся режимах при имитировании различных внешних воздействующих факторов. Программы поверочных электромагнитных расчетов позволяют проводить анализ рабочих показателей при задании первичных входных параметров (электрических, электромагнитных, тепловых, геометрических и т. д.).

Поставленная цель выдвигает решение следующих задач:

1) анализ схемотехнических решений ГА и методов оптимизации ЭМК-СТК;
2) разработка и исследование математической модели подсистемы ЭМК и СТК;
3) моделирование подсистемы ЭМК и СТК в установившемся и переходном режимах работы с учетом нелинейности и неоднозначности характеристик их магнитных элементов и полупроводниковых структур;

4) разработка методик, алгоритмов и программ для оптимального проектирования ГА с заданным законом бездуговой коммутации;

5) моделирование режимов работы ГА при помощи программы Pspice, переходных процессов на элементах ЭМК и СТК при включении и отключении активно-индуктивной нагрузки.

Таким образом, создание нового поколения низковольтных коммутационных аппаратов, наиболее полно удовлетворяющих конкретным техническим задачам и проблемам, а также разработка алгоритмов, схемотехнических решений применения ЭВМ, методов математического моделирования и их оптимального проектирования на базе САПР – актуальная задача при исследовании возможности создания оптимального закона бездуговой коммутации современной коммутационной низковольтной аппаратуры.

Для решения поставленной задачи необходимы следующие методы и подходы:

а) теория подобия и моделирования в качестве инструмента для обработки на ЭВМ экспериментальных данных и получения формулы для определения износа контактов;

б) корреляционный анализ для обработки данных, полученных предыдущими исследователями и оценки достоверности формулы износа контактов;

в) метод оптимального структурно-параметрического синтеза ГА по критерию минимальной массы, оформленный в виде алгоритмов и программ САПР с использованием ЭВМ и предложенной математической модели ГА, описывающей стационарные и нестационарные электротепловые режимы;

г) методы теории цепей для расчетов параметров подсистемы ЭМК-СТК и проверки возможности ее оптимального функционирования.

Результаты исследований и их обсуждение. Исследование возможности создания коммутационного ГА, работающего с заданным законом бездуговой коммутации электрической цепи, возможно при наличии определенных условий [8]:

– необходимы методы цифрового осциллографирования переходных процессов с сохранением полученных данных для дальнейшего анализа с применением уточненных формул износа контактов;

– для улучшения качества процесса бездуговой коммутации электрических цепей отключение цепи следует осуществлять за минимальное время с высоким быстродействием при заданной кратности перенапряжений на ГА;

– необходимо, чтобы ток в цепи убывал по закону вогнутой экспоненты, а напряжение на ГА при этом оставалось постоянным в течение всего процесса коммутации;

– интегрирование ЭМК с СТК позволит обеспечить кратковременный режим работы силового транзистора и осуществить видимый разрыв механическим контактом, что дает возможность использовать перегрузочную способность транзистора при работе в импульсных режимах;

– наличие идеального ГА на базе МЭМС-реле и СТК как интеграция взаимосвязанных и взаимодействующих систем с искусственным интеллектом и оптимальным процессом бездуговой коммутации.

В настоящее время все более широкое распространение получают комбинированные силовые полупроводниковые ключи, сочетающие преимущества полевого управления и биполярного механизма токопереноса (комбинированный СИТ-МОП-транзистор (КСМТ)), что является общей тенденцией развития силовых полупроводниковых ключей во всем мире [2], [3].

Биполярные транзисторы обладают низким падением напряжения в открытом состоянии и более низкими скоростями переключения. Они требуют сложных схем управления базой на большие токи и страдают от вторичного пробоя в результате обратного смещающего тока. Полевые МОП-транзисторы обладают весьма высокими скоростями переключения и требуют простой маломощной схемы управления затвором. Для них не существует проблемы вторичного пробоя, но они обладают большим активным сопротивлением в открытом состоянии [15].

В попытке преодолеть все проблемы, свойственные биполярным и полевым МОП-транзисторам, сохранив при этом их ценные качества, многие разработчики предлагают целый ряд полупроводниковых комбинированных ключей [2], [3].

Одним из успешно развивающихся направлений силовых комбинированных ключей является класс полупроводниковых приборов, основанных на каскодном соединении низковольтного мощного МОП-транзистора (VT2) и высоковольтного тиристора (VT1) с электростатической индукцией, содержащих каждый исток, сток и затвор, а также регулирующий напряжение элемент (VD1). Этот каскодный ключевой прибор обозначается русской аббревиатурой КСМТ (комбинированный СИТ-МОП-тиристор) [2].

Схемотехнически реализация каскодного соединения СИТ и МОП-транзистора в упрощенной форме представлена на рис. 1.

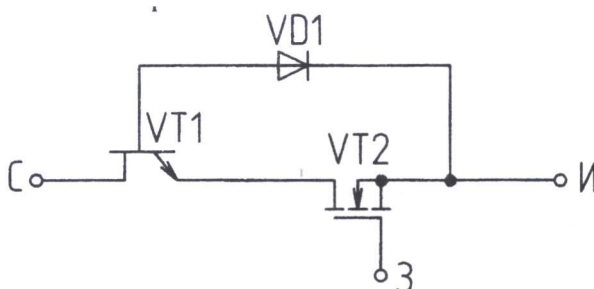


Рис. 1. Каскодная схема КСМТ

В результате снижаются статические и коммутационные потери на ключевом приборе при одновременном упрощении технологии его изготовления [3].

Положительный эффект технического решения в патенте [12] достигается следующим образом (рис. 2 а, б): сток 12 высоковольтного тиристора с электростатической индукцией 1 (ТЭУ) подключен к первому силовому выводу А, исток 11 ТЭУ присоединен к стоку 18 МОП-транзистора, затвор 13 ТЭУ через регулирующий элемент 3 связан с истоком 17 МОП-транзистора, а исток МОП-транзистора, в свою очередь, подключен ко второму выводу К, который является общей шиной.

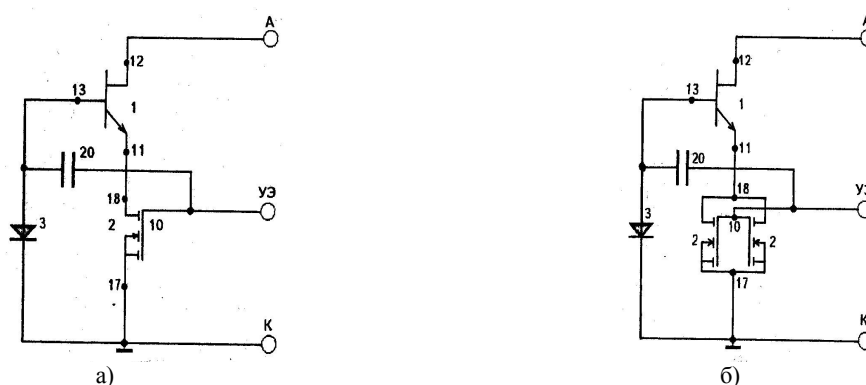


Рис. 2. а) принципиальная электрическая схема КСМТ;
б) принципиальная электрическая схема КСМТ, содержащего два МОП-транзистора, параллельно соединенных между собой

При этом затвор МОП-транзистора 10 подключен к третьему управляющему выводу УЭ. Между затвором ТЭУ и затвором МОП-транзистора включен конденсатор 20.

В рассмотренном техническом решении [12] не существует физических или технических причин, препятствующих достижению любой необходимой величины коэффициента блокирования ТЭУ, что позволяет использовать МОП-транзистор 2 с минимальным допустимым напряжением сток-исток, что позволяет получать минимальное сопротивление открытого МОП-транзистора.

КСМТ обладает лучшими рабочими характеристиками, пригоден для высоковольтного высокочастотного переключения при токе большей величины. Несмотря на то, что возможно высокочастотное переключение, интеграция всего гибридного полупроводникового ключа на одном кристалле существенно важна для получения общего улучшения рабочих характеристик гибридной интегральной схемы.

Наряду с этим классом приборов наиболее перспективным видится создание новых ГА на основе каскодного соединения нормально открытого силового полупроводникового ключа и механических контактов малогабаритных низковольтных электромагнитных реле [10], [11], обладающих существенными преимуществами перед КСМТ – это возможность реализации гальванической развязки коммутируемых цепей, являющаяся обязательной для некоторых автономных СЭС.

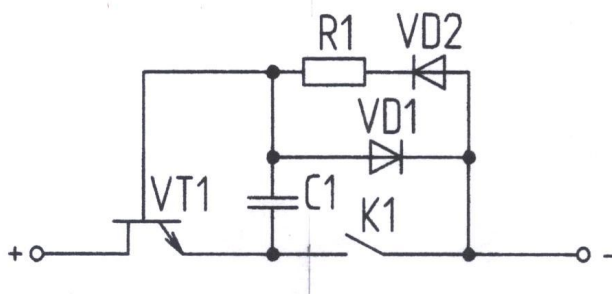


Рис. 3. ГА с каскодной схемой включения СИТ-транзистора и контактов малогабаритного низковольтного реле

Предложенный на рис. 3 ГА с каскодной схемой преодолевает проблемы, связанные с отдельными приборами, и использует их в реализации высоковольтного, высокочастотного гибридного коммутатора с токами большей величины для работы при повышенном напряжении электрической цепи [11].

Особенностью этого реле, помимо работы контактов К1 в режиме коммутации «сухой» цепи, является и то, что к контактам К1 прикладывается не все коммутируемое напряжение, а только незначительное напряжение, определяемое напряжением отсечки нормально открытого СИТ-транзистора, которое в десятки раз меньше коммутируемого. Это позволяет в перспективе для слаботочных исполнений ГА использовать в качестве контактов К1 контакты микроэлектромеханических систем (МЭМС-реле), применяемые в электронных переключательных системах, где требуется высокое сопротивление в разомкнутом и низкое – в замкнутом состоянии, малое время переключения и высокая надежность. В этом реле обеспечена работа главных контактов К1 в режиме замыкания и размыкания «сухой» цепи.

ГА для бездуговой коммутации электрической цепи по изобретению [13] представлен на рис. 4 а, в нем в качестве нормально открытого управляемого полупроводникового ключа применен транзистор со статической индукцией [16].

В отключенном состоянии, когда контакт 5 разомкнут, конденсатор 4 заряжен через генератор тока, образованный транзистором со статической индукцией 1 и параллельно включенными через прямо включенный диод 3 резисторами 2 и 8, до полного напряжения источника питания. Тем самым разомкнутый контакт 5 и заряженный до напряжения

источника питания конденсатор 4 обеспечивают в отключенном состоянии полную гальваническую развязку всех электродов транзистора 1 и, соответственно, нагрузки от источника питания.

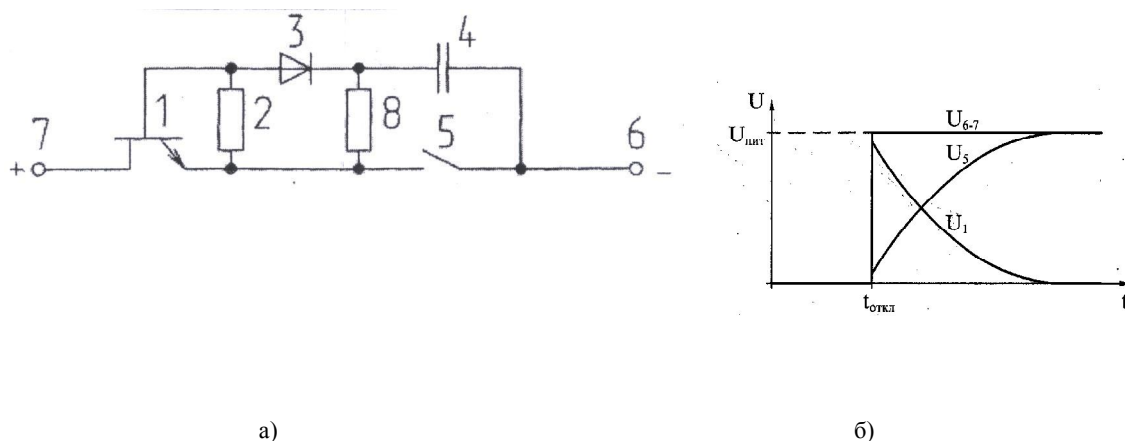


Рис. 4. а) электрическая схема ГА для бездуговой коммутации электрической цепи при использовании в качестве нормально открытого управляемого ключа транзистора со статической индукцией;
б) кривые напряжения переходных процессов на элементах ГА при включении активной и отключении активно-индуктивной нагрузки

Определенный интерес представляют моделирование режимов работы ГА при помощи программы Pspice и исследование переходных процессов на элементах ГА (рис. 4 б) при включении активной и отключении активно-индуктивной нагрузки, где приняты следующие обозначения: U_{6-7} – напряжение на выходных клеммах; U_1 – напряжение на силовых выводах полупроводникового ключа; U_5 – напряжение на контактах.

При этом напряжение на размыкаемых контактах 5 увеличивается не скачкообразно, а плавно, обеспечивая превышение роста восстанавливающейся электрической прочности зазора размыкающихся контактов 5 над ростом восстанавливающегося на них напряжения, исключая дугообразование на контактах, а также обеспечивая в отключенном состоянии полную гальваническую развязку нагрузки от источника без введения в ГА усложняющих дополнительных контактов развязки [13].

«Идеальный» ГА, представленный на рис. 5, способен работать с заданным законом бездуговой коммутации при использовании в качестве нормально открытого силового управляемого полупроводникового ключа полевого транзистора с встроенным каналом и изолированным затвором [14].

ГА работает следующим образом. В отключенном состоянии, когда контакт 1 разомкнут, конденсатор 6 заряжен через прямо включенный диод 4 до напряжения отсечки транзистора 2. Разомкнутый контакт 1, изолированный затвор транзистора 2 и заряженный конденсатор 6 обеспечивают в отключенном состоянии гальваническую развязку нагрузки от источника питания.

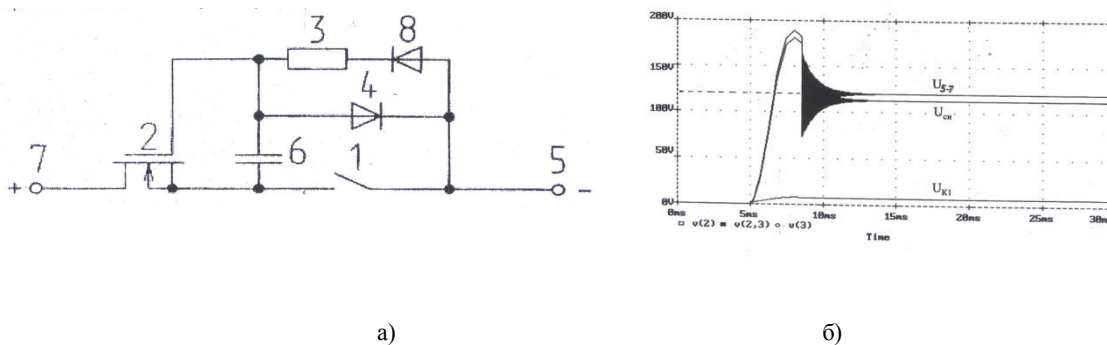


Рис. 5. а) электрическая схема ГА для бездуговой коммутации электрической цепи при использовании в качестве нормально открытого управляемого полупроводникового ключа полевого транзистора с встроенным каналом и изолированным затвором; б) кривые напряжения переходных процессов на элементах ГА при отключении активно-индуктивной нагрузки

Кривые напряжения переходных процессов при отключении активно-индуктивной нагрузки приведены на рис. 5 б, где приняты следующие обозначения: U_{5-7} – напряжение на выходных клеммах; $U_{си}$ – напряжение на силовых выводах полупроводникового ключа; $U_{к1}$ – напряжение на контактах.

Поэтому при разработке коммутационных аппаратов с повышенной износостойкостью, стойкостью к механическим воздействиям и с минимальными массогабаритными показателями предпочтительной является разработка ГА, состоящего из быстродействующего электромагнитного МЭМС-реле, имеющего небольшое падение напряжения на СТК, обеспечивающего наряду с бездуговой коммутацией расширение функциональных возможностей [4], [5], [6].

Резюме. Разработаны оригинальные схемотехнические решения, защищенные патентами на изобретения [9], [10], [11], [13], [14], на базе которых возможно решить проблему по созданию гибридного аппарата, работающего с заданным, близким к оптимальному, законом бездуговой коммутации.

В целом исследования показали возможность создания низковольтных гибридных аппаратов нового поколения с заданным законом бездуговой коммутации, а также заложили научные и схемотехнические основы для разработки таких аппаратов, призванных заменить существующие электромеханические коммутационные аппараты, но без присущих последним недостатков. Особенно активно процесс вытеснения традиционных электромагнитных аппаратов гибридными происходит в течение последних десяти лет. Он обусловлен успехами, достигнутыми ведущими производителями полупроводниковых приборов для силовой электроники и особенно микроэлектромеханических реле – технологии ближайшего будущего.

Современный подход к решению этой задачи ориентирован на инновационный прорыв в развитии силовой электроники, переход к высоким технологиям и выход на новый уровень по созданию низковольтных гибридных аппаратов, работающих с заданным законом бездуговой коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляев, В. А.* От электромеханических и дискретных решений к МЭМС / МСТ. МЭМС / МСТ в современной технике на примере автомобилестроения и авиации / В. А. Беляев // *Электронные компоненты*. – 2003. – № 2. – С. 27–34.
2. *Бономорский, О. И.* Тенденции развития комбинированных полупроводниковых ключей с полевым управлением / О. И. Бономорский, П. А. Воронин // *Электронные компоненты*. – 2002. – № 6. – С. 18–22.
3. *Бономорский, О. И.* Сравнительные экспериментальные исследования модулей IGBT и модулей на основе комбинированных СИТ-МОП-транзисторов / О. И. Бономорский, П. А. Воронин и др. // *Силовая электроника*. – 2004. – № 1. – С. 18–21.
4. *Григорьев, А. А.* Основные тенденции инновационного развития коммутационных гибридных аппаратов нового поколения / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина и др. // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева*. – 2012. – № 4 (76). – С. 58–63.
5. *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.
6. *Григорьев, А. А.* Основные тенденции инновационного развития коммутационных аппаратов низкого напряжения / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина и др. // *Инновационные технологии восстановления сборочных единиц и сервисного обслуживания автомобильного транспорта* : сб. науч. ст. – Чебоксары : Чуваш. гос. пед. ун-т, 2011. – С. 101–110.
7. *Гридин, А. М.* Микроэлектромеханические реле: технология ближайшего будущего / А. М. Гридин // *Электронные компоненты*. – 2003. – № 7. – С. 38–40.
8. *Марактанов, В. А.* О возможности создания выключателя, работающего с заданным законом коммутации / В. А. Марактанов, А. Д. Пивненко // *Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения*. – 1971. – № 7. – С. 7–8.
9. *Патент* 2050616 Российская Федерация, МПК H01H 9/30. Гибридный бездуговой аппарат / А. А. Григорьев; заявл. 26.05.92; опубл. 20.12.95.
10. *Патент* 1721653 Российская Федерация, МПК H01H 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / В. И. Плотников, А. Л. Виноградов, А. А. Григорьев и др.; заявл. 22.06.89; опубл. 23.03.92.
11. *Патент* 2192682 Российская Федерация, МПК H01H 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.
12. *Патент* 2199795 Российская Федерация, МПК H01L 29/72, H01L 29/74. Полупроводниковое ключевое устройство с полевым управлением / О. И. Бономорский, П. А. Воронин; заявл. 25.04.01; опубл. 27.02.03.
13. *Патент* 2282265 Российская Федерация, МПК H01H 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / В. И. Плотников, С. А. Моисеев, М. А. Григорьева и др.; заявл. 25.05.04; опубл. 20.08.06.
14. *Патент* 2298249 Российская Федерация, МПК H01H 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / В. И. Плотников, С. А. Моисеев, М. А. Григорьева и др.; заявл. 14.07.04; опубл. 27.04.07.
15. *Флоренцев, С. Н.* Силовая электроника начала тысячелетия / С. Н. Флоренцев // *Электротехника*. – 2003. – № 6. – С. 3–9.
16. *Электрические и электронные аппараты* : учебник для вузов / под ред. Ю. К. Розанова. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.