

УДК 621.316.54

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ
КОММУТАЦИОННЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АППАРАТОВ**

**SYSTEM ANALYSIS OF PROBLEMS OF MODELING HYBRID SYSTEMS
OF COMMUTATION LOW-VOLTAGE APPARATUS**

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. В работе с системных позиций рассматривается проблема математического моделирования гибридных систем, приводятся синтез математического моделирования и анализ гибридного направления как объекта исследования, результаты системного анализа по разработке методики математического моделирования, основанной на оптимальном синтезе коммутационных низковольтных гибридных аппаратов. Обсуждаются основные задачи поставленной проблемы по системному анализу, структурному и параметрическому синтезу. Конечной целью их решения является разработка универсального комплекса компьютерного системного анализа моделирования и проектирования (САМПР), позволяющего создать «идеальный» гибридный аппарат с признаками, характерными для самоуправляемой гибридной системы. Определены дальнейшие пути создания программного комплекса САМПР по оптимизации гибридных систем коммутационных низковольтных аппаратов, основанных на новых принципах гибридной коммутации.

Abstract. The article provides the system analysis of the problem of mathematical modeling of hybrid systems, an in-depth synthesis of mathematical modeling and hybrid trend analysis as a research target, the results of the system analysis of mathematical modeling method development based on the synthesis and analysis of commutation low-voltage hybrid apparatus. The authors discuss the major objectives of the set up problem are discussed: systematic analysis, structural and parametric synthesis. The final goal of the problem is the development of a universal complex of computer modeling and engineering (CCMP) which enables the creation of an «ideal» hybrid apparatus with the features characteristic of a self-controlled hybrid system. The article determines Further ways of creating a program complex of automatic modeling and engineering aimed at optimizing hybrid systems of commutation low-voltage apparatus according to the new principles of hybrid commutation are defined.

Ключевые слова: *системный анализ, структурный и параметрический синтез, гибридная коммутация, гибридная система, низковольтный гибридный аппарат, силовая электроника, электромеханика, микроэлектромеханическая система, микросистемная технология.*

Keywords: *system analysis, structural and parametric synthesis, hybrid commutation, hybrid system, low-voltage hybrid apparatus, power electronics, electrical engineering, microelectromechanical system, microsystem technology.*

Актуальность исследуемой проблемы. В настоящее время в низковольтном аппаратостроении формируется направление по созданию на базе САМПР оптимальных коммутационных аппаратов, об этом свидетельствуют публикации, тематика научно-исследовательских работ ведущих научно-исследовательских институтов и кафедр вузов. Отсюда находит свое отражение и общая тенденция современного развития электрических коммутационных низковольтных аппаратов (НВА) [2], [3], [4], [5], [8], [9], [10], [11], [12], [16], [17], [18], [19], [21], [24], [25], [28], [42], [44], [45], [50].

В данном исследовании рассматривается состояние вопроса моделирования электрических коммутационных НВА. Научная проблема заключается в развитии теории физико-математической оптимизации гибридной коммутации электрических НВА в направлении полного исключения дуги из процесса коммутации, оптимального бездугового процесса коммутации электрической цепи постоянного тока в условиях взаимосвязанных физических эффектов, которые являются принципиально необходимыми для реализации назначения гибридных НВА. Эта теория открывает новые возможности для повышения технико-экономических показателей путем применения на стадии разработки и проектирования более совершенных компьютеризированных комплексов САМПР.

Цель исследования – разработка методики системного анализа и параметрического синтеза построения новых перспективных коммутационных гибридных аппаратов (ГА).

Как следствие изложенного, актуальность исследования вытекает из необходимости дальнейшего развития теории физико-математической оптимизации гибридной коммутации и разработки более совершенных схем с целью расчета и проектирования гибридных НВА для автономных систем электроснабжения постоянного тока с сохранением всех достоинств, присущих контактному и бесконтактному НВА, но с более лучшими массоэнергетическими показателями по сравнению с существующими традиционными аппаратами [4], [5], [8], [9], [10], [11], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38]. В связи с этим проведение системного анализа проблемы моделирования ГА актуально и представляет научно-практический интерес [6], [7], [13], [15], [16], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [26], [28], [30], [33], [39], [40], [41], [42], [43].

Материал и методика исследований. В настоящее время имеется немало схемных решений (признанных изобретениями) ГА, которые практически исключают дугообразование на контактах электрического коммутационного ГА [32], [33], [34], [35], [36], [37]. Разработка простых оптимальных конструкторских и схемных решений гибридной коммутации (как, например, в патентах [32], [38]), в которых сохранялись бы все положительные качества контактных и бесконтактных НВА и которые бы снизили отрицательное воздействие дуги отключения, может ускорить создание промышленных гибридных НВА.

На сегодняшний день отсутствует единый обобщенный закон процесса оптимальной коммутации, связанный с созданием коммутационных НВА. Проблемы бездуговой коммутации решены не полностью, особенно для работы во взрывоопасных средах, в космосе при пониженном давлении (вакууме). Эти проблемы могут быть решены в ги-

бридных НВА, осуществляющих практически бездуговую коммутацию тока, обладающих электрической износостойкостью, равной механической износостойкости [32], [33], [34], [35], [36], [37]. Закон позволит найти наиболее оптимальный процесс гибридной коммутации в качестве обобщенного критерия. При этом, вероятно, будет достигнут оптимум по всем параметрам гибридных НВА.

Поэтому, чтобы в полной мере использовать преимущества гибридного принципа коммутации, необходимо создать соответствующий оптимальный закон бездуговой гибридной коммутации НВА. Анализ литературных источников показал, что публикаций по этой научной проблеме практически нет. Это может быть объяснено недостаточной информационной доступностью таких исследований.

При создании коммутационного НВА, отвечающего поставленной цели, наиболее эффективным может оказаться путь создания коммутационных ГА, работающих с заданным, близким к оптимальному, законом бездуговой гибридной коммутации [9]. При этом чем сильнее подавляется электрическая дуга в гибридной системе коммутации ГА, тем он сложнее, следовательно, должно существовать оптимальное решение по критерию минимизации конструктивной массы при заданной температуре охладителя силового транзисторного ключа (СТК). Объективность оптимального синтеза во многом зависит от выбора параметров (критериев), по которым проводится оптимизация [42]: наличия физического смысла, простоты вычисления, универсальности или полноты характеристики объекта.

Реализация задачи оптимизации позволяет решить проблему бездуговой гибридной коммутации, основанной на сравнении найденной идеальной характеристики бездугового отключения с реальной. В результате будет получен своеобразный эталон процесса гибридной бездуговой коммутации. На его основе с использованием ЭВМ можно построить эффективную систему процесса бездугового отключения гибридных НВА.

Существует принцип максимума Л. С. Понтрягина [23], который позволяет оптимизировать процесс отключения по обобщенному и локальному критериям. Этот принцип заключается в том, что для многих управляемых систем может быть построен такой процесс регулирования, при котором само состояние системы в каждый данный момент подсказывает наилучший с точки зрения всего процесса способ действий [23].

Результаты исследований и их обсуждение. Учитывая сложность процессов гибридной коммутации НВА, получить оптимальный вариант бездуговой гибридной коммутации при минимальных затратах времени возможно в случае, если исследования проводить с использованием математической теории эксперимента, на основе его планирования и проектирования. Средством решения научной проблемы является развиваемая в данной работе постановка задачи системного синтеза ГА, основанная на следующих принципах [20], [42]:

- 1) при проектировании гибридных НВА задача оптимизации сводится к минимизации их конструктивной массы с использованием полных математических моделей всей гибридной системы;
- 2) минимизировать конструктивную массу ГА возможно при заданной температуре охладителя СТК;
- 3) представляется рациональной многокритериальная физико-математическая оптимизация гибридных НВА: по массе, управлению, минимальному уровню энерговыделения в дуге отключения, предельно возможному уровню перенапряжений, надежности, если ставить и решать задачу структурной оптимизации ГА в составе автономных систем электроснабжения;

4) оптимизация ГА по надежности и предельно возможному уровню перенапряжений имеет практический смысл, но в таком случае ГА, оптимизированные под одну конкретную систему, окажутся неоптимальными для других.

Поэтому и предельно возможный уровень перенапряжений, и надежность гибридных НВА целесообразно принять в качестве ограничений многокритериальной задачи оптимизации.

Электрическая и тепловая подсистемы связаны между собой через мощности тепловых потерь в СТК. В основу синтеза положено условие, что номинальные переходные токи нагрузок не должны разогревать силовые элементы ГА, в частности СТК, до предельных температур, поэтому основным методом проектирования ГА по критерию минимума массы является численное решение уравнений полной математической модели в рамках специализированной машинной программы синтеза – САМПП.

В данной работе будет рассматриваться наиболее общий путь определения необходимых характеристик гибридной системы как элемента коммутационного гибридного НВА в целом. Взаимосвязь подсистем электромеханического контакта (ЭМК) и силового транзисторного ключа обеспечивается конструктивным исполнением гибридной системы [38], их взаимодействие [14], [26] – наличием «идеальной» системы по отношению к заданному закону оптимальной коммутации, в которой и происходит бездуговая гибридная коммутация электрической цепи постоянного тока.

При проектировании гибридных НВА могут быть использованы следующие пакеты программ: CircuitMaker TraxMaker, Acceleda 15.X, Specctra, DesignLab 10.0, Electronics Workbench, которые позволяют проектировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые устройства, устройства программируемой логики и др. [23], [40], [48]. Эти пакеты программ не обобщены в виде САМПП.

С помощью существующих систем трудно моделировать сложные конструктивные узлы гибридных НВА, например, контактные микроэлектромеханические системы (МЭМС-реле) [12] и силовые гибридные интегральные интегрированные системы (ГИИС) [38]. Для оптимального и системного проектирования необходима разработка программного обеспечения – САМПП гибридных НВА постоянного тока, предназначенной для выполнения информационно-поисковых, расчетных и конструкторских работ при оптимальном математическом проектировании гибридных НВА в целом, алгоритмов синтеза законов управления гибридной системой, обеспечивающих выполнение заданной бездуговой гибридной коммутации [9].

Для достижения поставленной цели, которая должна привести к реализации закона оптимальной бездуговой гибридной коммутации НВА, необходимо решение следующих задач:

а) разработка метода моделирования гибридной системы как совокупности взаимодействующих подсистем различной физической природы, отражающей процессы коммутации взаимосвязанных гибридных подсистем ЭМК-СТК;

б) разработка классификации полной математической модели. Эта классификация систематизирует модель в зависимости от допустимого уровня дугообразования, гарантирующего достаточную степень устойчивости, надежности и полного исключения дуги из процесса коммутации, что, в свою очередь, необходимо для разработки, проектирования и создания оптимальных гибридных НВА.

Наиболее фундаментальными в области автоматизированного проектирования электрических коммутационных НВА являются работы [15], [18], [20], [21], [24], [26], [28], [31], [39], [42], [43], [44], [48].

Разработке математической модели и исследованию явлений, происходящих в узлах электромагнитных НВА, посвящено большое количество работ. Процессы дугогашения наиболее подробно изложены в работах [27], [29], [46], процессы в токоведущих частях и контактах – в работах [17], [45], явления, происходящие в электромагнитном приводе, – в работах [28], [49], метод многокритериальной оптимизации «ЭЛЕКТРА» – в работе [43].

Анализ математических моделей, которые можно использовать для решения подобных задач [22], показал, что перечисленные работы могут быть использованы в качестве основы при составлении алгоритмов расчета конкретных узлов и механизмов, применяемых в новых перспективных гибридных НВА. В связи с этим определяются следующие задачи:

- 1) разработка обобщенных математических моделей гибридных НВА, учитывающих влияние процессов различной физической природы на дискретные элементы (СТК);
- 2) разработка и совершенствование методик и методов многокритериальной оптимизации с целью их использования при решении проблемы по реализации закона гибридной бездуговой коммутации ГА;
- 3) сравнительная оценка различных конструкций и материалов МЭМС-реле [3], [12], электрических управляемых контактов [37], принципа бездуговой гибридной коммутации [32], [33], [34], [36], [37];
- 4) разработка инженерных алгоритмов проектирования различных конструктивных узлов гибридных НВА: механизма МЭМС-реле, токоведущих контуров, контактно-полупроводниковой ГИИС [38], электрических и кинематических схем гибридных НВА;
- 5) создание САМПП по разработке новых перспективных гибридных НВА.

Остановимся на рассмотрении физико-математического метода оптимального синтеза системы управляемой гибридной коммутации как направления объединения силовой электроники, электромеханики, микросистемной техники и гибридно-интегральной системы, образующей единую управляемую ГИИС с признаками, характерными для самоуправляемой системы [14], [38]. Гибридные НВА, предназначенные для коммутации электрических цепей систем электроснабжения постоянного тока, в своей структурной схеме (рис. 1) содержат по крайней мере пять взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем: электрическую, магнитную, механическую, полупроводниковую и тепловую. В целом полная математическая модель гибридных НВА относится к классу сложных моделей.

Теоретическая значимость работы состоит в объединении электромеханики, силовой электроники, микросистемной и гибридно-интегральной технологий через подсистемы: контактные ЭМК и бесконтактные СТК. Тем самым обеспечивается принцип преемственности наук, создается логически стройная, взаимосвязанная и взаимодействующая управляемая ГИИС с признаками самоуправляемой системы. При этом сами взаимосвязанные и взаимодействующие подсистемы – ЭМК-СТК – получили более качественное значение благодаря новым принципам гибридной коммутации, что представлено в технических решениях, признанных изобретениями [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38].

Практическая ценность определена тем, что полученные результаты повышают уровень понимания принципа действия гибридной коммутации, механизма работы ГИИС, подсистем ЭМК-СТК и всего ГА в целом, позволяют более осознанно и грамотно

подойти к вопросам их синтеза, моделирования и проектирования [6], [7], [13]. Более того, они дают возможность оперативно и качественно выполнить моделирование ГА, исследовать физико-математические методы синтеза систем оптимального управления гибридной коммутацией.

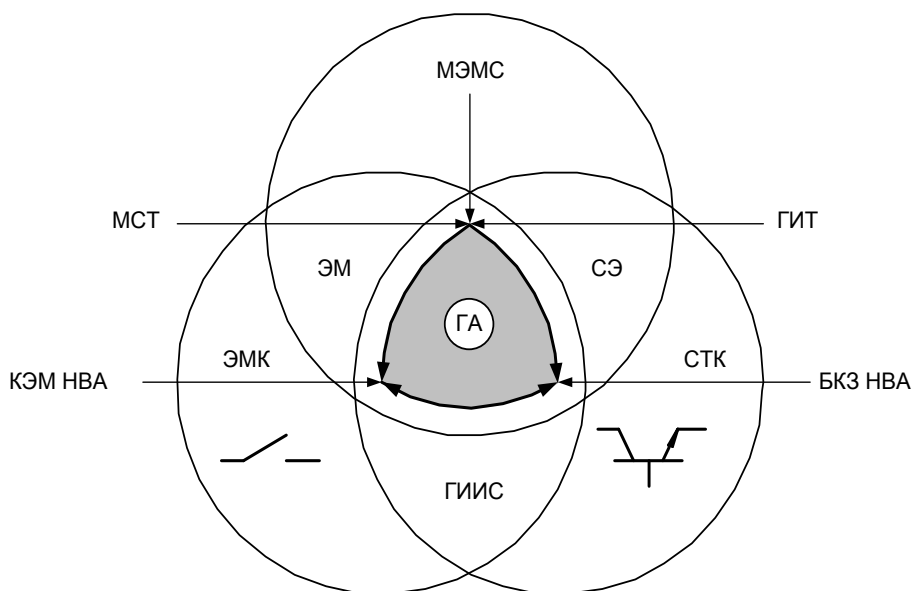


Рис. 1. Определение гибридной коммутации ГА как области исследования:
 ЭМ – электромеханика, СЭ – силовая электроника, ГИТ – гибридная интегральная технология,
 ЭМК – электромеханический контакт (ключ), СТК – силовой транзисторный ключ,
 КЭМ НВА – контактный электромеханический низковольтный аппарат, БКЗ НВА – бесконтактный
 коммутационно-защитный низковольтный аппарат, МСТ – микросистемная технология,
 МЭМС – микроэлектромеханическая система, ГИИС – гибридная интегрируемая интегральная система

Применим системный подход и к изучению проблемы моделирования ГА. Для успешного проведения названных выше исследований необходим универсальный комплекс компьютерного моделирования и проектирования – САМПР [1], [15], [24], [28], [31], [41], [42], [44], [45], [48]. На основе понимания проблемы моделирования гибридных НВА можно сформулировать различные варианты структурных целей. Один из них изложен в работе [7] и вполне согласуется с классификацией систем по степени ресурсной обеспеченности управления, предложенной в [39].

Задача структурного синтеза состоит в выборе оптимальной структуры исполнительного электромагнитного привода гибридных НВА для выполнения закона бездуговой коммутации на основе известных методов поиска экстремума функции нескольких переменных [20].

Задача параметрического синтеза включает решение двух подзадач: выбор параметров звеньев исполнительного электромагнитного привода гибридных НВА и формирование функций управления ЭМК-СТК. Совместное выполнение функций управления ЭМК-СТК обеспечит осуществление заданной бездуговой коммутации. Есть принципиальная возможность получения конструкции управляемой гибридной системы – ЭМК-СТК [38], которая в запатентованных схемах [32], [33], [34], [35], [36], [37] гибрид-

ной коммутации электрической цепи постоянного тока реализует процесс отключения, близкий к оптимальному, благодаря простоте схем. Проведенный системный анализ позволит решить задачу определения оптимальной гибридной бездуговой коммутации.

Задача САМПР гибридных НВА состоит в выборе оптимальных параметров управляемой ГИИС для реализации бездуговой коммутации. Исходными данными для синтеза параметров ГА являются рабочая среда и структура ГИИС, обеспечивающие оптимальное выполнение заданного закона бездуговой коммутации.

Пересечение теорий системного анализа, структурного и параметрического синтеза, методов поэтапного синтеза и оптимизации системы автоматического проектирования образует компьютерную САМПР гибридных НВА, представленную на рис. 2.

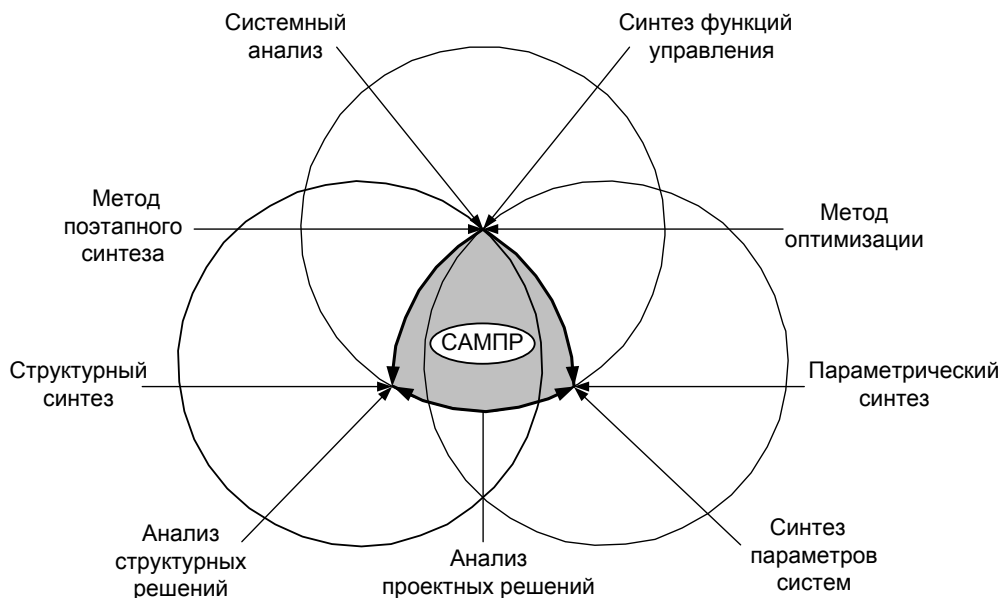


Рис. 2. Базовые физико-математические научные теории разработки гибридной бездуговой коммутации на основе универсального комплекса САМПР гибридных НВА

Анализ проектных решений делается для того, чтобы оценить синтезированную гибридную систему ГА, проверить допустимость и оптимальность выбранной структуры и параметров, а также режимов функционирования ГА при выполнении заданной бездуговой коммутации. Оценка исполнительного привода ГА осуществляется на основе анализа геометрических, кинематических и динамических характеристик ГА в целом.

Учитывая актуальность поставленной задачи и указанные выше проблемы, в качестве основных направлений работы по реализации оптимального режима коммутации по заданному закону бездуговой гибридной коммутации можно выделить следующие:

1) определение способа, позволяющего в процессе коммутации максимально уменьшить интенсивность электрического износа контактов в условиях бездуговой гибридной коммутации НВА;

2) разработку САМПР электрических коммутационных гибридных НВА, что позволит создавать более совершенные оптимальные конструкции на микроуровнях – МЭМС-реле, ГИИС;

3) реализацию компьютеризированной САМПР, требующей разработки новых математических моделей, более строго отражающих физические процессы, условия и режимы работы электрических коммутационных гибридных НВА;

4) обоснование и реализацию многокритериальной оптимизации процесса проектирования и моделирования гибридных НВА;

5) определение нового метода многокритериальной оптимизации, позволяющего подобрать аналог проектируемого аппарата, конструкций электромеханического привода (МЭМС-реле) [3], [47], ГИИС (ЭМК-СТК) [38], входящих в качестве подсистемы в САМПР гибридных НВА.

Дальнейшее развитие гибридных НВА будет зависеть от того, насколько эффективно решаются эти задачи и проблемы при разработке нового поколения ГА на основе новейших достижений силовой электроники, микроэлектромеханических и микросистемных технологий [3], [12], теории систем и системного анализа, математических моделей и автоматизации проектирования [6], [7], [15], [16], [19], [20], [21], [24], [28], [31].

Таким образом, автоматизация проектирования электрических коммутационных гибридных НВА определяется созданием оптимальных схмотехнических решений и конструкций. Она позволит ускорить сроки проектирования гибридных НВА и повысить их надежность. Реализация САМПР требует разработки новых математических моделей, оптимально отражающих физические процессы, происходящие при работе гибридных НВА.

Для создания промышленных гибридных НВА, превосходящих по массоэнергетическим характеристикам традиционную контактную аппаратуру, необходима реализация СТК в виде ГИИС, осуществляющей функции защиты СТК, формирования времятоковой характеристики, контроля и управления, а также реализация электромеханической системы в виде комплекта из множества МЭМС-реле [12].

Резюме. Сформулирована задача моделирования электрических гибридных НВА как совокупности подсистем различной физической природы. Предложена методика математического моделирования гибридных систем, основанная на поэтапном синтезе и анализе ГА, удовлетворяющих заданному закону бездуговой коммутации. Решены основные задачи поставленной проблемы по системному анализу, структурному и параметрическому синтезу, конечной целью которой является разработка универсального комплекса компьютерного моделирования и проектирования (САМПР), позволяющего создать управляемую гибридную систему, «идеальную» с точки зрения заданных критериев закона бездуговой гибридной коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арайс, Е. А. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ / Е. А. Арайс, В. М. Дмитриев. – М. : Радио и связь, 1982. – 160 с.
2. Бахвалов, Ю. А. Аналитический обзор методов расчета магнитных полей электрических аппаратов / Ю. А. Бахвалов, А. Г. Никитенко, В. Г. Щербаков // Электротехника. – 1997. – № 1. – С. 15–19.
3. Беляев, В. От электромеханических и дискретных решений к МЭМС/МСТ. МЭМС/МСТ в современной технике на примере автомобилестроения и авиации / В. Беляев // Электронные компоненты. – 2003. – № 2. – С. 27–34.

4. *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.
5. *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.
6. *Волкова, В. Н.* Основы теории систем и системного анализа / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – СПб. : СПбГТУ, 1999. – 512 с.
7. *Горитов, А. Н.* Моделирование манипуляционных робототехнических систем в условиях неполной информации о внешней среде / А. Н. Горитов. – Томск : ИОА СО РАН, 2005. – 276 с.
8. *Григорьев, А. А.* Анализ физических процессов износа электрических контактов коммутационных низковольтных аппаратов / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2014. – № 2 (82). – С. 3–13.
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 / Чуваш. гос. пед. ун-т. – 2013. – № 1 (20). – С. 37–42.
10. *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.
11. *Григорьев, А. А.* Создание нового поколения низковольтных гибридных аппаратов для специальной электротехники / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2013. – № 2 (78). – С. 49–58.
12. *Гриджин, А.* Микроэлектромеханические реле: технология ближайшего будущего / А. Гриджин // Электронные компоненты. – 2003. – № 7. – С. 38–40.
13. *Захаров, В. Н.* Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения / В. Н. Захаров // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1997. – № 3. – С. 138–145.
14. *Интеллектуальное управление динамическими системами* / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов, Б. Е. Федун. – М. : Физматлит, 2000. – 352 с.
15. *Информатика и компьютерное моделирование в электроаппаратостроении* / А. Г. Никитенко, И. И. Левченко, В. П. Гринченков, А. Н. Иванченко, О. Ф. Ковалев. – М. : Высшая школа, 1999. – 325 с.
16. *Канов, Л. Н.* Оптимальное управление коммутационными процессами в электротехнических цепях постоянного тока / Л. Н. Канов, В. А. Марактанов, Ю. С. Скларов // Третий национальный симпозиум с международным участием СИЕЛА–77: перспективы и проблемы автоматического аппаратостроения низкого напряжения. Доклады. – Пловдив : Б. и., 1977. – С. 69–74.
17. *Киклевич, Л. В.* Расчет стационарных тепловых режимов токоведущих систем электрических аппаратов / Л. В. Киклевич, И. В. Кудрявцев // Вестник Харьковского политехнического института. – 1979. – № 151. – С. 31–34.
18. *Ковалев, О. Ф.* Комбинированные методы моделирования магнитных полей в электромагнитных устройствах / О. Ф. Ковалев. – Ростов н/Д. : Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 220 с.
19. *Колонтаев, А. С.* Компьютерное моделирование электромеханических систем / А. С. Колонтаев, С. И. Маслов, Т. Н. Маслова. – М. : МЭИ, 1996. – 95 с.
20. *Кориков, А. М.* Основы системного анализа и теории систем / А. М. Кориков, Е. Н. Сафьянова. – Томск : ТГУ, 1989. – 207 с.
21. *Любчик, М. А.* Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов / М. А. Любчик. – М. : Энергия, 1974. – 392 с.
22. *Макаров, М. М.* Теория выбора и принятия решения / М. М. Макаров, Т. М. Виноградская, А. А. Рубчинский. – М. : Физматлит, 1982. – 315 с.
23. *Математическая теория оптимальных процессов* / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – М. : Наука, 1983. – 392 с.
24. *Математическое моделирование и автоматизация проектирования тяговых электрических аппаратов* / А. Г. Никитенко, В. Г. Щербаков, Б. Н. Лобов, Л. С. Любанова ; под ред. А. Г. Никитенко, В. Г. Щербакова. – М. : Высшая школа, 1995. – 610 с.
25. *Могилевский, Г. В.* Гибридные электрические аппараты низкого напряжения / Г. В. Могилевский. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
26. *Моисеев, Н. Н.* Элементы теории управляемых систем / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1975. – 526 с.

27. *Нами́токов, К. К.* Электроэрозионные явления / К. К. Нами́токов. – М. : Энергия, 1978. – 456 с.
28. *Никитенко, А. Г.* Автоматизированное проектирование электрических аппаратов / А. Г. Никитенко. – М. : Высшая школа, 1983. – 192 с.
29. *Никитенко, А. Г.* Исследование гашения электрической дуги при отключении индуктивных цепей постоянного тока / А. Г. Никитенко, К. В. Наталевич, Б. Н. Лобов // Электротехническая промышленность. Сер.: Аппараты низкого напряжения. – 1977. – № 4 (62). – С. 6–7.
30. *Никитенко, А. Г.* Математическая модель динамики включения электромагнитного аппарата / А. Г. Никитенко, Н. И. Ковалева, В. Я. Палий // Изв. вузов. Электромеханика. – 1987. – № 3. – С. 65–70.
31. *Никитенко, А. Г.* Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов : учебное пособие для вузов / А. Г. Никитенко, В. П. Гринченков, А. Н. Иванченко. – М. : Высшая школа, 1990. – 231 с.
32. *Пат.* 1721653 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / Григорьев А. А. [и др.] ; заявл. 22.06.89 ; опубл. 23.03.92.
33. *Пат.* 2050616 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Гибридный бездуговой аппарат / Григорьев А. А. ; заявл. 26.05.92 ; опубл. 20.12.95.
34. *Пат.* 2192682 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / Плотников В. И., Виноградов А. Л., Моисеев С. А. ; заявл. 05.07.2000 ; опубл. 10.11.02.
35. *Пат.* 2255390 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / Григорьева М. А. [и др.] ; заявл. 12.01.04 ; опубл. 27.06.05.
36. *Пат.* 2282265 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / Григорьева М. А. [и др.] ; заявл. 25.05.04 ; опубл. 20.08.06.
37. *Пат.* 2298249 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи / Григорьева М. А. [и др.] ; заявл. 14.07.04 ; опубл. 27.04.07.
38. *Пат.* 0201248 ЕВП, МПК Н 01 Н 9/54. Controlled electrical contacts for electrical switchgear / Needham Eric. ; заявл. 29.04.85 ; опубл. 12.11.86.
39. *Перегудов, Ф. И.* Основы системного анализа / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – Томск : НТЛ, 1997. – 396 с.
40. *Разевиг, В. Д.* Система схмотехнического моделирования MicroCap / В. Д. Разевиг. – М. : СЛПресс, 1996. – 225 с.
41. *Разработка САПР* : практическое пособие : в 10 кн. Кн. 6 : Выбор средств программно-технического комплекса САПР / под ред. А. В. Петрова. – М. : Высшая школа, 1990. – 159 с.
42. *Распертов, В. В.* Оптимальный синтез транзисторных аппаратов защиты для автономных СЭС постоянного тока / В. В. Распертов // Теория и практика силовых транзисторных устройств : сборник научных трудов / под ред. Е. В. Машукова. – М. : ЭКОН, 2001. – С. 27–31.
43. *Руа, Б.* Проблемы и методы принятия решения в задачах со многими целевыми функциями / Б. Руа // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М. : Мир, 1976. – С. 20–58.
44. *Свинцов, Г. П.* Моделирование и оптимизация электромагнитных приводов электрических аппаратов : автореф. дис. ... д-ра тех. наук : 05.09.01 / Г. П. Свинцов. – Чебоксары ; М., 2001. – 40 с.
45. *Таев, И. С.* Математическая модель для расчета на ЭВМ дуговых процессов в автоматических выключателях / И. С. Таев, С. В. Пархоменко, Ю. Е. Горшков // Изв. вузов. Электромеханика. – 1980. – № 3. – С. 308–315.
46. *Теория электрических аппаратов* : учебник для втузов по спец. «Электрические аппараты» / Г. Н. Александров и др. ; под ред. проф. Г. Н. Александрова. – М. : Высшая школа, 1985. – 312 с.
47. *Устройства управления электромагнитами* / Г. В. Могилевский, Б. В. Клименко, Ю. И. Гридин, З. Р. Бронникова, Г. Ш. Бер. – М. : Информэлектро, 1981. – 51 с.
48. *Цейтлин, А.* Интеграция современных CAD/CAM/CAE-систем / А. Цейтлин // RM Magazine. – 1999. – № 2. – С. 45–47.
49. *Шевченко, С. М.* Движение и удары в электрических аппаратах автоматического управления / С. М. Шевченко. – М. : Энергия, 1979. – 144 с.
50. *Электрические и электронные аппараты* : учебник для вузов / под ред. Ю. К. Розанова. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.