

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.316.54

ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ПРОЦЕССОВ КОММУТАЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ГИБРИДНЫХ АППАРАТОВ

OPTIMAL SYNTHESIS OF PHYSICAL PHENOMENA AND COMMUTATION PROCESSES OF LOW VOLTAGE HYBRID APPARATUSES

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. Рассматриваются проблема оптимального синтеза низковольтных гибридных аппаратов и физические явления, реализующие оптимальные законы коммутации; обсуждаются задача поиска оптимального управления физическими процессами при коммутации электрических цепей постоянного тока, а также факторы системного подхода к проблеме создания оптимального закона коммутации, суть которого состоит в разработке гибридной системы оптимальной коммутации, учитывающей свойства цепи и решающей задачу бездуговой коммутации гибридного аппарата в целом.

Abstract. The article discloses the problem of optimal synthesis of low voltage hybrid apparatuses and physical phenomena which realize the optimal laws of commutation. It discusses the task of searching for the optimal managing of physical processes while commutating direct current electrical circuits and also the factors of the systematic approach to the problem of creating an optimal law of commutation that could provide designing a hybrid system of optimal commutation which takes into consideration chain features and solves the problem of arcless commutation of a hybrid apparatus on the whole.

Ключевые слова: оптимальный синтез, гибридная коммутация, гибридный аппарат, оптимальное управление, низковольтные аппараты.

Keywords: optimal synthesis, hybrid commutation, a hybrid apparatus, optimal managing, a low-voltage apparatus.

Актуальность исследуемой проблемы. Для современных автономных систем электроснабжения (СЭС) основными требованиями являются высокая надежность, значительный срок функционирования, высокие удельные показатели массы на единицу коммутируемой мощности. СЭС, в частности космических аппаратов, отличаются сложностью электрооборудования, широким внедрением силовой электроники. Перспективы развития СЭС предполагают также рост энерговооруженности, что означает применение высоковольтной СЭС и решение возникающих в связи с этим проблем перенапряжений. Несоответствие между темпами внедрения современных достижений силовой электроники и электротехники и темпами исследований последствий этого делает необходимым совместное функционирование электромеханических контактных и электронных низковольтных аппаратов (НВА). Важность исследования коммутационных переходных процессов определяется их потенциальной опасностью для СЭС. Быстрое перераспределение и преобразование энергии при коммутациях в СЭС приводит к возникновению перенапряжений, способных нарушить нормальное функционирование элементов системы. Особенностью переходных процессов в автономных СЭС является их комплексное воздействие, которое выражается в импульсных помехах, в негативном воздействии на изоляцию и пробое силовых транзисторных ключей (СТК) [6].

Целью работы является оптимальный синтез коммутационных переходных процессов в автономных электрических цепях постоянного тока, а также анализ физических явлений и выбор оптимальных параметров схем, формирующих эти процессы.

В [5] сообщается о разработке в период 1997–2003 гг. и освоении производства низковольтных комбинированных (гибридных) реле серии РКН11 для СЭС космических аппаратов, которые создали основу для разработки коммутационных гибридных аппаратов (ГА) нового поколения [21], [22], отличающихся бездуговой гибридной коммутацией и высокой надежностью [1], [2], [3], [4], [5], [9], [10], [13], [17], [19].

Сравнительный анализ контактных и бесконтактных НВА показывает, что основные недостатки контактных аппаратов, обусловленные электрической дугой, и бесконтактных – повышенными статическими потерями, могут быть успешно устранены за счет использования в коммутационных ГА СТК с малым падением напряжения во включенном состоянии на основе новых технологий. Последние, согласно научно-техническим прогнозам, позволят в ближайшем будущем создавать «идеальные» СТК с токами до 100 А и падением напряжения во включенном состоянии менее 1 В. При этом СТК приближаются к идеальным по динамическим характеристикам, а электромеханические ключи (ЭМК) – по статическим. Кроме того, ЭМК позволяют обеспечить гальваническую развязку между электрическими цепями. Такие коммутационные ГА могут эффективно использоваться в автономных СЭС с повышенным уровнем напряжения 120/270/300 В, где сохраняется высокая вероятность искрения и дугообразования на контактах традиционных НВА в процессе коммутации при пониженном давлении в условиях космоса [3], [7], [9], [13], [17], [19].

Повышенные требования, предъявляемые к новому поколению коммутационно-защитных НВА, определяют необходимость развития теории и разработки методики исследований по их оптимальному синтезу. Оптимальный синтез физических явлений и процессов коммутации, приводящих к физическому обоснованию создания оптимального закона управляемой гибридной коммутации, может представлять значительный интерес с точки зрения техники и фундаментальной физики. На основе теории оптимального управления динамическими системами рассматривается проблема

оптимального управления коммутационными процессами в электрических цепях постоянного тока. Средством решения проблемы является поставленная в данной работе задача определения оптимального закона управляемой гибридной коммутации с использованием физико-математической теории оптимизации [4], [8], [14], [15], [16], [18], [28], [29].

Выделение энергии на коммутационном НВА в период отключения электрической цепи постоянного тока оказывает на него существенное влияние. Чрезмерное энерговыделение вызывает повышенный износ контактной системы отключающего НВА [7], уменьшает предельную частоту отключения и предельную отключающую способность, увеличивает время отключения нагрузки. Снижение выделения энергии при отключении электрической цепи повышает технико-энергетические показатели как коммутирующего НВА, так и нагрузки. Поэтому технико-энергетические показатели этого класса коммутационных НВА значительно влияют на надежность, энергосбережение и другие важные показатели эффективного функционирования автономных космических, воздушных, морских, наземных систем и комплексов. В этой связи актуальна проблема гашения дуги отключения, а также задача оптимального синтеза, ведущего к снижению выделения энергии на коммутационных НВА в период отключения электрической цепи постоянного тока. Актуальность разработки целостного подхода, основанного на анализе комплекса параметров коммутационного НВА и цепи, весьма велика. Значимость решения проблемы оптимальной гибридной коммутации определяется широкой областью применения коммутационных НВА [6].

Материал и методика исследований. Кардинальное решение проблемы коммутационных перенапряжений возможно при принципиальном изменении способа коммутации. Отсутствие теории оптимальной коммутации приводит к тому, что существующие решения основаны на эмпирическом опыте. В настоящее время в низковольтном аппаратостроении формируется направление по созданию коммутационных ГА нового поколения. Об этом свидетельствуют публикации, тематика НИОКР научно-исследовательских институтов и кафедр вузов [1], [2], [3], [4], [5], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [19], [27], [29], [30]. Такие ГА представляют перспективные технические решения, позволяющие практически исключить процесс дугообразования при коммутации. В настоящее время созданы ГА с различными схематехническими принципами: с параллельным (шунтирующим), параллельно-последовательным и последовательным соединениями электромеханического контакта (ЭМК) НВА и силового транзисторного ключа (СТК). Параллельное соединение ЭМК и СТК [20] позволяет исключить статические потери СТК, но при этом становится невозможным реализовать быстродействие СТК. Последовательное соединение ЭМК и СТК обеспечивает гальваническую развязку при сохранении быстродействия и возможностей регулирования [21], [22], [23], [24], [25], [26], которые полностью исключают дугообразование на контактах НВА.

Созданию гибридных НВА посвящено небольшое число исследований ввиду относительной новизны данного класса коммутационных НВА. Непосредственно относящиеся к рассматриваемой области следует считать зарубежные разработки, связанные с дистанционными регуляторами типа RPC [3], а также отечественные разработки комбинированных реле напряжения серии РКН11 [5], построенных на новом принципе гибридной коммутации НВА [1], [2], [5], [10], [21], [22]. Отсюда и общая тенденция современного развития электрических коммутационных гибридных НВА. Имеется ряд схемных ре-

шений по гибридной коммутации, признанных изобретениями, которые практически исключают дугообразование на коммутирующих силовых контактах гибридных НВА [20], [21], [22], [23], [24], [25].

Применяемые в автономных СЭС электрические коммутационно-защитные НВА характеризуются большим разнообразием работы и широким диапазоном изменения параметров. На сегодняшний день область применения коммутационно-защитных НВА в автономных СЭС проблематична. Применение оптимальных гибридных НВА в перспективных автономных СЭС с повышенным уровнем напряжения 120/270/300 В можно рассматривать как компромиссный вариант возможности положительного решения этой проблемы. Большие токи могут быть отключены без дуги лишь в том случае, если действующее напряжение не превышает 10 В. К настоящему времени можно считать обоснованным научное положение о том, что наиболее эффективным техническим направлением обеспечения высокой надежности является гибридная коммутация [1], [2], [3], [4], [5], [7], [8], [9], [13], [17], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Развитие силовой электроники позволило создать новый класс силовых полупроводниковых приборов – гибридные интегральные интеллектуальные схемы (ГИИС) [4]. В этих приборах в одном корпусе функционально объединены СТК и элементы управления. На основе ГИИС в настоящее время созданы компактные и многофункциональные коммутационные бесконтактные и гибридные аппараты с ориентацией на новейшие достижения технологии силовой электроники. Однако возможности силовой электроники по созданию СТК с малым падением напряжения во включенном состоянии на основе новых технологий не позволяют на сегодняшний день реализовать все преимущества гибридной коммутации электрических цепей постоянного тока.

Представляется рациональной многокритериальная физико-математическая оптимизация гибридных НВА: по массе, управлению, минимальному уровню энерговыделения в дуге отключения, предельно возможному уровню перенапряжений и надежности, если ставить и решать задачу структурной оптимизации гибридных НВА в составе автономной СЭС [4], [27]. В этой связи из обобщенной задачи оптимизации выделим ее разновидности, обеспечивающие оптимизацию варьируемых факторов (задача оптимального проектирования), оптимизацию управляемых воздействий (задача оптимального управления), оптимизацию структуры управляемой системы (задача выбора рациональных форм и исполнений с учетом второго этапа) [28].

На основе оптимального синтеза исследуются некоторые вопросы, связанные с динамикой изменений основных параметров электрической дуги в коммутационно-защитных НВА постоянного тока. Самые важные параметры дуги, влияющие на отключающий аппарат, – это энергия, максимальные значения мощности и восстанавливающегося напряжения. Время дуги предопределяет величину напряжения, мощности и энергии дуги, которые зависят еще от формы затухания тока [30]. В связи с этим целесообразно применить метод аппроксимации кривой затухания тока и способ анализа, что позволит охватить широкий предел разных видов гашения дуги постоянного тока, исследовать динамику изменения рассматриваемых параметров дуги и определить их максимальные значения. На основе метода аппроксимации кривой затухания тока во времени целесообразно рассматривать некоторые вопросы, связанные с динамикой изменений основных параметров нового, ранее не учитываемого показателя (p), определяющего форму затухания тока, который вместе с дуговым временем (s) предопределяет энергию, мощность, напряжение дуги и их максимальные значения. Этот показатель

может применяться при оценке, сравнениях и характеристике процесса отключения и работы гибридных НВА. Рассматриваемые параметры дуги зависят от параметров контура U , I , T , дугового времени s и новой величины, характеризующей форму кривой затухания тока, $-p$. Этими двумя последними величинами можно характеризовать процесс выключения, так как они определяют все параметры электрической дуги. Подбирая величины p и s , можно аппроксимировать каждую действительную кривую затухания тока. Изменяя величины p и s , можно воссоздавать, имитировать разные действительные и теоретические варианты кривых изменения и анализировать рассматриваемые параметры дуги и их динамику. Метод аппроксимации и анализа кривой затухания тока позволит оптимизировать коммутационные переходные процессы гашения дуги в электрических цепях постоянного тока. В работе рассматриваются проблема оптимального синтеза и задача поиска оптимального управления коммутационными процессами гибридных НВА, реализующих оптимальные законы управляемой гибридной коммутации [13], [14], [15], [16], [26], [27], [28], [29], [30].

Результаты исследований и их обсуждение. Основной характеристикой отключающего НВА постоянного тока (например, коммутационного гибридного НВА), определяющей время отключения, форму отключаемого тока и величину энергии, рассеиваемой в отключаемом аппарате, является зависимость напряжения от времени в процессе отключения тока коммутационным НВА.

Рассмотрим некоторые свойства коммутационного НВА с оптимальной характеристикой. Предварительно приведем понятие оптимальной характеристики. Под оптимальной характеристикой коммутационного НВА понимается такая зависимость напряжения на отключающем НВА от времени в процессе отключения тока в индуктивной цепи, которая обеспечивает минимальное время отключения тока при условии, что напряжение на отключающем НВА не превышает некоторого заданного максимально допустимого значения [30]. Учтем, что момент достижения отключающим НВА уставки по току отключения и момент появления напряжения на отключающем НВА в действительности для любого коммутационного реального аппарата разделены некоторым временем, называемым собственным временем. Поэтому такой аппарат будем называть отключающим НВА с оптимальной характеристикой и запаздыванием. Приняв во внимание, что наличие собственного времени лишь увеличивает значение начального тока отключения, можно заключить, что все свойства, которыми обладает отключающий НВА с оптимальной характеристикой, присущи и отключающему аппарату с оптимальной характеристикой и запаздыванием.

Таким образом, оптимальный коммутационный НВА должен обладать следующими свойствами:

- 1) эффективность действия отключающего НВА с оптимальной характеристикой определяется кратностью перенапряжения на отключающем аппарате;
- 2) время отключения тока зависит от относительных значений установившегося тока цепи и кратности напряжения на отключающем аппарате. При этом приходим к выводу, что при прочих равных условиях в одной и той же цепи меньшим временем отключения тока обладает отключающий НВА с меньшим собственным временем;
- 3) отключающий НВА с оптимальной характеристикой реализует наименьший возможный коэффициент ограничения тока;

4) в отключающем НВА с оптимальной характеристикой при отключении выделяется минимальное количество энергии, которое зависит от двух дополняющих свойств:

а) при фиксированном значении относительного установившегося тока цепи в отключающем НВА выделяется тем меньше энергии, чем больше кратность напряжения на отключающем аппарате;

б) при фиксированном значении кратности напряжения на отключающем НВА в отключающем аппарате выделяется тем меньше энергии, чем больше относительное значение установившегося тока цепи.

Следует отметить, что применением коммутационного гибридного НВА с оптимальной характеристикой реализуется близкий к идеальному (в смысле быстродействия и надежности) процесс отключения цепи постоянного тока. Перспективные схемы таких гибридных НВА с характеристикой, близкой к идеальной, приведены в патентах [21], [22], [23], [24], [25], [26].

При создании новых коммутационно-защитных НВА возникает проблема сравнения и оценки надежности работы НВА в период отключения. Проблема эта в значительной степени обусловлена отсутствием единых обобщенных критериев оценки. В настоящее время нормативными документами регламентируются в основном два параметра процесса отключения:

1) уровень коммутационных перенапряжений:

$$K_n = U_{к\max} / U_u,$$

где $U_{к\max}$ – максимальный уровень напряжения на НВА в период отключения; U_u – напряжение источника питания;

2) время отключения – τ .

Ограничения, накладываемые на эти параметры нормативными документами, в основном определяются условиями нормальной эксплуатации отключаемой нагрузки и в малой степени характеризуют коммутационный НВА [16].

В работе [30] предполагается для оценки и сравнения работы отключающих НВА использовать показатель степени p в полученных автором эмпирических зависимостях отключаемого тока и напряжения от времени – $i(t)$ и $U_k(t)$, в дальнейшем именуемых законом коммутации. Показатель p определяет форму кривой затухания тока (закон коммутации) при отключении. Принятый автором критерий позволяет довольно точно аппроксимировать законы коммутации широкого круга НВА и определять параметры процесса отключения. Однако проведенный автором анализ некоторых параметров процесса отключения на основе разработанного им эмпирического закона не дал положительных результатов в смысле определения оптимальной формы закона коммутации по всем рассмотренным параметрам. Это можно объяснить некорректностью примененного метода поиска оптимума и ограниченной рамками эмпирического закона областью допустимых значений рассматриваемых параметров. Автор в [30] делает предположение, что на НВА рассеивается вся энергия индуктивности нагрузки, накопленная к моменту отключения. Однако, как показал анализ [29], в период отключения на НВА рассеивается не вся энергия индуктивности, а только часть ее, другая часть рассеивается на активном сопротивлении нагрузки. Анализ показывает также, что количественное соотношение этих частей зависит от оптимального закона коммутации, реализуемого НВА.

Таким образом, принятый в [30] критерий не отражает в достаточной степени предельные оптимальные возможности коммутационных НВА, поэтому не может служить надежным ориентиром при оценке и сравнении оптимальной работы НВА, особенно вновь разрабатываемых аппаратов. Оптимальный закон коммутации на основе математического метода позволит оптимизировать выделение энергии от источника питания и другие значения энергетических характеристик процесса отключения.

При разработке нового поколения коммутационных гибридных НВА рекомендуется ориентироваться на следующее:

- анализ энергетического баланса в отключаемой цепи постоянного тока;
- оптимизацию энергии, поступающей на коммутирующие контакты НВА от источника питания в период отключения;
- оптимизацию энергии, выделяющейся за период отключения на коммутирующих контактах НВА;
- оптимизацию энергии, выделяющейся за период отключения на активном сопротивлении нагрузки;
- оптимизацию времени отключения нагрузки и величины коммутационных перенапряжений.

Как отмечается в [29], в отключаемой цепи постоянного тока значительная часть энергии, выделяющейся на НВА, поступает от источника питания. В работе [15] указывается на возможность уменьшения выделения энергии от источника питания в период отключения цепи постоянного тока путем оптимизации закона коммутации – зависимости тока в отключаемой цепи от времени.

Анализ энергетического баланса [29] показывает, что в отключаемой цепи, на ее активных элементах R и на коммутирующих контактах r_k , преобразуются и рассеиваются (в основном в виде тепла) два вида энергии – электромагнитная энергия W_3 , запасенная до начала процесса отключения в индуктивно-емкостной нагрузке, и электрическая энергия W_u , поставляемая в отключаемую цепь источником питания. Причем, количество энергии W_3 зависит только от параметров отключаемого контура (в общем случае нагрузки L, R, C и источника питания W_u), который нельзя регулировать, поскольку количество W_3 определено еще до начала отключения. Количество же энергии W_u зависит от закона коммутации (вида зависимости – $i(t), U_k(t), r_k(t)$). Изменяя закон коммутации (например, способ, принцип дугогашения или конструкцию дугогасительного устройства), можно изменять количество W_u и тем самым изменять общее количество энергии, рассеиваемой в коммутируемой цепи за период отключения.

От величины энергии W_u , поступающей в отключаемый контур от источника питания, зависит количество рассеиваемой энергии на всех включенных в цепь элементах. Поэтому величина W_u может служить обобщенным показателем качества оптимальной работы коммутирующих контактов НВА в период отключения. Поскольку количество энергии W_u зависит от закона коммутации, величина W_u дает обобщенную характеристику контактов и может служить критерием при разработке, сравнении и оценке коммутирующих контактов отключающих НВА.

Энергетические характеристики процесса отключения являются важными показателями критерия оптимальности и надежности работы гибридных НВА. Оптимальные значения энергетических характеристик могут послужить тем ориентиром, на которые следует равняться при создании нового поколения коммутационных гибридных НВА.

Решение сформулированной задачи оптимизации времени отключения было получено в общем виде в [14]. Поэтому остановимся только на результатах, которые свидетельствуют о том, что оптимальное по быстродействию и уровню коммутационных перенапряжений управление так же, как и во всех рассмотренных выше задачах, имеет релейный характер, а значит, закон коммутации $i(t)$ описывается уравнением (1) [16].

Таким образом, зная оптимальный закон изменения $U_k(t)$, можно определить в виде $i=f(t)$ закон коммутации, оптимизирующий выделение энергии источника питания в период отключения:

$$i = I_0 + I_0 K_n \left[\exp\left(-t/T - 1\right) \right]^{-1} \quad 0 \leq t \leq \tau,$$

или, в относительных величинах:

$$i = 1 + K_n \left[\exp\left(-t^* - 1\right) \right]^{-1} \quad 0 \leq t^* \leq \tau^*, \quad (1)$$

где i – текущее значение тока в период отключения;

$I_0 = U_u/R$ – отключаемый ток нагрузки;

U_u – напряжение источника питания;

R – активное сопротивление нагрузки;

$K_n = U_{k \max}/U_u$ – уровень коммутационных перенапряжений;

$U_{k \max}$ – максимальное за период отключения напряжение на коммутирующих контактах НВА;

t – текущее время;

$T = L/R$ – постоянная времени нагрузки;

τ – время отключения нагрузки;

L – индуктивность нагрузки;

$I^* = i/I_0$ – текущее значение тока, выраженное в относительных единицах;

$t^* = t/T$ – текущее значение времени, выраженное в относительных единицах;

$\tau^* = \tau/T$ – время отключения нагрузки, выраженное в относительных единицах.

В результате оптимизации энергетических параметров процесса отключения цепи постоянного тока в работе [14] получен закон коммутации $i(t)$ (1), оптимальный с точки зрения количества энергии, поступающей в отключаемую цепь от источника питания, количества энергии, выделяющейся на коммутирующем НВА и на нагрузке, количества электричества, протекающего в цепи за период отключения, а также времени и уровня коммутационных перенапряжений. Тот факт, что приведенный закон коммутации оптимизирует и энергетические, и временные параметры процесса отключения, дает основание полагать, что этот же закон является оптимальным и с точки зрения мощности, выделяющейся на элементах отключаемой цепи.

Из уравнения баланса напряжений в цепи, содержащей последовательно соединенные с источником питания активно-индуктивную нагрузку и коммутирующие контакты НВА, можем получить уравнение энергетического баланса (2) [16]:

$$W_u + W_\varepsilon = W_k + W_n \quad (2)$$

или

$$U_u \int_0^\tau i dt + L \int_{I_0}^0 i di = R \int_0^\tau i^2 dt + \int_0^\tau U_k i dt, \quad (3)$$

где

$U_k = U_k / U_n$ – напряжение на коммутирующем элементе;

$W_n = U_n \int_0^{\tau} i dt$ – количество энергии, поступающей в отключаемую цепь за период

отключения от источника питания;

$W_3 = L \int_{I_0}^0 i di$ – количество энергии, запасенной в электромагнитном поле нагрузки к

моменту отключения;

$W_n = R \int_0^{\tau} i^2 dt$ – количество энергии, рассеивающейся за период отключения на ак-

тивном сопротивлении нагрузки;

$W_k = \int_0^{\tau} U_k i dt$ – количество энергии, рассеивающейся за период отключения на коммути-
рующих контактах.

Изменяя закон коммутации, можно существенно изменять количество энергии, выделяющейся в отключаемом НВА от источника питания [16]. Вероятно, существует такой закон коммутации, при котором выделение энергии от источника питания, а значит и общее энерговыделение в цепи, будет минимальным. Здесь следует отметить, что такой важный параметр коммутационных НВА, как количество электричества, протекающего через контакты за период отключения, определяет величину эрозии контактов [7].

Можно утверждать, что закон коммутации (1), оптимальный с точки зрения энергии, выделяющейся в период отключения от источника питания, является оптимальным и с точки зрения количества электричества, протекающего в отключаемом контуре. В результате оптимизации энергетических параметров процесса отключения цепи постоянного тока получен закон коммутации $i(t)$ (1) [14], оптимальный с точки зрения количества энергии, поступающей в отключаемую цепь от источника питания; количества энергии, выделяющейся на контактах НВА и на нагрузке; количества электричества, протекающего в цепи за период отключения, а также времени и уровня коммутационных перенапряжений.

В широком диапазоне изменения зависимостей $i(t)$ полученный оптимальный закон коммутации (1), оптимизирующий важнейшие энергетические характеристики процесса отключения, позволит разработать оптимальные критерии оценки и сравнения коммутационных НВА. Все возможные варианты процесса отключения рассмотреть практически невозможно, поэтому полученные результаты необходимо в дальнейшем оптимизировать на основе системного анализа математического моделирования и проектирования (САМР) [4].

На сегодняшний день отсутствует единый обобщенный закон процесса оптимальной гибридной коммутации, связанный с созданием гибридных НВА. Большинство существующих коммутационных НВА реализуют законы коммутации, весьма далекие от оптимального. Это приводит к тому, что разработанные аппараты получают работоспособными, но не оптимальными, и им предстоит долгий путь доработки при серийном освоении на заводах-изготовителях. Закон позволит найти оптимальный управляемый процесс гибридной бездуговой коммутации в качестве обобщенного критерия оценки надежности гибридных НВА. При этом, вероятно, будет достигнут оптимум по всем параметрам гибридных низковольтных коммутационных аппаратов. Проведенное исследование показало, что вопросы повышения отключающей способности коммутационных

НВА, создания гибридных аппаратов на повышенные напряжения 120/270/300 В могут быть решены путем разработки принципиально новых способов оптимальной коммутации, которые позволят обеспечить бездуговое отключение электрических цепей постоянного тока [21], [22], [23], [24], [25]. Для целенаправленного подхода к исследованиям коммутационных гибридных НВА с оптимальной бездуговой коммутацией необходимо знать условия функционирования таких аппаратов и предельные возможности улучшения ими основных характеристик процесса коммутации [1], [2], [3], [4], [9], [10], [13], [19].

Тот факт, что полученный в [15] закон коммутации оптимизирует и энергетические, и временные параметры процесса отключения, дает основание полагать, что этот же закон является оптимальным и с точки зрения мощности, выделяющейся на элементах отключаемой цепи. Следовательно, для существенного уменьшения энерговыделения в дуге достаточно, чтобы коммутационный аппарат реализовал процесс отключения, близкий к оптимальному, при незначительном уровне коммутационных перенапряжений. Классическая коммутация сопровождается электрической дугой, свойства которой и определяют комплекс недостатков существующих коммутационных НВА, но в то же время снижают уровни перенапряжений. Дуговая коммутация не оптимальна из-за возможности среза тока, повторных зажиганий, несинхронности и эрозии контактов [7].

Кардинальное решение проблемы коммутационных перенапряжений заключается в принципиальном изменении способа коммутации на основе комплексного и контролируемого использования двух основных факторов: активных потерь и длительности процесса коммутации. В качестве наиболее значимых критериев оптимизации можно назвать выделяемую в коммутационном НВА энергию и ее соотношение с энергией, накопленной в коммутируемой цепи, относительную длительность процесса коммутации, амплитуду перенапряжений и пиковую мощность. Общий принцип оптимальной коммутации можно сформулировать следующим образом: коммутационный НВА в цепи должен осуществлять изменения не за минимальное время, на какое он сам способен, а за время, на какое способна коммутируемая система. Главной причиной возникновения перенапряжений является коммутация элементов системы, поэтому основное внимание уделено разработке теории оптимальной коммутации. Применение оптимальной коммутации позволит существенно уменьшить амплитуду колебательного переходного процесса.

Дальнейшее улучшение характеристик процесса коммутации может быть достигнуто применением схемных [21], [22], [23], [24], [25] и конструктивных [10], [26] решений, которые реализуют близкий к оптимальному процесс отключения отличающихся простотой и сохранением всех достоинств контактных и бесконтактных НВА. Это позволит создать управляемую систему гибридной коммутации, реализующую оптимальный процесс отключения минимальной длительности на основе силовых гибридных интеллектуальных интегральных схем (ГИИС) [4], [13], [26]. Физическая и аппаратная реализация метода оптимальной коммутации приводит к проектированию нового поколения коммутационных гибридных НВА [4].

Резюме. Разработаны основы теории оптимальной коммутации, решающей проблему минимизации энергии, выделяемой в гибридном НВА. Оптимальный синтез создает возможности проникновения в сущность физических явлений, позволяет сделать важный вывод: изменяя закон коммутации, можно существенно изменять количество энергии, выделяющейся в отключаемом гибридном НВА от источника питания, при этом, вероятно, существует такой закон коммутации, при котором энерговыделение от источника питания, а значит и общее энерговыделение в цепи, будет минимальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *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.
3. *Ваткина, М. А.* Проблемы создания коммутационных низковольтных гибридных аппаратов для автономных систем электроснабжения / М. А. Ваткина, А. А. Григорьев, Ф. Н. Михайлов // Научно-информационный вестник докторантов, аспирантов, студентов / Чуваш. гос. пед. ун-т. – 2014. – № 1 (21). – С. 22–32.
4. *Ваткина, М. А.* Системный анализ проблемы моделирования гибридных систем коммутационных низковольтных аппаратов / М. А. Ваткина, А. А. Григорьев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2014. – № 3 (83). – С. 3–12.
5. *ВНИИР 1961–2011.* Нам только 50. – М. : Азбука, 2011. – С. 117–119.
6. *Глухов, О. А.* Импульсные переходные процессы в автономных электроэнергетических системах : автореф. дис. ... д-ра тех. наук : 05.09.03 / О. А. Глухов. – СПб., 2000. – 32 с.
7. *Григорьев, А. А.* Анализ физических процессов износа электрических контактов коммутационных низковольтных аппаратов / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина, В. А. Филиппов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2014. – № 2 (82). – С. 3–13.
8. *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.
9. *Григорьева, М. А.* К разработке гибридных аппаратов с последовательным включением главных контактов и силовых полупроводниковых приборов / М. А. Григорьева, С. А. Моисеев, В. И. Плотников // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, автоматизированный электропривод : материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары, 2001. – С. 177–179.
10. *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 им. И. Я. Яковлева. – 2012. – № 4 (76). – С. 58–63.
11. *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.
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.* 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.
14. *Канов, Л. Н.* Оптимальное управление коммутационными процессами в электротехнических цепях постоянного тока / Л. Н. Канов, В. А. Марактанов, Ю. С. Складов // Третий национальный симпозиум с международным участием СИЕЛА–77. Перспективы и проблемы автоматического аппаратостроения низкого напряжения. Доклады. – Пловдив : Б. и., 1977. – С. 69–74.
15. *Канов, Л. Н.* Оптимизация коммутационных процессов в электрических цепях низкого напряжения : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.09.05 / Л. Н. Канов. – Киев, 1991. – 15 с.
16. *Комиссаренко, А. И.* Гибридные коммутационные аппараты постоянного тока с отделением источника питания для снижения энерговыделения в дуге отключения : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.09.06 / А. И. Комиссаренко. – М., 1981. – 20 с.
17. *К разработке многофункционального гибридного коммутационного аппарата / М. А. Григорьева и др.* // Электрические электронные аппараты : труды АЭН Чувашской Республики. – 2003. – № 3. – С. 32–34.
18. *Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин и др.* – М. : Наука, 1983. – 392 с.

19. *Перспективы* развития комбинированных коммутационно-защитных аппаратов специального назначения с применением нормально открытых силовых полупроводниковых приборов / М. А. Григорьева и др. // *Электрическое питание: системы и источники вторичного электропитания и элементная база для них* : сб. докл. науч. техн. конф. Спец. выпуск. – М. : Б. и., 2004. – С. 127–132.
20. *Пат.* 2050616 Российская Федерация, МПК Н 01 Н 9/30. Гибридный бездуговой аппарат / Григорьев А. А.; заявл. 26.05.92; опубл. 20.12.95.
21. *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.
22. *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.
23. *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.
24. *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.
25. *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.
26. *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.
27. *Распертов, В. В.* Транзисторные аппараты защиты и коммутации для низковольтных систем постоянного тока : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03 / В. В. Распертов. – М., 2001. – 20 с.
28. *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.
29. *Ткаченко, Ю. С.* Энергетический баланс дугowych коммутаторов в отключающих аппаратах постоянного тока / Ю. С. Ткаченко, В. Н. Мельничук // *Электротехническая промышленность. Сер. : Аппараты низкого напряжения.* – 1976. – № 8. – С. 1–3.
30. *Янкович, С.* Некоторые зависимости между формой затухания тока и временем горения дуги, а также напряжением, мощностью и энергией в контакторах постоянного тока / С. Янкович // Третий национальный симпозиум с международным участием СИЕЛА–77. Перспективы и проблемы автоматического аппаратостроения низкого напряжения. Доклады. – Пловдив : Б. и., 1977. – С. 60–68.