

На правах рукописи

**Лекарев Анатолий Федорович**

**ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ**

Специальность 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2004



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Изучение и освоение космоса требует развития и совершенствования космических аппаратов (КА) различного назначения, в том числе непилотируемых, для которых необходимы более жесткие ограничения по точности ориентации, коррекции параметров орбиты, увеличение срока эксплуатации вплоть до морального износа.

Электромеханические системы (ЭМС) используются в системах ориентации, наведения антенных установок радиотелескопов и станций космической связи, системах терморегулирования, технологических гелиоустановках космического базирования, оптико-электронных, астрономических и аналогичных устройствах, обеспечивающих функционирование КА.

Для управления ЭМС широко используются широтно-импульсные преобразователи электрической энергии (ШИП). Они гармонически сочетаются со всеми основными типами источников электропитания КА, такими, как солнечные батареи, топливные элементы, термоэлектрические генераторы.

Значительный вклад в теоретические исследования и разработку методологии проектирования ШИП внесли отечественные ученые С.С. Букреев, Г.В. Грабовецкий, Ю.И. Драбович, Г.С. Зиновьев, В.Н. Ильин, А.Ф. Кадацкий, В.И. Кадель, Г.В. Кожарский, Ю.И. Конев, В.А. Лабунцов, В.С. Моин, И.П. Норенков, Э.М. Ромаш, В.Е. Тонкаль, А.И. Чернышев и другие.

Системы с электромеханическими исполнительными органами – электроприводами (ЭП) отличаются от систем с другими приводами высокой надежностью электромеханических преобразователей (ЭМП) – электродвигателей (ЭД), возможностью оперативной перенастройки законов регулирования, большим разнообразием управляющих устройств, совместимых с управляющими контроллерами и ЭВМ высшего уровня управления.

Вопросам исследования и развития ЭП посвящено большое количество работ, среди которых особое место занимают фундаментальные исследования известных ученых: М.Г. Чиликина, А.С. Сандлера, А.Д. Поздеева, В.В. Рудакова, Ю.П. Петрова, Ю.А. Борцова, Б.Ш. Бургина, В.Г. Кагана, Т.А. Глазенко, А.В. Башарина, М.Х. Бельмана, Р.М. Трахтенберга, Р.А. Кулесского, Н.И. Лебедева, И.Е. Овчинникова, А.Е. Козярука, Ю.А. Сабина, В.П. Шипилло и многих других.

Использование ЭМС в составе КА постоянно требует повышения их надежности, качества регулирования и общего КПД, снижения уровня помех, массы и габаритов. Один из радикальных путей повышения надежности, расширения функциональных возможностей и улучшения

общих характеристик ЭМС – это отказ от использования щеточных электрических контактов и переход к бесконтактным ЭД. Поэтому разработка регуляторов ШИП бесконтактных ЭП, обладающих пониженной чувствительностью к вариациям параметров силовой части, включая исполнительный механизм, при высоких быстродействии, точности, КПД и минимальном усложнении управляющей части является актуальной научно-технической задачей.

**Цель диссертационной работы** – разработка высокоточных регуляторов ШИП, обеспечивающих надежную работу ЭП КА в статических и динамических режимах, в том числе с рекуперацией энергии, при высоком быстродействии, КПД и минимальном усложнении. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- синтез закона управления и разработка алгоритмов структурно-параметрического синтеза регуляторов ШИП, сочетающих принципы управления с обратной связью и прогнозированием;
- разработка модуляторов, обеспечивающих работу ключевых элементов ШИП в режимах потребления и рекуперации энергии;
- разработка многофазных цифровых устройств для бесконтактных ЭП (сумматоров, формирователей сигнала переноса, задатчиков напряжения и т.д.), обладающих повышенной надежностью.

**Диссертация выполнена** в соответствии с планами основных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых ФГУП «НПЦ «Полус» по постановлениям Правительства и в рамках целевой федеральной программы модернизации и повышения надежности бортовых приборов и систем КА по теме «Гироскоп», а также по разработке бесконтактных герметичных экранированных ЭД с улучшенными массогабаритными, энергетическими и ресурсными параметрами для систем охлаждения КА по теме «Задел-Полус-ВЭД».

**Методы исследования** базируются на теории дискретных систем управления, теории устойчивости, теории дифференциальных и алгебраических уравнений, вычислительных методах, современных инструментальных системах и методах математического моделирования.

**Научная новизна работы** заключается в создании законов управления ЭМС, основанных на энергетических критериях. Результаты, полученные впервые:

- создана структурированная математическая модель бесконтактного ЭП на базе синхронного ЭД с возбуждением от постоянных магнитов;
- разработан закон управления ЭП с прогнозированием среднего за период модуляции значения напряжения на индуктивности силовой цепи;
- разработан закон управления ЭП с прогнозированием приращения тока в силовой цепи;
- созданы новые регуляторы, цифровые устройства для бесконтактных ЭП, защищенные авторскими свидетельствами и патентами.

**Практическая ценность** диссертационной работы состоит в создании высокоточных регуляторов ШИП ЭП КА, обладающих высоким быстродействием и инвариантных к возмущениям по напряжению питания и нагрузке, обеспечивающих работу ключевых элементов ШИП без сквозных токов и управляемость в режиме рекуперации энергии. Предложенные законы управления ЭП по энергетическим критериям установившегося режима носят универсальный характер, они реализуемы в ШИП, в которых преобразование основано на накоплении и передаче энергии реактивными элементами системы.

**Реализация полученных результатов.** Разработанные законы управления и алгоритмы структурно-параметрического синтеза регуляторов использовались при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок на ФГУП «НПЦ «Полус» (г. Томск):

- в бесконтактных ЭП для промышленных роботов, освоенных на Томском приборном заводе, применен модулятор ширины импульсов, а.с. СССР № 1374378 «Устройство для управления инвертором» и а.с. СССР № 1603509 «Устройство для управления трехфазным мостовым инвертором», а в цифровом контуре управления – устройства по а.с. СССР № 868750 «Устройство для суммирования» и а.с. СССР № 922728 «Устройство для формирования сигнала переноса при суммировании многофазных кодов»;

- по программе разработки бесконтактных вентильных герметичных экранированных электродвигателей с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов с улучшенными массогабаритными, энергетическими и ресурсными параметрами для систем охлаждения КА – математические модели узлов бесконтактного электродвигателя ДБЭ 63–2,5–6,3, блока вентиляторов БВ-001, а также математические модели ШИП с законом управления по патенту РФ № 2214618 «Способ управления с широтно-импульсным регулированием».

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями» (Свердловск, 1983); II научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Москва, ВНИИЭМ, 1984); III Всесоюзном совещании по робототехническим системам (Воронеж, 1984); Всесоюзном научно-техническом семинаре по электромеханотронике (Ленинград, 1989); II научно-технической конференции «Устройства и системы автоматики автономных объектов» (Красноярск, 1990); XV научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства» (Томск, НПЦ «Полус», 1997); Korus' 99. The Third Russian–Korean International Symposium on Science and Technology (Russia, Novosibirsk, 1999); XVI научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы

и устройства» (Томск, НПЦ «Полюс», 2000); Международном технологическом конгрессе «Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения» (Омск, 2001); Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, ТПУ, 2001); IV Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, ОмГТУ, 2002); Международной научно-практической конференции «САКС-2002» (Красноярск, СибГАУ, 2002); Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы» (Томск, ТПУ, 2003); Всероссийской научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2003); Всероссийской научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2004).

**Публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 39 печатных работах, в том числе в центральных изданиях: журналах «Электричество» и «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика», а также сборниках научных трудов, 21 изобретении, защищенном авторскими свидетельствами и патентами РФ.

**На защиту автором выносятся** следующие основные научные результаты и положения диссертации:

– математическая модель бесконтактного ЭП на базе синхронного ЭД с возбуждением от постоянных магнитов, состоящая из моделей его структурных звеньев, позволяющая описать работу ЭП в реальных электрических и механических координатах и определить наиболее эффективные стратегии управления;

– регуляторы ШИП, управление которых основано на энергетических критериях и сочетании принципов управления с обратной связью и прогнозированием, что позволило создать высокоточные ЭП с пониженной чувствительностью к вариациям параметров силовой части, включая исполнительный механизм, при высоком быстродействии, КПД и минимальном усложнении управляющей части;

– структуры и алгоритмы управления регуляторов, модуляторов и цифровых устройств, повышающих надежность и обеспечивающих работу бесконтактных ЭП в статических и динамических режимах при потреблении и рекуперации энергии.

**Достоверность полученных в диссертации результатов** подтверждается математическими доказательствами, моделированием, экспериментальными данными, использованием разработанных методов и алгоритмов в изготавливаемых и эксплуатируемых ЭП.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность совершенствования законов управления ЭМС КА, формулируются цели работы, указывается научная новизна исследования, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Отмечено, что проектирование ЭМС включает последовательное решение множества взаимосвязанных задач, начиная с согласования технического задания, выпуска рабочих чертежей и заканчивая выпуском всей конструкторской документации. Эти задачи в последние годы решаются на основе применения вычислительной техники. Утверждается, что эффективным способом уменьшения чувствительности ЭМС к параметрическим возмущениям служит создание скользящих режимов движения, которые возможны в системах с переменной структурой, где поведение регулируемой переменной в пределах зоны гистерезиса не зависит от параметрических возмущений. Доказывается, что сочетание принципов управления с обратной связью и прогнозированием позволяет реализовать ЭМС, обладающие пониженной чувствительностью к вариациям параметров силовой части системы при высоких быстродействии и точности.

**В первой главе** рассмотрены структуры управляемых ЭМС и функционирование их основных узлов, показаны особенности применения ШИП, приведены модели важнейших узлов ЭМС, обоснована структура модели для исследования бесконтактных ЭП.

Делается вывод о том, что за счет своей экономичности и простоты в управлении синхронный ЭД с возбуждением от постоянных магнитов наиболее удобен для создания бесконтактных ЭП КА.

На основе классификации и анализа специфики применения ШИП для управления электромеханическими объектами (ЭМО) выделены их основные признаки: дискретный характер управления, наличие пульсаций на управляющих входах, наличие нуля передаточной функции в правой комплексной полуплоскости (у некоторых схем), сложность упругих механических систем, возможность существования режимов прерывистого тока и рекуперации энергии в первичный источник, многообразие структур и алгоритмов преобразования, нестационарность и нелинейность параметров ЭМО и первичного источника питания.

Отмечается, что современные пакеты схемотехнического моделирования объединяют возможности моделирования на компонентном и функциональном уровне, поэтому эффективно используются для исследования и проектирования ЭМС. Электромеханические аналогии позволяют изучать механические системы на компонентном уровне, что дает возможность более наглядно учитывать влияние отдельных параметров на характеристики системы. При этом моделирование отдельных узлов ЭМС может производиться на

функциональном (формированием передаточных функций) и на компонентном (использованием электромеханических аналогий) уровне.

Модель бесконтактного ЭП на базе синхронного ЭД с возбуждением от постоянных магнитов, состоит из моделей его структурных звеньев: регулятора, силовой электрической цепи, электромеханических преобразований в ЭД и механической части системы (рис. 1).

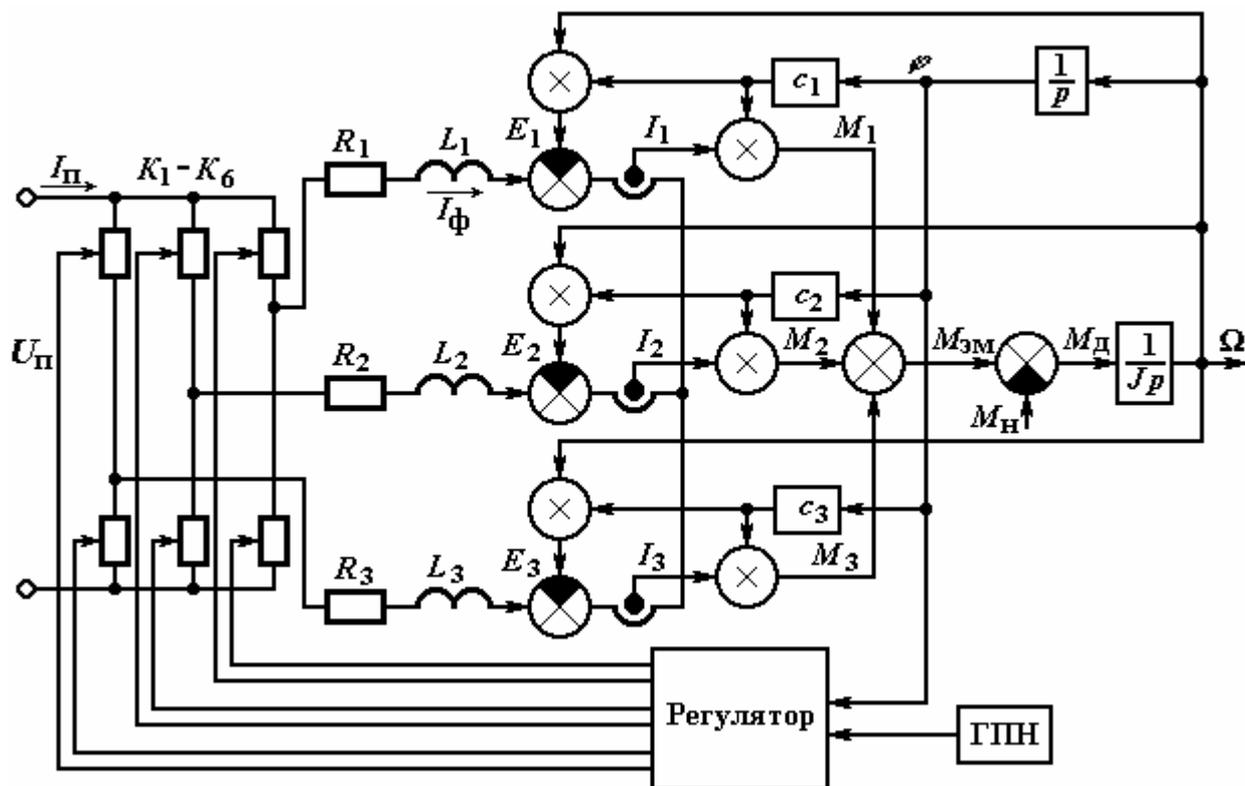


Рис. 1. Модель бесконтактного ЭП на базе синхронного ЭД с возбуждением от постоянных магнитов

Модель регулятора построена на компонентном и частично на функциональном уровне.

Модель силовой электрической цепи ЭП реализована на компонентном уровне и включает ключевые элементы ШИП, сопротивления, индуктивности и ЭДС обмоток ЭД.

Модели электромеханических преобразований в ЭД и его механической части построены на функциональном уровне с использованием операций умножения, а также управляемых источников напряжения и тока.

Показано, что на периоде коммутации силовую цепь синхронного ЭД с возбуждением от постоянных магнитов можно привести к однофазной. Поэтому для упрощения модели бесконтактного ЭП при синтезе законов управления использована модель силовой части ЭП постоянного тока, а механическая часть представлена электромеханическими аналогиями с параметрами, приведенными к силовой электрической цепи ЭД (рис. 2);

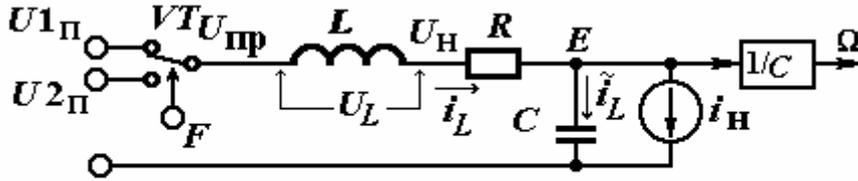


Рис. 2. Модель силовой части ЭП постоянного тока

$$i_L = \frac{M_{\text{ЭД}}}{c_M}; \quad i_H = \frac{M_H}{c_M}; \quad E = c_M \Omega; \quad C = \frac{J}{c_M^2},$$

где:  $M_{\text{ЭД}}$ ,  $M_H$  – момент вращения на валу ЭД и нагрузки;  $\Omega$  – частота вращения;  $J$  – момент инерции на валу ЭД;  $c_M$  – коэффициент преобразования ЭД.

**Вторая глава** посвящена разработке законов управления ШИП ЭП. В их основу положен тезис о взаимной обусловленности процессов управления и процессов преобразования электрической энергии в механическую, а также необходимость формирования управляющего сигнала в функции текущих и прогнозируемых параметров состояния силовой части схемы.

Динамический синтез и оптимизацию процессов управления предлагается осуществлять непосредственно по энергетическому критерию - равенству нулю среднего за период повторения импульсов значения напряжения на индуктивности силовой цепи. При этом закон управления имеет вид (пат. 2216764 РФ)

$$F = x + \kappa_c \begin{pmatrix} t_p & T \\ \int U1_L dt + \int U2_L dt & \\ 0 & t_p \end{pmatrix}, \quad VT = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t_p \leq t_k; \\ 0 & \text{при } t_k \leq t_p \leq T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x$  - сигнал ошибки;  $U1_L$ ,  $U2_L$  – напряжение на индуктивности до и после коммутации ключевого элемента;  $t_p = T\{t/T\}$  – временная координата для формирования сигнала развертки ( $\{a\}$  – дробная часть числа  $a$ );  $T$  – длительность периода модуляции;  $VT$  – состояние ключевого элемента ( $VT=1$  – включено напряжение питания  $U1_{\text{п}}$ ,  $VT=0$  – включено напряжение питания  $U2_{\text{п}}$ );  $t_k$  – момент коммутации ключевого элемента, определяемый наименьшим положительным корнем уравнения  $F=0$ , когда  $U1_{\text{п}} = U_{\text{п}}$ , а  $U2_{\text{п}} = 0$ , и наименьшим по модулю отрицательным корнем, когда  $U1_{\text{п}} = 0$ , а  $U2_{\text{п}} = U_{\text{п}}$ ;  $\kappa_c$  – коэффициент, минимальное значение которого определяется по условию устойчивости колебаний на частоте синхронизации в стационарных режимах.

При использовании в законе управления производной сигнала ошибки сигнал развертки должен представлять собой временную зависимость прогнозируемых значений пульсирующей составляющей тока

$\tilde{i}_L = i_L - i_n = C \frac{dE}{dt} = C\dot{x}$ , определяющей реактивную мощность, потребляемую при перезарядке реактивных элементов непрерывной части. Для ШИП с односторонней модуляцией получен закон управления (пат. 2156996 РФ):

$$F = x + k_m \tilde{i}_L + k_m Y_p;$$

$$Y_p = \frac{1}{L} \int_{t_p}^T U_{2L} dt + \frac{1}{TL} \int_0^{t_p} \left( \int_0^{t_p} U_{1L} dt \right) dt - \frac{1}{TL} \int_{t_p}^T \left( \int_{t_p}^T U_{2L} dt \right) dt; \quad (2)$$

где  $k_m$  – коэффициент связи;  $Y_p$  – сигнал развертки.

Для ШИП с двухсторонней модуляцией получен закон управления (пат. 2223529 РФ):

$$F_{(+)} = x + k_m \tilde{i}_L + k_m Y_{p(+)}; \quad Y_{p(+)} = \frac{1}{L} \int_{t_{p(+)}}^T U_{L(+)} dt;$$

$$F_{(0)} = x + k_m \tilde{i}_L + k_m Y_{p(0)}; \quad Y_{p(0)} = \frac{1}{L} \int_{t_{p(0)}}^T U_{L(0)} dt;$$

$$(3)$$

$$VT = \begin{cases} 1 & \text{при } t_{p(+)} \geq t_{\kappa(+)}; \\ 0 & \text{при } t_{p(0)} \geq t_{\kappa(0)}, \end{cases}$$

где  $F_{(+)}$ ,  $F_{(0)}$  – управляющие сигналы для включения положительного и нулевого напряжения питания;  $Y_{p(+)}$ ,  $Y_{p(0)}$  – сигналы развертки для включения положительного и нулевого напряжения питания;  $U_{L(+)}$ ,  $U_{L(0)}$  – напряжения на индуктивности силовой цепи после соответствующего переключения ключевых элементов;  $t_{(0)} = T\{t/T\}$ ,  $t_{(+)} = T\{(t+T/2)/T\}$  – временные координаты для формирования сигналов разверток.

Показано, что при исследовании устойчивости определение области параметров, соответствующей затухающим процессам сводится к определению области устойчивости линеаризованной системы. Непрерывная часть ШИП является фильтром и удовлетворяет критериям устойчивости. Определена граница области реализации предложенных алгоритмов управления в которой исключается возможность возбуждения кратных частот:  $T < \sqrt{2LC}$ . Это ограничение должно выполняться в практических схемах ШИП

Законы управления ШИП (1) – (3) обеспечивают нечувствительность к возмущениям по напряжению питания и нагрузке, двухсторонняя модуляция (3) уменьшает чувствительность к параметрическим возмущениям вследствие взаимной компенсации возможных отклонений,

кроме того, эти законы позволяют создавать для ЭП на единой основе регуляторы скорости, момента и токоограничения. Разработаны алгоритмы формирования поправок для учета режима прерывистых токов и для управления ЭП с двухмассовой механической частью.

**В третьей главе** предлагаются аналитические решения уравнений, прогнозирующих пульсирующую составляющую тока в непрерывной части системы, анализируются законы управления и схемы реверсивных ШИП, приводятся схемы модуляторов, обеспечивающие работу ключевых элементов в режимах потребления и рекуперации энергии.

Для повышения быстродействия ШИП с законом управления (2) предложены аналитические решения уравнений для сигнала развертки (пат. 2214618 РФ)

$$Y_p = \frac{1}{TL} \int_0^t \left( \int_0^t (U_{1L} - U_{2L}) dt \right) dt + \frac{U_{2L}T}{2L} \text{ или } Y_p = \frac{(U_{1L} - U_{2L})t_p^2}{2LT} + \frac{U_{2L}T}{2L},$$

а с законом управления (3) (пат. 2223529 РФ, п.1)

$$Y_{p(+)} = \frac{U_{L(+)}T}{L} - \frac{1}{L} \int_0^{t(+)} U_{L(+)} dt; \quad Y_{p(0)} = \frac{U_{L(0)}T}{L} - \frac{1}{L} \int_0^{t(0)} U_{L(0)} dt, \text{ или}$$

$$Y_{p(+)} = \frac{U_{L(+)}(T - t(+))}{L}; \quad Y_{p(0)} = \frac{U_{L(0)}(T - t(0))}{L}.$$

Для сохранения вида модуляции и оптимальной последовательности переключения ключевых элементов реверсивного ШИП с односторонней двухполярной модуляцией разработан алгоритм управления со сдвигом на половину периода модуляции сигнала периодической развертки при смене полярности опорного напряжения (пат. 2202144 РФ).

Для реверсивного ШИП с односторонней однополярной модуляцией предложен алгоритм с отдельными каналами управления для каждой полярности по закону (1) (пат. 2223530 РФ).

Для реверсивного ШИП с двухсторонней однополярной на периоде модуляцией предложено формировать три сигнала управления (пат. 2223529 РФ, п.2):

$$F_{H(+)} = x + k_m \tilde{i}_L + k_m Y_{p(+)}, \quad Y_{p(+)} = \frac{U_{\Pi} - U_{\text{H}}}{L} (T - t_p);$$

$$F_{H(-)} = x + k_m \tilde{i}_L \dot{x} + k_m Y_{p(-)}, \quad Y_{p(-)} = \frac{-U_{\Pi} - U_{\text{H}}}{L} (T - t_p); \quad (4)$$

$$F_{H(0)} = x + k_m \tilde{i}_L + k_m Y_{p(0)}, \quad Y_{p(0)} = \frac{-U_{\text{H}}}{L} (T - t_{p(0)}),$$

где  $t_p = T \{t/T\}$ ;  $t_{p(0)} = T \{(t+T/2)/T\}$ .

На рис. 3 приведена схема реверсивного ШИП с двухсторонней однополярной на периоде модуляции и законом управления (4).

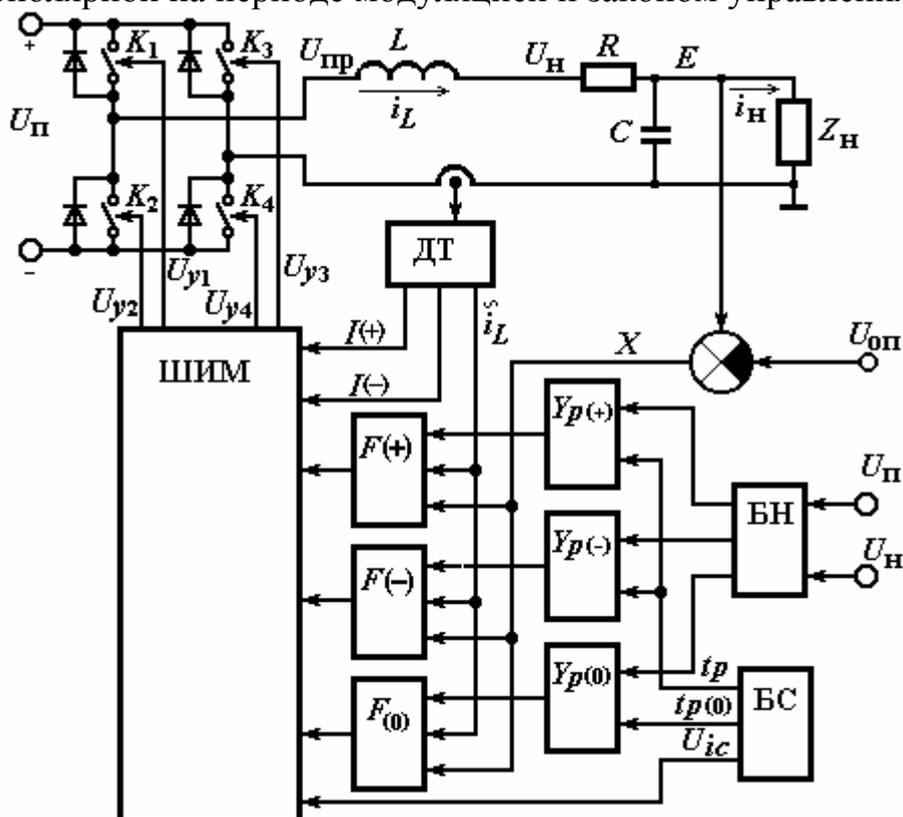


Рис. 3. Схема реверсивного ШИП с двухсторонней однополярной модуляцией

Показано, что использование для реверсивных ШИП законов управления (2) и (3) увеличивает полосу пропускания и стабильность фазы выходного напряжения, что важно для бесконтактных ЭП.

Предложены алгоритмы работы ключевых элементов реверсивного ШИП для режимов потребления и рекуперации энергии. Режим потребления энергии с положительным напряжением реализуется включением ключевых элементов  $K_1$  и  $K_4$  ШИП (рис. 3), а режим паузы – отключением одного из включенных ключевых элементов, режим рекуперации энергии осуществляется отключением всех их, а режим паузы (при рекуперации) – включением ключевого элемента  $K_2$  или  $K_3$  отрицательной диагонали, соответственно потребление энергии с отрицательным напряжением реализуется включением ключевых элементов  $K_2$  и  $K_3$  ШИП, а режим паузы – отключением одного из включенных, режим рекуперации энергии – отключением всех ключевых элементов, а режим паузы – включением  $K_1$  или  $K_4$ .

На рис. 4 приведены диаграммы входных и выходных сигналов модулятора при активно-индуктивной нагрузке и смене полярности выходного напряжения, а на рис. 5 – при смене полярности тока дросселя.

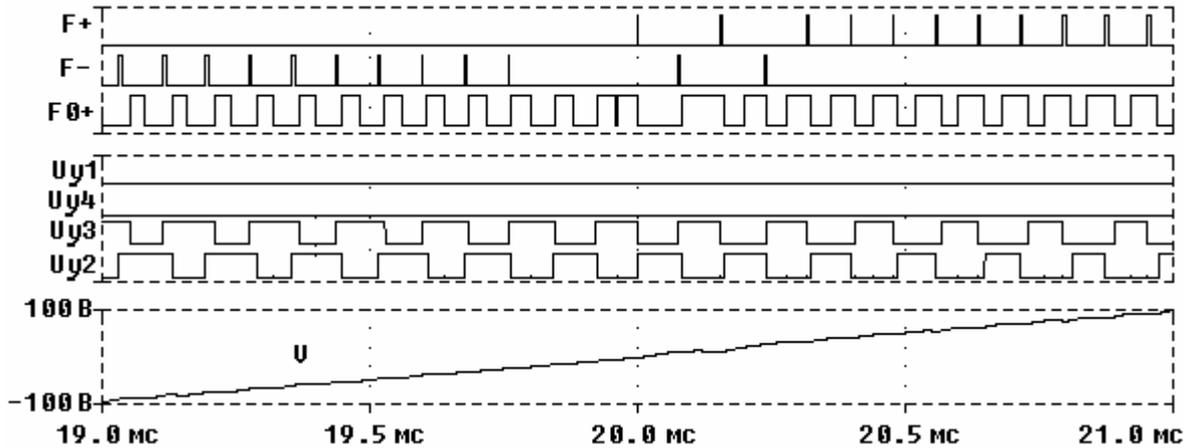


Рис. 4. Диаграммы входных и выходных сигналов модулятора при смене полярности выходного напряжения ШИП

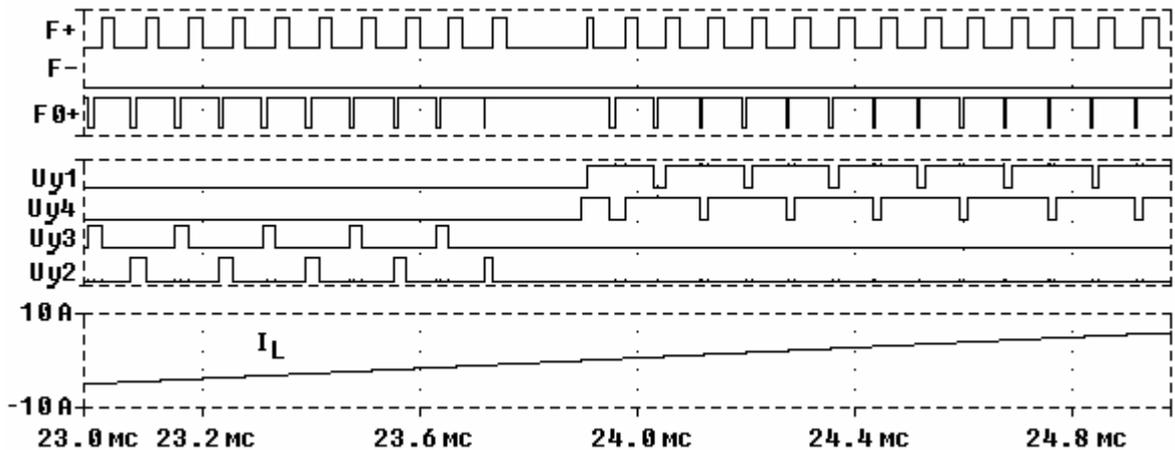


Рис. 5. Диаграммы входных и выходных сигналов модулятора при смене полярности тока дросселя

Из диаграмм видно, что обеспечивается безопасное управление ключевыми элементами реверсивного ШИП в режимах потребления и рекуперации энергии с частотой коммутации ключевых элементов в два раза ниже частоты модуляции напряжения питания и переключением в момент коммутации только одного ключевого элемента.

**Четвертая глава** содержит результаты разработки специализированных цифровых устройств, работающих в многофазном коде, предназначенных для бесконтактных ЭП, данные исследований энергетических характеристик бесконтактного ЭП на базе синхронного ЭД с возбуждением от постоянных магнитов, а также разработки бесконтактного ЭП для систем терморегулирования КА.

Многофазный код из-за своей избыточности и симметричности дает возможность создавать высоконадежные устройства с исправлением возможных ошибок при обработке информации. Для многих систем, в том числе и для ЭП, многофазные коды являются естественными, а их избыточность и симметричность позволяет исправлять кодовые ошибки, не используя математические вычисления, управлять значением и формой

выходного напряжения ШИП контролеспособными цифровыми схемами при сохранении полной симметрии выходного напряжения.

На рис. 6 показан ШИП с цифровым задатчиком реверсивного трехфазного прямоугольного напряжения питания с периодом коммутации 120 эл.град. (а.с. 1603509), который содержит: блок пилообразных напряжений (БПН), блок модуляции (БМ), блок защиты (БЗ), логический блок (ЛБ).

Формирование сигналов, управляющих переключением ключевых элементов  $K_1-K_6$ , определяется логическими выражениями:

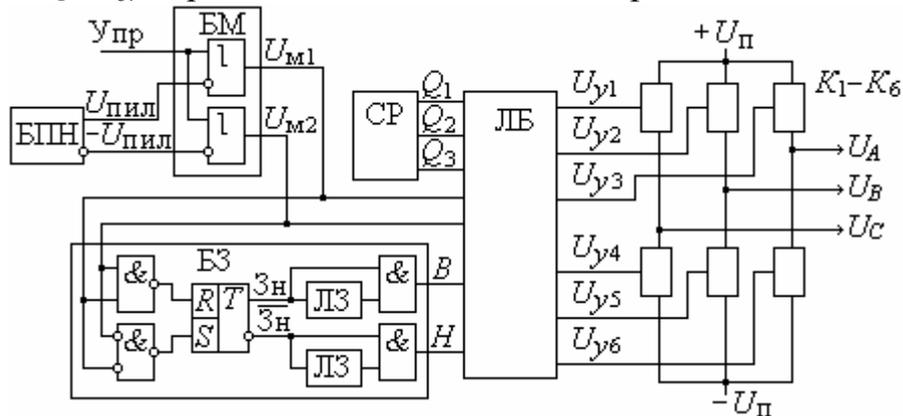


Рис. 6. ШИП с цифровым задатчиком трехфазного прямоугольного напряжения питания с периодом коммутации 120 эл.град.

$$\begin{aligned}
 U_{y1} &= Q_1 \wedge Q_2 \wedge U_{M1} \wedge B \vee \overline{Q_1} \wedge \overline{Q_2} \wedge \overline{U_{M2}} \wedge H; \\
 U_{y2} &= Q_2 \wedge Q_3 \wedge U_{M1} \wedge B \vee \overline{Q_2} \wedge \overline{Q_3} \wedge \overline{U_{M2}} \wedge H; \\
 U_{y3} &= Q_3 \wedge \overline{Q_1} \wedge U_{M1} \wedge B \vee \overline{Q_3} \wedge \overline{Q_1} \wedge \overline{U_{M2}} \wedge H; \\
 U_{y4} &= \overline{Q_1} \wedge \overline{Q_2} \wedge U_{M2} \wedge B \vee Q_1 \wedge Q_2 \wedge \overline{U_{M1}} \wedge H; \\
 U_{y5} &= Q_2 \wedge Q_3 \wedge U_{M2} \wedge B \vee \overline{Q_2} \wedge \overline{Q_3} \wedge \overline{U_{M1}} \wedge H; \\
 U_{y6} &= \overline{Q_3} \wedge \overline{Q_1} \wedge U_{M2} \wedge B \vee \overline{Q_3} \wedge \overline{Q_1} \wedge \overline{U_{M1}} \wedge H.
 \end{aligned}$$

В соответствии с кодовыми сигналами положения ротора  $Q_1, Q_2, Q_3$  и сигналами направления вращения  $B$  или  $H$  в блоке ЛБ осуществляется прохождение сигналов  $U_{M1}, U_{M2}$  или  $\overline{U_{M1}}, \overline{U_{M2}}$  на управляющие входы соответствующих ключевых элементов  $K_1-K_6$  ШИП в течение 120 эл.град.

Такой алгоритм управления обеспечивает работу в одной стойке коммутатора одного ключевого элемента в любой зоне коммутации. Тем самым устранены условия для возникновения сквозных токов.

Для выбора формы напряжения питания синхронных ЭД проведены испытания двигателя ДСТ с номинальным вращающим моментом 10 Н·м при питании его трехфазным ШИП, реализующим синусоидальную и прямоугольную с периодом 120 и 180 эл.град. коммутацию напряжения питания.

Исследования показали преимущество прямоугольной с периодом 120 эл.град. коммутации, которая обеспечивает лучшую стабилизацию угла между магнитными потоками статора и ротора ЭД на всем диапазоне частот вращения. Отклонение угла коммутации напряжения питания на 1 эл.град. от оптимального вызывает отклонение магнитного потока поля статора на 11 эл.град. при синусоидальной форме напряжения питания, до 15 эл.град. при прямоугольной форме напряжения питания с периодом коммутации 180 эл.град. и только на 2 эл.град. при прямоугольной форме напряжения с периодом коммутации 120 эл.град.

Предложена схема бесконтактного ЭП постоянного тока (рис. 7), в которой реализован закон управления (4) с токоограничением и прямоугольная коммутация напряжения питания с периодом 120 эл.град., ключевые элементы коммутатора  $K_1-K_6$ , собраны по мостовой трехфазной схеме, к выходным шинам коммутатора через датчик тока ДТ подключен синхронный ЭД, на валу ЭД установлен кодовый преобразователь положения (КПП), на выходных шинах которого формируются цифровые сигналы положения  $\phi_y$  и частоты вращения  $\Omega$  вала ЭД. Регулятор ЭП содержит логический блок (ЛБ), блок модуляции (БМ), блок формирования управляющих сигналов (УС), блок формирования сигналов периодической развертки (БПР), арифметический блок (БА) и управляемый выпрямитель (УВ).

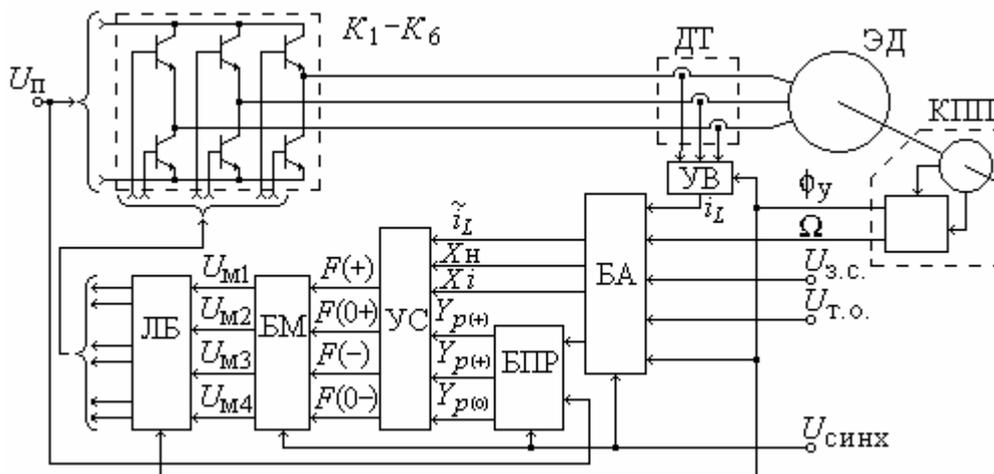


Рис. 7. Схема бесконтактного ЭП постоянного тока

Рис. 8 иллюстрирует пуск ЭП до скорости вращения 525 рад/с под нагрузкой 0,027 Н·м. Здесь приведены диаграммы выпрямленного тока  $i_L$ , тока в обмотке ЭД  $i_{L1}$ , сигнала скорости вращения  $\Omega$ , а также динамического момента на валу ЭД  $M_d$ , напряжения питания на входе ЭП  $U_{\Pi}$  и постоянной составляющей напряжения потребляемого ЭД  $E_{дв} + i_L R$ .

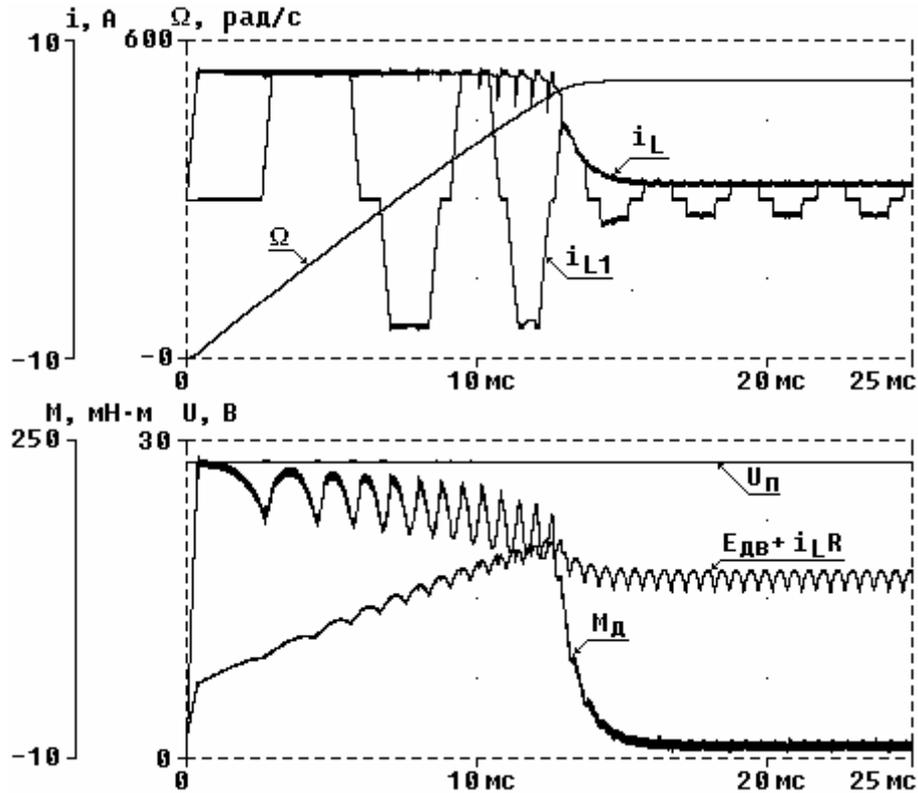


Рис. 8. Пуск ЭП до скорости вращения 525 рад/с под нагрузкой 0,027 Н·м

Из диаграмм (рис. 8) видно, что в режиме регулирования скорости пульсации динамического момента на валу ЭД от переключения обмоток незначительны и вызваны, в основном, широтно-импульсной модуляцией, ток в обмотках ЭД – прямоугольной формы, без всплесков и провалов при переключении обмоток.

**В заключении** сформулированы выводы по диссертационной работе.

**В приложения** вынесены PSpice-модели ШИП и ЭП, использованные при синтезе регуляторов и для исследования их характеристик, и акт о внедрении результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработана модель бесконтактного ЭП, состоящая из моделей блока управления, силовой цепи ЭП, электромеханических преобразований энергии в ЭД и механической части, позволяющая оценить работу любого узла в реальных электрических и механических координатах, при различных стратегиях управления.

2. Разработаны законы управления и алгоритмы структурно-параметрического синтеза регуляторов ШИП, основанные на

энергетических критериях и сочетающие принципы управления с обратной связью и прогнозированием, на их основе создан быстродействующий регулятор скорости вращения с токоограничением для бесконтактного ЭП (длительность пуска под нагрузкой 0,027 Н·м с токоограничением 8 А до частоты вращения 525 рад/с не превышает 15 мс, а реверс – 30 мс, переходный процесс при сбросе нагрузки с 0,027 до 0,007 Н·м на частоте вращения 525 рад/с длится менее 0,1 мс).

3. Созданы модуляторы для реверсивных ШИП, обеспечивающие безопасное управление ключевыми элементами в режимах потребления и рекуперации энергии с частотой коммутации ключевых элементов в два раза ниже частоты модуляции напряжения питания и переключением в момент коммутации только одного ключевого элемента.

4. Для бесконтактного ЭП созданы специализированные цифровые устройства работающие в многофазных кодах, использование которых, за счет избыточности и симметричности многофазного кода, повысило надежность и быстродействие схем обработки сигналов импульсных и кодовых преобразователей положения ротора, цифроаналоговых преобразователей, задатчиков многофазного напряжения.

Достоверность приведенных в диссертации результатов подтверждается математическими доказательствами, моделированием, результатами практических разработок. Экспериментальная отработка подтвердила высокое качество выходных параметров ЭП и совпадение расчетных и экспериментальных данных на 90%.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. А.с. 744994 СССР. Реверсивное счетное устройство / В.И. Кочергин, С.В. Кульбицкий, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 1978. № 24.
2. А.с. 807457 СССР. Электропривод с вентильным двигателем / В.И. Кочергин, А.Ф. Лекарев, С.В. Кульбицкий // Открытия. Изобретения. 1981. № 7.
3. А.с. 826341 СССР. Устройство для умножения / В.И. Кочергин, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 1981. № 16.
4. А.с. 868750 СССР. Устройство для суммирования / А.Ф. Лекарев, В.И. Кочергин // Открытия. Изобретения. 1981. № 36.
5. А.с. 913432 СССР. Преобразователь скорости выходного вала в код / В.И. Кочергин, С.В. Кульбицкий, А.М. Кривенцов, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 1982. № 10.
6. А.с. 922728 СССР. Устройство для формирования сигнала переноса при суммировании многофазных кодов / В.И. Кочергин, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 1982. № 15.
7. А.с. 1374378 СССР. Устройство для управления инвертором / А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 1988. № 6.

8. А.с. 1603509 СССР. Устройство для управления трехфазным мостовым инвертором / А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 1990. № 40.
9. А.с. 1633393 СССР. Устройство для формирования сигнала переноса при суммировании многофазных кодов / А.Ф. Лекарев, Э.А. Майзингер // Открытия. Изобретения. 1991. № 9.
10. Баранов Н.С., Лекарев А.Ф. Имитационная модель вентильного электропривода исполнительного механизма // Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства: Сб. науч. трудов НПО «Полус». Томск, 1992. Т. 2. Проектирование и технология электрических машин и приборов. С. 150–154.
11. Эйрих В.И., Бутаков А.Н., Лекарев А.Ф. Математическая модель силового гироскопа с магнитным подвесом маховика // Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства. Сб. науч. трудов НПО «Полус». Томск, 1992. Т. 2. Проектирование и технология электрических машин и приборов. С. 93–97.
12. Казанцев Ю.М., Чернышев А.И., Лекарев А.Ф. Формирование квазискользющих процессов в импульсных преобразователях с ШИМ // Электричество. 1993. № 12. С. 45–49.
13. Пат. 2026599 РФ. Модулятор ширины импульсов мостового инвертора / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев, Д.П. Христенко // Открытия. Изобретения. 1995. № 1.
14. Пат. 2050575 РФ. Способ автоматического управления с широтно-импульсным регулированием / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев, В.В. Лапаев // Открытия. Изобретения. 1995. № 35.
15. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Уменьшение потерь в двухтактных импульсных преобразователях напряжения // Электронные и электромеханические устройства: Сб. науч. трудов НПО «Полус». Томск, 1997. С. 73–79.
16. Казанцев Ю.М., Бутаков А.Н., Лекарев А.Ф. Синтез функциональных моделей и исследование динамики систем маховичного электропривода с использованием универсального программного обеспечения // Труды ВНИИЭМ. М., 1997. Т.97. Электромеханические устройства космических аппаратов. С. 116–125.
17. Kazantsev J.M., Lekarev A.F. Direct synthesis of control in transforming engineering // Proceedings The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (June 22–25, 1999, Novosibirsk, Russia). Vol. 2 P. 727–731.
18. Пат. 2145145 РФ. Преобразователь напряжения / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2000. № 3.
19. Пат. 2156996 РФ. Способ управления преобразователем электрической энергии / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2000. № 27.

20. Анализ электромагнитной совместимости систем преобразовательной техники на имитационных моделях / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев, А.М. Гаврилов, А.В. Катков // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов НПЦ «Полус». Томск: Изд. МГП «РАСКО», 2001. С. 101–110.

21. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Метод прямого синтеза управления в преобразовательной технике // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов НПЦ «Полус». Томск: МГП «РАСКО» при изд. «Радио и связь», Томск, 2001. С. 131–140.

22. Ю.М. Казанцев, А.И. Чернышев, А.Ф. Лекарев. Новый метод синтеза управления в преобразовательной технике // Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения: Сб. докл. технологического конгресса. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. Ч. 2. С. 154–157.

23. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Метод синтеза регулятора для электропривода // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Томск: ТПУ, 2001. С. 86–87.

24. Пат. 2185703 РФ. Многоканальный блок периодической развертки для управляемого многофазного выпрямителя / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2002. №20.

25. Лекарев А.Ф., Казанцев Ю.М. Метод синтеза регулятора электропривода с двигателем постоянного тока // Динамика систем, механизмов и машин: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., посв. 60-летию ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. С. 180–183.

26. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Математическое моделирование и синтез регулятора бесконтактного эл.привода // САКС-2002: Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск: СибГАУ, 2002. С. 356–358.

27. Пат. 2197059 РФ. Блок периодической развертки для преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2003. № 2.

28. Пат. 2202144 РФ. Следящий инвертор с двухполярной широтно-импульсной модуляцией / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2003. № 10.

29. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Разработка модели и синтез регулятора бесконтактного электропривода // Приборы и системы. Сер. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 6. С. 22–25.

30. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Синтез инвариантного к параметрическим и координатным возмущениям управления систем с полупроводниковыми преобразователями // Материалы междунар. науч.-техн. конф. Томск: ТПУ, 2003. С. 176–179.

31. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф., Тихонов Е.Г. Метод синтеза управления следящими инверторами систем электропитания // Электронные средства и системы управления: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Томск: Изд-во ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2003. С. 48.

32. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Динамический синтез импульсных преобразователей с двухзвенным фильтром // Электронные средства и системы управления: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Томск: Изд-во ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2003. С. 56.

33. Пат. 2214618 РФ. Способ управления с широтно-импульсным регулированием / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2003. № 29.

34. Пат. 2216764 РФ. Способ управления с широтно-импульсным регулированием / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2003. № 32.

35. Пат. № 2223529 РФ. Способ управления преобразователем с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2004. № 4.

36. Пат. № 2223530 РФ. Способ управления преобразователем с широтно-импульсной модуляцией / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Открытия. Изобретения. 2004. № 4.

37. Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф., Тихонов Е.Г. Синтез управления следящими инверторами систем электропитания // Приборы и системы. Сер. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 6. С. 20–25.

38. Положительное решение по заявке на изобретение № 2002117853 от 08.06.2004. Способ управления бесконтактным электродвигателем постоянного тока / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев.

39. Чернышев А.И., Казанцев Ю.М., Поляков С.А., Лекарев А.Ф. Способ регулирования систем электропитания космических аппаратов // Электронные средства и системы управления: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Томск: Изд-во ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2004. Ч. 1. С. 152–154.