

На правах рукописи

Гагарин Сергей Алексеевич



**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ АЛГОРИТМОВ
ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ
МЕХАНИЗМОМ ПРИВОДА С ТРЁХФАЗНЫМ
ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Специальность 05.02.02

«Машиноведение, системы приводов и детали машин»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2012 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: Кривилёв Александр Владимирович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: Горячев Олег Владимирович
доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет,
заведующий кафедрой «Системы
автоматического управления»

Трубачёв Александр Тимофеевич
кандидат технических наук,
ОАО «Аэроэлектромаш»,
главный специалист

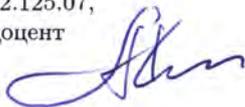
Ведущая организация: ОАО «АКБ «Якорь» (г. Москва)

Защита состоится «13» ноября 2012 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, главный административный корпус, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «21» сентября 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07,
кандидат технических наук, доцент



А. Б. Кондратьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение эффективности использования потребляемой энергии является одной из основных тенденций развития современных приводных систем и сложных электротехнических комплексов, что связано с такими потребностями, как увеличение продолжительности работы автономных устройств, сокращение рассеиваемой мощности и снижение массовых и габаритных показателей. Основное преобразование энергии в электрическом приводе происходит в его исполнительном механизме (ИМ), где всё чаще применяются трёхфазные вентильные двигатели (ВД) вследствие целого ряда технических и эксплуатационных преимуществ перед коллекторными двигателями постоянного тока и асинхронными двигателями. На сегодняшний день среди методов управления ИМ с трёхфазными ВД одно из лидирующих положений прочно удерживает импульсный метод, что обусловлено высоким коэффициентом полезного действия (КПД) современных силовых ключей, работающих в режиме переключения. В последнее время подобные ИМ в совокупности с датчиками обратной связи (ДОС) и цифровым устройством управления (ЦУУ) часто рассматривают как единый функциональный блок, называемый мехатронным модулем (ММ). В этом случае на ЦУУ ММ возлагается задача по организации процесса коммутации ключевых элементов (КЭ) импульсного усилителя мощности (ИУМ) в соответствии с заданным алгоритмом импульсного управления.

Работы по созданию и исследованию энергетически эффективных алгоритмов импульсного управления на основе векторной широтно-импульсной модуляции (ВШИМ) ведутся на протяжении двух последних десятилетий. Большинство как зарубежных, так и отечественных работ в данной области направлено на анализ спектрального состава фазных токов и напряжений, сокращение коммутационных потерь мощности в КЭ ИУМ и расширение диапазона регулирования скорости. Однако, зависимости статических, динамических и энергетических характеристик ИМ с трёхфазным ВД от способа ВШИМ, как правило, остаются за рамками проводимых исследований, что существенно затрудняет выбор приемлемого цифрового алгоритма для той или иной задачи управления.

Учитывая практический неограниченный количество возможных вариантов алгоритмов импульсного управления на основе ВШИМ, развитие автоматизированных подходов к проектированию ЦУУ и исследованию ММ с ИМ на базе трёхфазного ВД являются актуальными задачами, решение которых позволит не только улучшить показатели приводных систем, но и сократить временные затраты на их проектирование.

Целью работы является разработка метода синтеза цифровых алгоритмов импульсного управления ИМ привода с трёхфазным ВД на основе ВШИМ, позволяющего автоматизировать получение математического описания ЦУУ ММ, а также статических, динамических и энергетических характеристик ИМ привода.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе необходимо было поставить и решить следующие **задачи**:

1. Сделать обзор существующих цифровых алгоритмов импульсного управления на основе ВШИМ, выполнить их систематизацию и определить возможные направления для разработки новых алгоритмов, которые позволят улучшить статические, динамические и энергетические характеристики ИМ привода с трёхфазными ВД.

2. Разработать автоматизированный подход к получению математического описания управляющих булевых функций (УБФ) для произвольного алгоритма импульсного управления на основе ВШИМ и применить его для описания цифровых алгоритмов.

3. Разработать компьютерную модель ММ с трёхфазным ВД, позволяющую исследовать информационные и энергетические процессы при произвольном алгоритме импульсного управления на основе ВШИМ.

4. Разработать программный комплекс на основе компьютерной модели ММ, позволяющий автоматизировать этапы расчёта и построение статических, динамических и энергетических характеристик, а также эпюр цифровых сигналов, фазных токов и напряжений.

5. Провести исследование физических процессов, протекающих в ММ; определить статические, динамические и энергетические характеристики ММ; выявить влияние схемы соединения фаз ВД и частоты ВШИМ на указанные характеристики, а также выработать рекомендации по применению соответствующих цифровых алгоритмов импульсного управления.

6. Выполнить экспериментальные исследования лабораторного макета ММ для подтверждения соответствия разработанной модели ММ реальному устройству.

Методы исследования основаны на теории логического управления электрическими двигателями, законах булевой алгебры, формальных правилах λ -исчисления, методах императивного, функционального и объектно-ориентированного программирования, компьютерном моделировании с применением численных методов интегрирования дифференциально-алгебраических уравнений и анализе экспериментальных данных.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработан метод синтеза цифровых алгоритмов импульсного управления ИМ привода с трёхфазным ВД, который позволяет автоматизировать формирование математического описания ЦУУ и получение статических, динамических и энергетических характеристик ИМ при ВШИМ;

- предложена классификация алгоритмов импульсного управления, основанная на количестве рабочих стоек ИУМ, используемых для подключения фаз двигателя к источнику питания (ИП), и позволяющая систематизировать способы ВШИМ;

- разработан автоматизированный подход к получению математического описания УБФ, который основан на формализации условий переключения КЭ на периоде ВШИМ и применении систем компьютерной математики и позволя-

ет получить математическое описание произвольного алгоритма импульсного управления на основе ВШИМ;

- получено математическое описание ЦУУ ММ, реализующего быстродействующие цифровые алгоритмы импульсного управления ИМ на основе ВШИМ;
- предложена методика определения дополнительных потерь мощности в трёхфазном ВД при импульсном управлении с применением ВШИМ;
- выявлены зависимости характеристик ИМ привода с трёхфазным ВД от метода ВШИМ и её частоты, позволяющие рекомендовать соответствующий алгоритм импульсного управления и частоту ВШИМ для рассматриваемой задачи.

Практическая значимость полученных результатов для теории и практики заключается в следующем:

- на языке Mathematica разработан модуль, который позволяет автоматизировать синтез УВФ, реализующих алгоритмы ВШИМ;
- в системе MATLAB-Simulink разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать основные этапы моделирования работы ММ при исследовании влияния начальных условий, внутренних параметров ММ, внешних воздействий и различных алгоритмов ВШИМ на статические, динамические и энергетические характеристики ИМ;
- в системе моделирования Simulink разработан блок ЦУУ ММ, который может быть использован при моделировании ММ в случае применения алгоритмов двухстоечной, трёхстоечной и комбинированной ВШИМ;
- осуществлена программная реализация блока формирования логических переменных (ЛП) для двухстоечной, трёхстоечной и комбинированной ВШИМ в виде написанных на языке С функций, которые могут быть использованы при моделировании ММ или быть взяты за основу при программировании устройства;
- на языке С++ с использованием инструментария Qt разработано приложение, позволяющее автоматизировать формирование различных последовательностей управляющих сигналов и их передачу на вход ЦУУ ММ при проведении экспериментальных исследований.

Достоверность результатов. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена корректностью использования законов булевой алгебры, методов численного решения систем дифференциально-алгебраических уравнений, современных систем компьютерной математики Mathematica и MATLAB, среды моделирования сложных динамических систем Simulink с пакетом расширения SimPowerSystems и подтверждена экспериментальными исследованиями лабораторного макета ММ, проведёнными в лаборатории кафедры 702 («Системы приводов авиационно-космической техники») МАИ.

Внедрение результатов. Результаты работы нашли применение:

- в научно-исследовательской работе «Разработка модели мехатронного модуля на основе трёхфазного бесконтактного двигателя постоянного тока», выполнявшейся в МАИ в 2006–2007 гг. (тема № 32860-07020);

– в научно-исследовательской работе «Параметрический синтез электро-механических исполнительных механизмов повышенной энергоэффективности, построенных по принципу силовых миниприводов, с минимизацией массогабаритных показателей для приводов ракет нового поколения», выполняющаяся в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» за 2011 г.;

– при проектировании привода воздухоудовки аппарата искусственной вентиляции лёгких нового поколения, разрабатываемом фирмой ООО «ФакторМедТехника»;

– в учебном процессе кафедры 702 («Системы приводов авиационно-космической техники») МАИ.

Апробация работы. Основные теоретические положения, развитые в диссертационной работе, были апробированы на следующих научно-технических конференциях, семинарах и форумах:

– VII-я ежегодная международная научно-техническая конференция «Компьютерное моделирование 2006», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 27–28 июня 2006 г.;

– Всероссийская научно-техническая конференция «Мехатронные системы (теория и проектирование)», Тульский государственный университет, 7–8 декабря 2006 г.;

– XVII-й Международный научно-технический семинар «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта, сентябрь 2008 г.;

– VIII-я Всероссийская юбилейная научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 21–23 июня 2010 г.;

– 7-я научно-техническая конференция «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ-2010), ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, 12–14 октября 2010 г.;

– II-й межотраслевой молодёжный научно-технический форум «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 2010», г. Москва, 2 декабря 2010 г.;

– Вторая всероссийская научно-техническая конференция «Мехатронные системы (теория и проектирование)», Тульский государственный университет, 25 ноября 2011 г.

Публикации. Основные материалы диссертации изложены в патенте Российской Федерации на изобретение и опубликованы в 11 работах, три из которых — в изданиях, рецензируемых Высшей аттестационной комиссией.

Структура и объём работы. Диссертация выполнена в объёме 163 стр. основного текста, в том числе 61 рис., 12 табл., список используемых источников, насчитывающий 120 наименований, и четырёх приложений на 37 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены сведения об апробации, публикациях и внедрении результатов диссертационной работы, а также представлена её структура и краткое содержание глав.

Объектом исследования в диссертационной работе является мм цифрового электропривода (цэп) с им на основе трёхфазного вд, управляемого посредством импульсного метода с цифровой реализацией алгоритмов вшим. Структура цэп и состав мм приведены на рис. 1 и рис. 2 соответственно, на которых обозначено: ацп — аналого-цифровой преобразователь; дпр — датчик положения ротора; ип — источник питания; $K_{в}$ — входной код; $K_{д}$ — код текущего положения ротора; $K_{с}$ — код текущего углового положения выходного вала цэп; $K_{у}$ — код управления; мп — механическая передача; сд — синхронный двигатель с постоянными магнитами на роторе; смв — специализированный микропроцессорный вычислитель; ус — управляющее слово, представляющее собой совокупность логических сигналов $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$, поступающих на управляющие входы кэ иум; A, B, C — фазы двигателя; $i_{д}$ — ток двигателя; $u_{а}, u_{в}, u_{с}$ — напряжения, прикладываемые к фазам двигателя; $u_{д}$ — напряжение двигателя; $u_{ип}$ — напряжение ип; φ — угловое положение ротора двигателя; $\varphi_{с}$ — угловое положение выходного вала цэп; Ω — скорость вращения ротора двигателя; Y — соединение фаз статорной обмотки двигателя по схеме «звезда»; Δ — соединение фаз по схеме «треугольник».

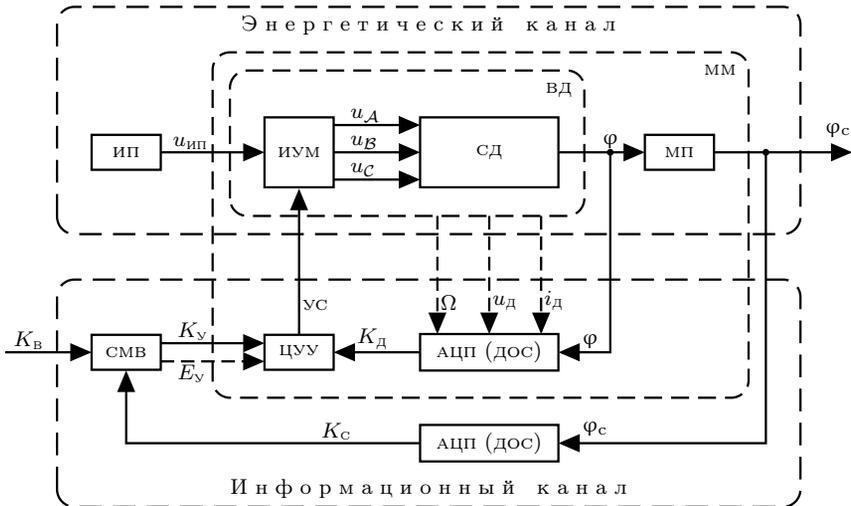


Рис. 1. Структурная схема цэп

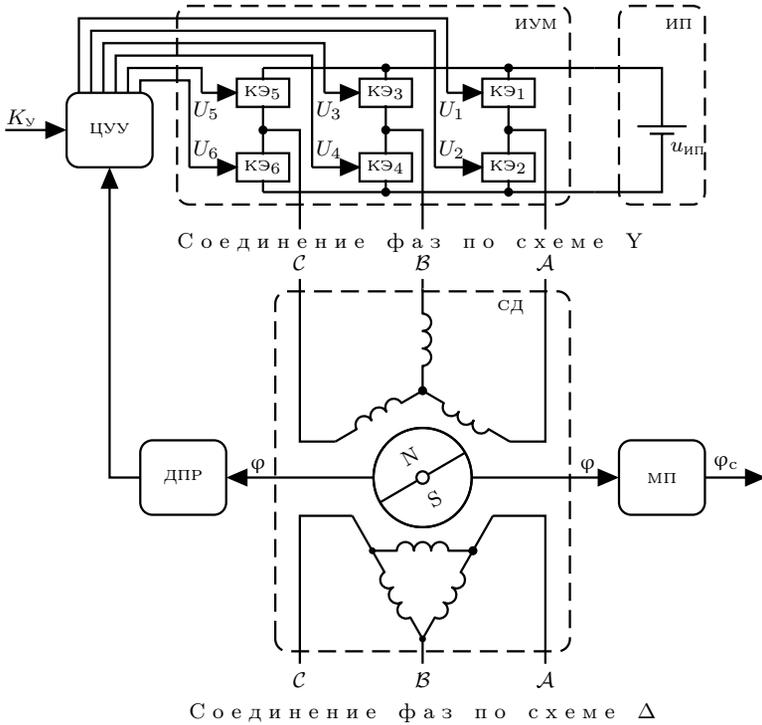


Рис. 2. Структура ММ на основе трёхфазного ВД

В главе 1 рассмотрены общие вопросы импульсного управления трёхфазным ВД с использованием ВШИМ с позиции множеств состояний УС. Осуществлена векторная интерпретация элементов множества допустимых состояний УС, на основании которой «подключающим» состояниям УС поставлены в соответствие ненулевые базовые векторы напряжения, а «отключающим» — нулевые. «Подключающие» и «отключающие» состояния УС, связанные переходом, объединены в *группы*. «*Опережающей*» группой состояний УС называется такая группа, в которой угловое положение ненулевого базового вектора напряжения превосходит требуемое угловое положение результирующего вектора, а «*отстающей*» — группа, в которой угловое положение ненулевого вектора меньше, чем требуемое угловое положение результирующего вектора напряжения. Результирующий вектор напряжения равен:

$$\bar{V} = \frac{T_1^{\text{OFF}}}{T} \bar{V}_1^{\text{OFF}} + \frac{T_1^{\text{ON}}}{T} \bar{V}_1^{\text{ON}} + \frac{T_2^{\text{ON}}}{T} \bar{V}_2^{\text{ON}} + \frac{T_2^{\text{OFF}}}{T} \bar{V}_2^{\text{OFF}}, \quad (1)$$

где \bar{V}_1^{ON} и \bar{V}_1^{OFF} — ненулевой и нулевой базовый вектор напряжения из «отстающей» группы соответственно; T_1^{ON} и T_1^{OFF} — длительности задействия «подключающего» и «отключающего» состояния УС из «отстающей» группы

соответственно; $\overline{V}_2^{\text{ON}}$ и $\overline{V}_2^{\text{OFF}}$ — ненулевой и нулевой базовый вектор напряжения из «опережающей» группы соответственно; T_2^{ON} и T_2^{OFF} — длительности задействия «подключающего» и «отключающего» состояния УС из «опережающей» группы соответственно; T — период широтно-импульсного сигнала (ШИС). Длительность задействия каждого состояния УС на периоде ШИС вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} T_1^{\text{ON}} &= T m \frac{|\cos(\varphi_E - \varphi_2^{\text{ON}})|}{\sin \Theta}; & T_2^{\text{ON}} &= T m \frac{|\cos(\varphi_E - \varphi_1^{\text{ON}})|}{\sin \Theta}; \\ T_1^{\text{OFF}} &= T_2^{\text{OFF}} = \frac{T - (T_1^{\text{ON}} + T_2^{\text{ON}})}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $m = |\overline{V}|/|\overline{V}^{\text{ON}}|$ — индекс модуляции, характеризующий относительную скорость вращения ротора ВД; Θ — угловая ширина сектора, образованная смежными ненулевыми базовыми векторами; φ_E — текущее угловое положение ротора в электрической системе координат; φ_1^{ON} и φ_2^{ON} — угловые положения ненулевых базовых векторов из «отстающей» и «опережающей» группы соответственно.

Предложена классификация способов ВШИМ по количеству рабочих стоек ИУМ, используемых для формирования результирующего вектора напряжения, в соответствии с которой существует *трёхстоечная* ВШИМ (ТВШИМ), *двухстоечная* ВШИМ (ДВШИМ) и *комбинированная* ВШИМ (КВШИМ).

В главе 2 разработан автоматизированный подход к получению математического описания УБФ, отличающийся от известных тем, что позволяет получить аналитические выражения УБФ, реализующих алгоритмы импульсного управления на основе ВШИМ.

Для обеспечения возможности управления направлением и скоростью вращения ротора ВД определена совокупность условий коммутации кЭ ИУМ, которая формализуется в виде нескольких групп ЛП, характеризующих: 1) сектор, в котором находится текущее положение ротора ВД; 2) требуемую скорость вращения; 3) необходимое направление вращения.

Идентификация сектора осуществляется с использованием переменных H_{A1} , H_{B1} , H_{C1} — в случае применения ТВШИМ, H_{A2} , H_{B2} , H_{C2} — в случае ДВШИМ и всех шести указанных ЛП — в случае КВШИМ.

Формирование последовательности задействия «подключающих» и «отключающих» состояний УС, обеспечивающей требуемую скорость вращения, осуществляется с использованием двух переменных: SV и SP . Если $SV = 0$, задействуется состояние УС из «отстающей» группы, в противном случае — из «опережающей». При $SP = 1$ используется «подключающее» состояние УС, а при $SP = 0$ — «отключающее». В случае центрированного ШИС переменные SV и SP равны

$$SV = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq 2t_{\text{ПЕР}} < T_1^{\text{ON}} + T_1^{\text{OFF}}; \\ 1, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (3)$$

$$SP = \begin{cases} 1, & \text{если } T_1^{\text{OFF}} \leq 2t_{\text{ПЕР}} < T - T_2^{\text{OFF}}; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где $t_{\text{пер}}$ — счётчик периода (пилообразный сигнал), равный

$$t_{\text{пер}} = \begin{cases} t, & \text{если } t < T/2; \\ T - t, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

Требуемое направление вращения выражается в виде переменной DR :

$$DR = \begin{cases} 0, & \text{если } K_y \geq 0; \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

После формирования системы ЛП осуществляется формализация алгоритма ВШИМ, которая заключается в описании: 1) совокупности значений ЛП, характеризующих сектор, в котором находится текущее положение ротора; 2) используемых «подключающих» и «отключающих» состояний УС; 3) состояния УС, используемого при возникновении аварийной ситуации.

На основании анализа значений совокупности ЛП, характеризующих сектор, в котором находится текущее положение ротора, составляется *список секторов*, содержащий в случае ТВШИМ элементы « $H_{A1}H_{B1}H_{C1}$ »:

$$\text{sectors} = \{101, 100, 110, 010, 011, 001\}. \quad (7)$$

Состояния УС, используемые при управлении, оформляются в виде *списков «подключающих» (statesOn)* и *«отключающих» состояний УС (statesOff)*. Порядок элементов в списке **statesOn** определяется последовательностью расположения ненулевых базовых векторов напряжения, начиная с вектора, расположенного в том секторе, которому соответствует первый элемент списка **sectors**. Порядок «отключающих» состояний УС в списке **statesOff** соответствует порядку «подключающих» состояний в списке УС. Списки состояний УС (« $U_6U_5U_4U_3U_2U_1$ »), используемых при ТВШИМ имеют вид:

$$\text{statesOn} = \{011001, 101001, 100101, 100110, 010110, 011010\}, \quad (8)$$

$$\text{statesOff} = \{010101, 101010, 010101, 101010, 010101, 101010\}. \quad (9)$$

Состояние УС, используемое в случае возникновения аварийных ситуаций, оформляется в виде переменной **emergencyState**.

После формализации алгоритма ВШИМ составляется таблица состояний, связывающая каждую совокупность значений ЛП со значениями УБФ. Алгоритм формирования таблицы состояний заключается в следующем:

- проверка принадлежности состояния кода текущего сектора списку **sectors**. Если код текущего сектора не является элементом списка **sectors**, то УС присваивается значение переменной **emergencyState**. В противном случае выполняются следующие действия;

- вычисление смещения порядкового номера искомого элемента в списках **statesOn** и **statesOff**, вызванное значением переменной DR , по формуле (10) в случае ДВШИМ или ТВШИМ и по формуле (11) — в случае КВШИМ.

$$SH_{DR} = \begin{cases} 1, & \text{если } DR = 0; \\ 4, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (10)$$

$$SH_{DR} = \begin{cases} 3, & \text{если } DR = 0; \\ 9, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (11)$$

– вычисление смещения порядкового номера искомого элемента в списках **statesOn** и **statesOff**, вызванное совокупностью значений ЛП о текущем секторе (SH_H), которое равно порядковому номеру данной совокупности в списке **sectors**;

– вычисление смещения порядкового номера искомого элемента в списках **statesOn** и **statesOff**, вызванное значением переменной SV , по формуле

$$SH_{SV} = \begin{cases} 0, & \text{если } SV = 0; \\ 1, & \text{иначе;} \end{cases} \quad (12)$$

– вычисление порядкового номера искомого элемента в списках **statesOn** и **statesOff** по формуле

$$SH = \begin{cases} SH_{\Sigma} - N_{\text{сект}}, & \text{если } SH_{\Sigma} > N_{\text{сект}}; \\ SH_{\Sigma}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (13)$$

где $SH_{\Sigma} = SH_{DR} + SH_H + SH_{SV}$; $N_{\text{сект}}$ – количество секторов ($N_{\text{сект}} = 6$ – при ДВШИМ и ТВШИМ; $N_{\text{сект}} = 12$ – при КВШИМ);

– присвоение УС элемента с порядковым номером SH из списка **statesOn**, если $SP = 1$, или из списка **statesOff** – в противном случае.

Программная реализация приведённого алгоритма осуществлена в виде модуля, написанного на языке Mathematica, использование которого совместно с существующими модулями минимизации аналитических выражений УБФ и экспорта результатов в систему MATLAB позволяет автоматизировать наиболее трудоёмкие этапы математического описания ЦУУ ММ.

Применение разработанного подхода для получения математического описания ЦУУ ММ, реализующего алгоритмы ТВШИМ, ДВШИМ и КВШИМ, продемонстрировано в **главе 3**. Полученное математическое описание ЦУУ ММ основано на описании системы ЛП и УБФ, которые при ТВШИМ имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i = DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \overline{SP} \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee \\ \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \overline{SP} \vee \\ \vee DR \overline{H_b} \overline{H_c} SP \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee \\ \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \overline{SP} \vee \\ \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \vee \overline{DR} \overline{H_b} \overline{H_c} SP; \\ U_{i+1} = DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \overline{SP} \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \vee \\ \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \overline{SP} \vee DR \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \vee \\ \vee DR \overline{H_b} \overline{H_c} SP \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \overline{SP} \vee \\ \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} \overline{SV} \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \vee \\ \vee \overline{DR} \overline{H_a} \overline{H_b} \overline{H_c} SV \overline{SP} \vee \overline{DR} \overline{H_b} \overline{H_c} SP, \end{array} \right. \quad (14)$$

где $i = 1, 3, 5$; а переменные H_a , H_b и H_c определяются по табл. 1.

Табл. 1. Переменные H_a , H_b и H_c

i	H_a	H_b	H_c
1	H_{A1}	H_{B1}	H_{C1}
3	H_{B1}	H_{C1}	H_{A1}
5	H_{C1}	H_{A1}	H_{B1}

В главе 4 приведён состав и дано описание компьютерной модели ММ, а также разработанного программного комплекса, позволяющего автоматизировать этап моделирования ММ. Компьютерная модель ММ (рис. 3) разработана в системе моделирования Simulink и содержит элементы пакета расширения SimPowerSystems. Модель ММ имеет иерархическую структуру и учитывает изменение контуров протекания токов при переключении КЭ ИУМ.

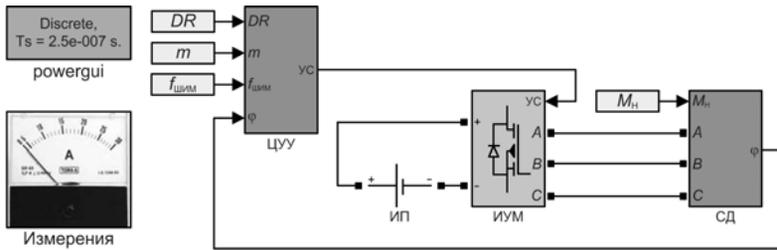


Рис. 3. Модель ММ в Simulink

Блок ЦУУ модели ММ включает в свой состав блок формирования ЛП и блок формирования УБФ. Блок формирования ЛП основан на математическом описании ЛП и реализован в виде S-функции, написанной на языке С. Блок формирования УБФ содержит таблицу состояний, соответствующую рассматриваемому алгоритму импульсного управления. Для каждого из рассматриваемых способов ВШИМ (двшим, твшим и квшим) разработана соответствующая S-функция и сформирована таблица состояний.

Блок СД модели ММ основан на уравнениях, описывающих фазную модель двигателя при синусоидальном распределении индукции в зазоре. Для исследования физических процессов в вД с соединением фаз по схеме Y и по схеме Δ разработаны два варианта блока СД. В качестве параметров блока СД используются параметры двигателя ДБМ40-0.025-4-3.

С целью автоматизации этапа моделирования ММ разработан программный комплекс ICRC, который позволяет параллельно на отдельных ядрах процессора выполнять вычисления, связанные с моделированием работы ММ для различных наборов значений входных параметров, что существенно сокращает временные затраты на исследование физических процессов, протекающих в ММ, и получение статических и энергетических характеристик им привода.

Глава 5 посвящена исследованию физических процессов, протекающих в энергетическом канале ММ с использованием разработанного программного комплекса ICRC и модели ММ, а также определению влияния схемы соединения фаз вД, способов ВШИМ и её частоты на динамические, статические

и энергетические характеристики им. Указанные характеристики сопоставлены с предельными характеристиками ВД, полученными при использовании скалярной широтно-импульсной модуляции с применением 180-градусного способа управления (180СШИМ). В последнем случае регулирование скорости вращения ротора ВД осуществлено путём пропорционального изменения напряжения ИП, что позволяет обеспечить независимость полученных при 180СШИМ результатов от соотношения периода ШИС и электромагнитной постоянной времени двигателя, равной $T_{я} = 5 \cdot 10^{-5}$ с.

На основе переходных процессов по скорости выявлена зависимость динамических характеристик им от частоты ШИС при использовании двшим и квшим. В случае квшим наблюдается незначительный (менее 5%) рост длительности переходных процессов при увеличении частоты ШИС (при уменьшении $T/T_{я}$ с четырёх до единицы). При использовании двшим в аналогичном случае имеет место существенное ухудшение динамических характеристик (увеличение длительности переходных процессов более, чем на 20%). Динамические характеристики в случае применения твшим не зависят от частоты ШИС; длительность переходных процессов совпадает с длительностью переходных процессов при 180СШИМ.

Механические характеристики при использовании твшим и квшим линейны с точностью до 5%. В случае квшим увеличение частоты ШИС приводит к незначительному снижению средних значений электродвижущего момента ($M_{ср}$) и скорости вращения в установившемся режиме работы ($\Omega_{ср}$). Снижение составляет менее 5% при уменьшении $T/T_{я}$ с четырёх до единицы. Механические характеристики в случае двшим нелинейны (рис. 4), степень нелинейности увеличивается с ростом частоты ШИС. При всех рассматриваемых алгоритмах импульсного управления средние значения скорости холостого хода ($\Omega_{х.х}$) и пускового момента ($M_{п}$) при схеме Δ превосходят в $\sqrt{3}$ раз аналогичные показатели при схеме Y.

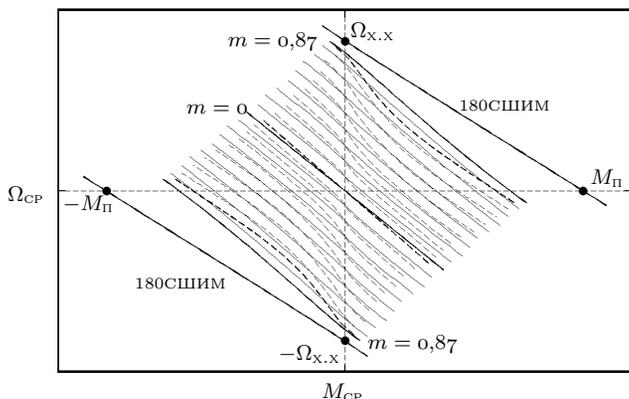


Рис. 4. Механические характеристики при способе двшим (сплошные линии — $T/T_{я} = 4$; пунктирные линии — $T/T_{я} = 1$)

Среднее за период фазных напряжений значение потребляемой мм мощности в установившемся режиме работы определено следующим образом:

$$P_{\text{CP}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_0}^{\varphi_0+2\pi} u_{\text{ип}} i_{\text{ип}} d\varphi_{\text{E}} = \frac{u_{\text{ип}}}{2\pi} \int_{\varphi_0}^{\varphi_0+2\pi} i_{\text{ип}} d\varphi_{\text{E}}, \quad (15)$$

где φ_0 — произвольное угловое положение ротора ВД в установившемся режиме работы; $i_{\text{ип}}$ — полученный в результате компьютерного моделирования ток, протекающий через ип.

Дополнительные потери мощности в двигателе, вызванные пульсациями фазных токов около их средних значений, определены по следующей формуле:

$$\Delta P = P_{\text{CP}} - P_{\text{МЕХ}} - P_{\text{М.КЭ}} - P_{\text{М.Я.СР}}, \quad (16)$$

где $P_{\text{МЕХ}}$ — механическая (полезная) мощность; $P_{\text{М.КЭ}}$ — потери мощности на проводимость в кЭ иУМ, $P_{\text{М.Я.СР}}$ — потери мощности на активном сопротивлении якорной обмотки от среднего значения фазных токов.

Величина потерь мощности на активном сопротивлении кЭ иУМ равна

$$P_{\text{М.КЭ}} = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_0}^{\varphi_0+2\pi} u_{\text{кЭ}i} i_{\text{кЭ}i} d\varphi_{\text{E}}, \quad (17)$$

где $u_{\text{кЭ}i}$ и $i_{\text{кЭ}i}$ — напряжение на i -м кЭ и ток, протекающий через него, полученные в результате компьютерного моделирования.

Потери мощности на активном сопротивлении якорной обмотки от среднего значения фазных токов вычислены по аналитическому выражению:

$$P_{\text{М.Я.СР}} = \frac{2}{3} \left(\frac{M_{\text{CP}}}{c_m} \right)^2 R, \quad (18)$$

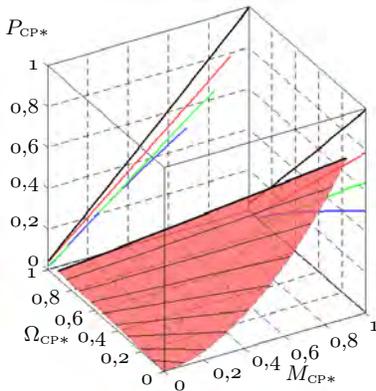
где c_m — коэффициент момента; R — активное сопротивление одной фазы якорной обмотки ВД.

Полученные значения P_{CP} , $P_{\text{МЕХ}}$ и ΔP нормализованы относительно максимального значения потребляемой мощности при 180СШИМ (48,47 Вт при соединении фаз по схеме Y и 144,6 Вт при схеме Δ) и приведены в виде поверхностей на рис. 5, на котором обозначено: $\Omega_{\text{CP}*} = \Omega_{\text{CP}}/\Omega_{\text{X,X}}$ и $M_{\text{CP}*} = M_{\text{CP}}/M_{\text{П}}$. Способ ДВШИМ характеризуется наименьшими энергопотреблением и развиваемой механической мощностью среди рассматриваемых способов ВШИМ, в то время, как ТВШИМ — наибольшими. Максимальное значение коэффициента полезного действия (кпд) среди рассматриваемых способов управления достигается в случае применения ДВШИМ, однако наибольшим объёмом под соответствующей поверхностью характеризуется способ ТВШИМ. Способу ВШИМ присущи средние показатели среди рассматриваемых способов ВШИМ.

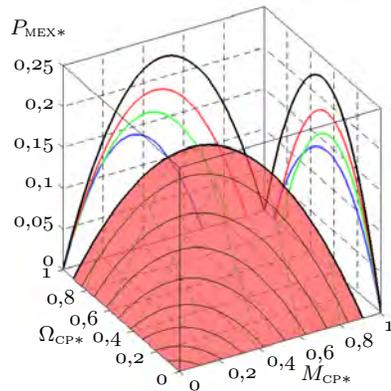
Дополнительные потери мощности в двигателе при способе ТВШИМ не превосходят 0,4% от максимального значения потребляемой мощности

при способе 180СШИМ и соотношении $T/T_{я} \leq 0,5$, однако в области номинального момента двигателя ($M_{СР*} = 0,1..0,3$) могут достигать 2,5% от потребляемой в данной области мощности. Аналогичные показатели при способе двШИМ равны 1,8% и 4% соответственно, а при способе квШИМ — 1,3% и 2%. Увеличение частоты ШИС при всех рассматриваемых способах вШИМ способствует уменьшению дополнительных потерь и тем самым приводит к сокращению потребляемой мощности и увеличению КПД (η).

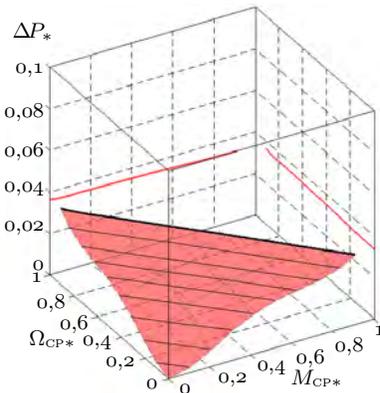
Поверхности $P_{СР*}$, $P_{Мех*}$, ΔP^* и η справедливы для соединения фаз якорной обмотки вД как по схеме Y, так и по схеме Δ .



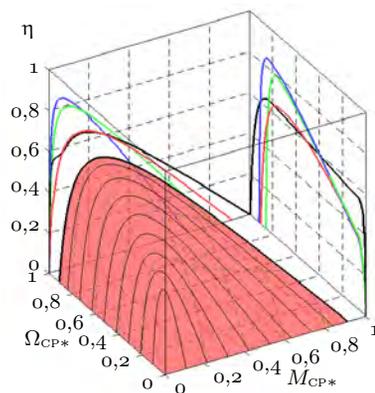
а) потребляемая мощность



б) механическая мощность



в) дополнительные потери мощности



г) КПД

Рис. 5. Поверхности энергетических характеристик при способах **твШИМ**, **квШИМ**, **двШИМ** и 180СШИМ ($T/T_{я} = 4$)

В главе 6 представлены результаты экспериментальных исследований лабораторного макета ММ, которые были сопоставлены с результатами компьютерного моделирования. Лабораторный макет ММ включает в свой состав трёхфазный сд марки ДБМ40-0.025-4-3 с установленным в его корпусе ДПР на основе трёх цифровых датчиков Холла, две печатные платы, реализующие функции иум и цуу соответственно, а также набор ип для питания элементов ММ и измерительное оборудование. Для автоматизации формирования кода управления и его передачи на вход цуу ММ было разработано приложение GCodeGen, написанное на языке C++ с использованием инструментария Qt. Созданное приложение нашло применение в учебном процессе МАИ, что подтверждено актом о внедрении.

В результате экспериментальных исследований макета ММ были получены эпюры фазных токов и напряжений при различных способах импульсного управления для соединения фаз вД как по схеме Y, так и по схеме Δ . Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными для одного из частных случаев представлено на рис. 6.

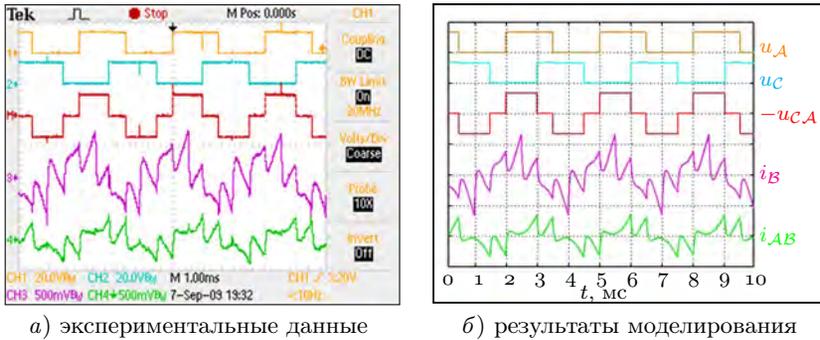


Рис. 6. Эпюры фазных токов и напряжений (схема Δ , 180СШИМ, $\gamma = 1$)

Качественное и количественное совпадение экспериментальных данных и результатов моделирования свидетельствует о достоверности разработанной модели ММ и, следовательно, полученных с её помощью результатов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

В приложении А приведены исходные коды S-функций на языке С, использованных при разработке модели блока цуу ММ в Simulink.

В приложении Б представлены исходные коды модулей программного комплекса ICRC на языке MATLAB.

В приложении В приведены исходные коды приложения GCodeGen на языке C++.

Приложение Г составляют акты о внедрении результатов работы на предприятие ООО «ФакторМедТехника», в научно-исследовательскую работу и учебный процесс МАИ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработан автоматизированный метод синтеза цифровых алгоритмов импульсного управления им привода с трёхфазным вД на основе вШИМ. При разработке метода были получены следующие результаты:

1. Предложена классификация способов вШИМ, которая позволяет учесть количество рабочих стоек иУМ, кЭ которых используются для подключения фаз вД к иП. В соответствии с разработанной классификацией способы вШИМ можно разделить на двШИМ, твШИМ и квШИМ.

2. Разработан автоматизированный подход к синтезу уБФ и осуществлена его программная реализация для способов двШИМ, твШИМ и квШИМ в виде модуля, написанного на языке Mathematica и позволяющего автоматизировать соответствующий этап проектирования цУУ мм.

3. Сформировано математическое описание цУУ мм, реализующего способы двШИМ, твШИМ и квШИМ. Математическое описание основано на описании системы лП и аналитических выражениях уБФ, что позволяет создавать быстродействующие реализации соответствующих методов как на языках программирования, так и на языках описания цифровых устройств.

4. Разработана компьютерная модель мм на основе трёхфазного вД, отличающаяся от известных тем, что позволяет исследовать как информационные, так и физические процессы в мм при различных алгоритмах импульсного управления на основе вШИМ для случаев соединения фаз вД как по схеме Y, так и по схеме Δ. Модель мм разработана в среде Simulink с использованием компонентов библиотеки SimPowerSystems и учитывает контуры протекания токов в системе «иУМ — сД» и форму распределения индукции в зазоре. При создании блока цУУ модели мм использованы S-функции, написанные на языке C, которые могут быть взяты за основу при программировании устройства.

5. С целью сокращения временных затрат, связанных с многократным выполнением моделирования установившегося режима работы мм при построении статических и энергетических характеристик им привода, на языке MATLAB разработан программный комплекс, который позволяет автоматизировать задание комбинаций значений частоты шИС, статического момента нагрузки, индекса модуляции и напряжения иП, выполнить серию вычислительных экспериментов с задействованием параллельных вычислений, визуализировать и сохранить полученные результаты. Программный комплекс был использован при проектировании привода воздуходувки аппарата искусственной вентиляции лёгких нового поколения, разрабатываемом ООО «ФакторМедТехника».

6. Проведены исследования физических процессов, протекающих в мм, определены динамические, статические и энергетические характеристики им. Выявлен прерывистый характер токов, вытекающих из иУМ, в случае применения двШИМ и квШИМ, что является причиной нелинейностей статических характеристик им привода. Увеличение частоты шИС приводит к росту степени нелинейностей. В случае квШИМ нелинейности незначительны (менее 5 %),

в то время, как при ДВШИМ имеет место существенное ухудшение характеристик. При использовании способа ТВШИМ токи непрерывны, а статические характеристики — линейны с точностью до 5 %.

7. Проведённые исследования позволяют рекомендовать к применению в ММ ЦЭП способ ТВШИМ, в связи с такими преимуществами, как относительная простота реализации (по сравнению с КВШИМ), линейные статические и высокие динамические характеристики ИМ (по сравнению с ДВШИМ). Способ КВШИМ наиболее сложен в реализации среди рассмотренных способов ВШИМ, однако позволяет обеспечить меньшие коммутационные потери мощности в ИУМ и дополнительные потери в двигателе при статических и динамических характеристиках, незначительно уступающих характеристикам способа ТВШИМ. При создании энергосберегающего режима работы автономного устройства целесообразно использовать комбинацию из ДВШИМ, ТВШИМ и КВШИМ с переключением на способ, обладающий наибольшим КПД в рабочей области механических характеристик.

8. Предложена методика определения дополнительных потерь мощности в трёхфазном ВД, основанная на компьютерном моделировании и отличающаяся от известных тем, что позволяет определить величину дополнительных потерь мощности при любых комбинациях заданного статического момента нагрузки и скорости вращения ротора ВД при импульсном управлении на основе ВШИМ. С использованием разработанной методики определены максимальные значения дополнительных потерь мощности в двигателе при различном соотношении $T/T_{я}$, которые при $T/T_{я} \leq 0,5$ в случае ДВШИМ составляют менее 5 % от основных потерь, при КВШИМ — менее 2 %, а при ТВШИМ — не превосходят 0,5 %.

9. Форма динамических, статических и энергетических характеристик ИМ привода при соединении фаз ВД по схеме Y и по схеме Δ в случае применения рассмотренных алгоритмов ВШИМ совпадает. Использование схемы Δ приводит при прочих равных условиях к увеличению электродвижущего момента и скорости в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с использованием схемы Y . Указанное обстоятельство позволяет развить втрое большую механическую мощность на выходном валу ММ. Однако, при проектировании ММ следует учитывать, что в случае использования схемы Δ величина тока, протекающего через фазы ВД, ИУМ и ИП, увеличивается в три раза по сравнению с применением схемы Y , что влечёт за собой увеличение массовых и габаритных показателей ММ.

10. Проведены экспериментальные исследования лабораторного макета ММ с использованием написанного на языке C++ приложения, позволяющего автоматизировать процесс формирования и передачи на вход ЦУУ последовательностей значений кода управления для имитации управляющих воздействий на ММ. Результаты экспериментальных исследований ММ подтвердили достоверность моделирования процесса электромеханического преобразования энергии и, соответственно, полученных при компьютерном моделировании результатов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Гагарин С. А. Исследование режимов работы двигателя постоянного тока при импульсном управлении с использованием Simulink / Компьютерное моделирование 2006: Труды Международной научно-технической конференции. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 153–162.

2. Гагарин С. А., Кривилёв А. В. Программный комплекс для определения дополнительных потерь мощности в вентильном двигателе / Известия ТулГУ. Серия. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып. 3. Системы управления. Том 1. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С. 107–111.

3. Гагарин С. А., Кривилёв А. В. Метод коммутации ключевых элементов в трёхфазном вентильном двигателе с учётом знака противо-ЭДС / Через тернии к звёздам / Под ред. проф. Ю. Ю. Комарова и проф. В. П. Махрова. — М.: Изд-во МАИ, 2007. С. 344–353.

4. Гагарин С. А. Экспериментальное исследование мехатронного модуля с трёхфазным вентильным двигателем с использованием несимметрично-диагонального метода коммутации / Обеспечение качества на всех этапах жизненного цикла изделия / Под ред. проф. Б. В. Бойцова и проф. Ю. Ю. Комарова. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. С. 255–263.

5. Гагарин С. А. Метод коммутации ключевыми элементами в трёхфазном вентильном двигателе с учётом знака противо-ЭДС / Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Труды XVII Международного научно-технического семинара. Алушта, сентябрь 2008 г. — СПб.: ГУАП, 2008. С. 132–133.

6. Гагарин С. А., Кривилёв А. В. Математическое описание цифровой системы управления мехатронного модуля привода на базе трёхфазного вентильного двигателя с векторным управлением / Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: Сб. докл. VIII-й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, МАИ, 21–23 июня 2010 г. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2010. С. 275–279.

7. Гагарин С. А., Кривилёв А. В. Энергетические характеристики мехатронного модуля привода на базе трёхфазного вентильного двигателя с векторным управлением / Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: Сб. докл. VIII-й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, МАИ, 21–23 июня 2010 г. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2010. С. 280–284.

8. Гагарин С. А., Кривилёв А. В. Влияние способов векторного управления на энергетические характеристики мехатронного модуля привода с вентильным двигателем / Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» — СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 116–119.

9. Гагарин С. А., Кривилёв А. В., Ситникова А. В. Дополнительные потери мощности в мехатронном модуле привода на основе трёхфазного вентильного двигателя с фазами, соединёнными по схеме «треугольник» // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2010. — № 11 (116). — С. 18–24.

10. Гагарин С. А. Использование параллельных вычислений при моделировании мехатронного модуля привода / Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики-2010». Москва. Аннотации работ. — СПб.: Мастерская печати, 2010. С. 115.

11. Гагарин С. А., Кривилёв А. В., Ситникова А. В. Способ цифрового управления угловой скоростью трёхфазного вентильного двигателя с учётом знака противо-ЭДС. Патент РФ № 2438158.

12. Гагарин С. А. Энергетические характеристики мехатронного модуля на основе трёхфазного вентильного двигателя с фазами, соединёнными по схеме «треугольник» / Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 8–14.