

На правах рукописи



Кривилёв Александр Владимирович

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ИМПУЛЬСНОГО
УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ «УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ –
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ» НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Специальность:

05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва — 2013

Диссертация выполнена на кафедре 702 «Системы приводов авиационно-космической техники» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
СТЕБЛЕЦОВ ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматического управления» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» Горячев Олег Владимирович;
- доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке НТЦ ЗАО «УК Рунако» Кулифеев Юрий Борисович;
- доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Резников Станислав Борисович.

Ведущая организация: ОАО «Аэроэлектромаш».

Защита состоится «1» октября 2013 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Главный административный корпус, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба направлять на указанный выше адрес.

Автореферат разослан «5» августа 2013 г.



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

А. Б. КОНДРАТЬЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

Одними из первоочередных задач промышленно развитых стран являются переход на электрифицированные воздушные и наземные транспортные средства, эффективное использование электрической энергии и внедрение в этапы проектирования, производства и сопровождения автоматизированных программных и аппаратных комплексов.

Основными потребителями электрической энергии служат электрические двигатели, на долю которых приходится примерно 43 % вырабатываемой электрической энергии. Таким образом, эффективное использование электрической энергии напрямую связано с разработкой энергоэффективных двигателей и алгоритмов их управления.

Электрические двигатели нашли своё применение в электроприводах авиационного, космического, аэродромного, горнодобывающего, нефтегазового и климатического оборудования, а также военной, медицинской, автомобильной, бытовой, офисной и сельскохозяйственной техники. В настоящее время одними из наиболее эффективных электродвигателей с точки зрения надёжности, безопасности, срока эксплуатации, жёсткости механических характеристик, максимальной развиваемой скорости, акустических, объёмно-массовых и энергетических показателей являются вентиляционные двигатели (ВД), рынок которых динамично развивается. Появление, развитие теории и конструктивных решений, а также популяризация ВД связаны с именами отечественных и зарубежных учёных, научных работников и инженеров, среди которых следует отметить Н. П. Адволоткина, А. К. Аракеяна, А. А. Афанасьева, В. А. Балагурова, Ю. М. Беленького, А. И. Бертинова, Х. Д. Брейлсфорда (H. D. Brailsford, США), Д. А. Бута, Ф. И. Бутаева, И. А. Вевюрко, О. Г. Вегнера, В. Е. Высоцкого, Я. Гераса (J. F. Gieras, Польша-США), В. Т. Гращенкова, А. А. Дубенского, Д. А. Завалишина, Л. Я. Зиннера, Т. Кенио (Т. Кенjo, Япония), Р. Кришнана (R. Krishnan, США), Н. И. Куликова, Н. И. Лебедева, В. К. Лозенко, А. Г. Микерова, В. П. Миловзорова, И. Е. Овчинникова, Ш. И. Лутидзе, А. И. Скороспешкина, Б. Н. Тихменева, Д. Хансельмана (D. Hanselman, USA), Р. Цаубитцера (R. Zaubitzer, Германия), В. В. Цоканова, Чанг-лян Ся (Chang-liang Xia, Китай), Е. Л. Эттингера и др.

Среди известных методов управления электродвигателями наиболее эффективным является импульсный метод. Значительный вклад в становление теории импульсного управления электрическими двигателями, её развитие, популяризацию, а также реализацию предлагаемых подходов в сложных электротехнических комплексах у нас в стране и за рубежом внесли следующие учёные и инженеры: К. Блауфусс (K. Blaufuß, Германия), У. Браун (W. Brown, США), С. Г. Герман-Галкин, Т. А. Гла-

зенко, П. Грасблум (P. Grasblum, Чехия), Й. Гольц (J. Holtz, Германия), М. Е. Гольц, О. В. Горячев, В. Ф. Козаченко, Ю. И. Конев, В. Г. Константинов, О. А. Коссов, В. С. Кулебакин, Ю. Б. Кулифеев, В. Кун (W. Kun, Китай), Р. Лопез (R. Lopez, США), Е. В. Машуков, В. Г. Нагорский, Д. Ом (D. Ohm, США), Б. И. Петров, В. А. Полковников, Б. Н. Попов, С. Б. Резников, Ю. Н. Розно, А. Т. Трубочёв, Д. А. Холмс (D. A. Holmes, Австралия), Л. А. Шпиغلер и др. Несмотря на имеющиеся достижения в области импульсного управления электрическими двигателями отсутствует системный подход к представлению и описанию методов импульсного управления, охватывающий математическое описание цифровых сигналов, физических процессов, механических, регулировочных и энергетических характеристик двигателя и позволяющий определить энергоэффективный метод импульсного управления для рассматриваемого случая.

Методы импульсного управления могут быть реализованы при помощи набора аналоговых компонент, стандартных микросхем, ориентированных на управление конкретным типом электродвигателя, микроконтроллеров и цифровых сигнальных процессоров с соответствующей неизменяемой периферией, а также на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или «систем на кристалле». Наиболее перспективным направлением в разработке цифровых устройств, реализующих управление системой «импульсный усилитель мощности – двигатель», является направление, в котором цифровые алгоритмы реализуются на основе программируемой логики. В этом случае достигаются максимальная гибкость, высокая надёжность, наивысшее быстродействие, минимальные габариты, низкое электропотребление, независимость описания работы устройства от архитектуры производителя, быстрый переход на отечественные базовые матричные кристаллы для военных применений и т. д. Основным сдерживающим фактором широкого применения ПЛИС является отсутствие достаточно хорошо проработанного теоретического аппарата и методов автоматизированного проектирования, которые позволили бы с минимальными трудозатратами разрабатывать цифровые устройства, реализующие энергоэффективные алгоритмы импульсного управления современными системами «усилитель мощности – электродвигатель».

Цель работы.

Разработка основ проектирования цифровых устройств, реализующих на базе программируемой логики энергоэффективные способы импульсного управления системами «усилитель мощности – электродвигатель».

Задачи работы:

1. Проведение обзора существующих подходов к проектированию цифровых устройств, которые реализуют алгоритмы импульсного управления, а также подходов к импульсному управлению электрическими двигателями.

лями с целью систематизации имеющихся способов управления и разработки терминологии и классификации методов импульсного управления системой «усилитель мощности – двигатель».

2. Разработка автоматизированных методов синтеза и анализа управляющих функций с целью получения их описаний и сокращения времени на исследование условий возникновения тока короткого замыкания и сквозных токов, а также равномерности загрузки по току и цикличности переключений ключевых элементов.

3. Формирование структуры цифрового устройства управления и его математического описания, на основе которых можно реализовывать быстродействующие и энергоэффективные цифровые алгоритмы импульсного управления системами «усилитель мощности – двигатель».

4. Создание на языке описания цифровой аппаратуры интеллектуальных блоков цифрового устройства управления в виде модулей с настраиваемыми параметрами для сокращения сроков ввода в эксплуатацию электротехнических систем с цифровым управлением.

5. Разработка автоматизированных подходов к получению аналитических выражений и исследованию механических, регулировочных и энергетических характеристик с учётом дополнительных потерь мощности, которые дают возможность для рассматриваемого случая сформировать соответствующие характеристики и определить наиболее приемлемые параметры двигателя, метод импульсного управления и частоту широтно-импульсного сигнала.

6. Формирование структуры и реализация высокопроизводительных программных комплексов на базе компьютерных моделей электротехнических систем с использованием параллельных или распределённых вычислений для существенного сокращения времени на получение и анализ эпюр цифровых и аналоговых сигналов, механических, регулировочных и энергетических характеристик.

7. Создание макетов мехатронных модулей (ММ) с системами «усилитель мощности – двигатель» и цифровым устройством управления и проведение экспериментальных исследований для подтверждения теоретических положений, результатов компьютерного моделирования и отсутствия ошибок в описаниях интеллектуальных блоков.

Методы решения.

При решении поставленных задач применялись законы математической логики, понятия множеств состояний и переходов, а также матрицы смежности из теории графов, математическое описание сложных конечных автоматов, основные законы и правила электротехники, методы математического анализа, компьютерное моделирование в среде Simulink с расширением SymPowerSystems, императивный, функциональный, деклара-

тивный, объектно-ориентированный и основанный на правилах преобразований стили программирования, параллельные вычисления, метод численного решения системы дифференциально-алгебраических уравнений Дормана-Принса, встроенные функции в системы компьютерной математики MATLAB и Mathematica и их соответствующие пакеты расширений.

Научная новизна:

- 1.** Структура и математическое описание цифровых устройств управления, которые позволяют реализовывать энергоэффективные алгоритмы импульсного управления системами «усилитель мощности – двигатель».
- 2.** Автоматизированный метод синтеза и анализа управляющих функций, а также полученные с его помощью выражения для методов симметричной, несимметричной, симметрично-несимметрично, симметрично-поочерёдной, диагональной, несимметрично-диагональной, поочерёдной и поочерёдно-диагональной коммутации, которые учитывают влияние взаимного расположения векторов магнитной индукции якоря и индуктора на создаваемый движущий момент, сдвиг сигналов о положении ротора, схему соединения фаз, тип широтно-импульсного сигнала, алгоритмическую паузу («мертвое время») и знак противо-ЭДС в неактивной фазе на межкоммутационном интервале.
- 3.** Способ цифрового управления скоростью вращения трёхфазным вентильным двигателем с учётом знака противо-ЭДС, при котором отсутствует зона прерывистых токов в двигательной области, существует возможность реализации двигателем режима генераторного торможения, а также имеют место минимальные пульсации электродвижущего момента и дополнительные потери мощности.
- 4.** Вариант классификации импульсных режимов, учитывающий возможность появления в якорной обмотке прерывистых токов и позволяющий систематизировать режимы работы электрического двигателя на периоде широтно-импульсного сигнала.
- 5.** Вариант классификации методов импульсного управления, который обеспечивает систематизацию существующих и новых методов по виду их статических характеристик, равномерности загрузки ключевых элементов по току и возможным направлениям передачи энергии между двигателем и источником питания.
- 6.** Терминология методов импульсного управления, которая предоставляет необходимый фундамент при знакомстве с особенностями существующих отечественных и зарубежных методов и рассмотрении возможности разработки новых способов импульсного управления.
- 7.** Автоматизированные подходы к формированию механических, регулировочных и энергетических характеристик и полученные на их основе аналитические выражения тока якоря, скорости вращения ротора, их ам-

плитуды пульсации, ширины областей переменных и прерывистых токов, статические и энергетические характеристики, которые учитывают существование в якорной обмотке двигателя пяти импульсных режимов.

8. Эквивалентные величины сопротивления, индуктивности, коэффициентов противо-ЭДС и момента с учётом протекания тока по двум фазам на межкоммутационном интервале и трапециевидной формы противо-ЭДС для создания упрощённых моделей трёхфазных вентильных двигателей.

9. Структура высокопроизводительных программных комплексов на основе компьютерных моделей электротехнических систем и модулей автоматизации расчёта и отображения итоговых данных, которая позволяет автоматизировать задание исходных данных, выполнение расчёта в режиме параллельных или распределённых вычислений, отображение результатов и хранение информации о выполненном расчёте.

Практическая значимость:

1. Интерактивные демонстрационные панели для исследования как циклической последовательности управляющего слова на периодах широтно-импульсного сигнала и фазных напряжений, так и форм временных диаграмм, содержащих эпюры логических переменных и управляющих функций, при рассматриваемом методе импульсного управления с учётом направления вращения и типа широтно-импульсного сигнала.

2. Интерактивные демонстрационные панели для автоматизации формирования и исследования механических, регулировочных и энергетических характеристик системы «импульсный усилитель мощности – двигатель» при различных импульсных режимах и методах импульсного управления, а также эпюр напряжения, тока и угловой скорости в интерактивно задаваемой точке на плоскости с учётом текущих значений параметров двигателя и частоты широтно-импульсного сигнала.

3. Компьютерная модель трёхфазного ВД с цифровым устройством управления, позволяющая исследовать на периодах широтно-импульсного сигнала и фазных напряжений эпюры логических переменных, управляющих функций, фазные напряжения и токи, а также электродвижущий момент с учётом рассматриваемого метода импульсного управления, выбранной схемы соединения фаз и заданных значений параметров двигателя, частоты широтно-импульсного сигнала и момента нагрузки.

4. Программные комплексы на основе компьютерных моделей электротехнических систем с обычным коллекторным двигателем и трёхфазным вентильным двигателем, реализованные с привлечением языка MATLAB и среды Simulink и позволяющие автоматизировать расчёт статических и энергетических характеристик с помощью параллельных вычислений при заданных параметрах двигателя, методе импульсного управления и частоте широтно-импульсного сигнала.

5. Интеллектуальные блоки в виде модулей с параметрами на языке описания цифровой аппаратуры, которые можно использовать при автоматизации проектирования цифровых устройств, реализующих энергоэффективный метод импульсного управления.

6. Макеты мехатронных модулей с цифровыми устройствами управления на основе программируемых логических интегральных схем, которые могут быть использованы при исследовании физических процессов в случае разработки новых методов и в учебном процессе при знакомстве с основными принципами импульсного управления электродвигателями.

Реализация результатов:

1. В НИР № 702–97–75 (ПН–201) «Разработка энергосберегающих алгоритмов и устройств управления процессом коммутации ключевых элементов в системе «Импульсный усилитель мощности – двигатель»» (Программа Ту России), выполнявшейся в 1997 г.

2. В НИР № 1.86.96 «Разработка методов и средств управления энергоприводными системами авиационной и ракетно-космической техники с целью повышения её динамических и энергетических характеристик», выполнявшейся в 1997–1999 г.

3. В НИР № 702–98–22 (ПН–343) «Разработка миниатюрных высокоэкономичных устройств управления двигателями на основе микропроцессорных структур» (Научно-техническая программа «Механика, машиноведение и процессы управления»), выполнявшейся в 1998–1999 г.

4. В НИР № 1.20.01 «Разработка и совершенствование методов, математических моделей, алгоритмов и программ для проектирования и исследования элементов и систем комплексов оснащения и навигации ЛА», выполнявшейся в 2001 г.

5. В НИР № 32860–07020 «Разработка модели мехатронного модуля на основе трёхфазного бесконтактного двигателя постоянного тока», выполнявшейся в 2006–2007 г.

6. В НИР «Параметрический синтез электромеханических исполнительных механизмов повышенной энергоэффективности, построенных по принципу силовых миниприводов, с минимизацией массогабаритных показателей для приводов ракет нового поколения», выполнявшейся в 2011 г. Государственный контракт № П1218 от 04 июня 2010 г. с Министерством образования и науки РФ в рамках мероприятия 1.3.1. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

7. В НИР «Разработка методики проектирования электромеханических исполнительных механизмов петлеобразной формы на основе волновых передач с телами качения с минимизацией массогабаритных показателей для приводов самолётов 5-го поколения», выполнявшейся в 2011 г. Государственный контракт № П505 от 13 мая 2010 г. с Министерством

образования и науки РФ в рамках мероприятия 1.3.1. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

8. В поддержанном РФФИ проекте № 12-08-01045-а «Разработка теории и методов импульсного управления электрическими двигателями».

9. В микроконтроллере имплантируемой системы обхода левого желудочка сердца, разрабатываемой МАИ совместно с НИИТИО МЗ РФ.

10. В НИР «Разработка рулевого привода на основе трёхфазного вентильного двигателя с цифровым управлением», выполнявшейся в 2008 – 2009 г. ОАО «Агрегатным конструкторским бюро “Якорь”».

11. В аппаратах искусственной вентиляции лёгких, выпускаемых компанией ООО «ФакторМедТехника».

12. В учебном процессе на кафедре «Системы приводов авиационно-космической техники».

Имеются соответствующие акты о внедрении результатов работы.

Апробация работы:

- V, VI, VIII и IX Всероссийские научные конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», г. Москва (1999, 2002, 2010, 2012);
- VIII, IX и X международные научно-технические семинары «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта (1999, 2000, 2001);
- Всероссийская конференция «Пневмогидроавтоматика-99», г. Москва (1999);
- 7-я научно-техническая конференция «Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2010)», г. Санкт-Петербург (2010);
- III-й межотраслевой молодёжный форум «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики 2011», г. Москва (2011).

Публикации.

Основные научные результаты по теме работы изложены в монографии, двух патентах РФ на изобретение, 11 статьях в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, шести докладах Всероссийских конференций, пяти тезисах докладов научно-технических семинаров и тезисах доклада межотраслевого молодёжного форума.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списков используемых сокращений, обозначений и источников, а также восьми приложений. Объём основной части работы составляет 341 печатную страницу, включая 200 рисунков, 12 таблиц. Список использованных источников состоит из 354 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и основные задачи, представлено краткое содержание глав и приведены сведения об апробации, публикациях и внедрении результатов работы.

Объектом изучения является система «ЦУУ – ИУМ – ИД», входящая в состав современных цифровых электрических приводов со структурной схемой, представленной на рис. 1, где используются следующие обозначения: ЦУМ – цифровая управляющая машина; СМВ – специализированный микропроцессорный вычислитель; ЦУУ – цифровое устройство управления; ИУМ – импульсный усилитель мощности; ИД – исполнительный двигатель; МП – механическая передача; K_B – входной цифровой код управления (КУ); K_C – цифровой код обратной связи, который может содержать информацию о текущих значениях фазных напряжений и токов, угловых скоростей и углов поворота двигателя и выходного вала и т. д.; $H_{1,\dots,k}$ – сигналы о текущем положении ротора; K_Y – вычисленный цифровой КУ; $U_{1,\dots,n}$ – управляющие булевы функции (УБФ); $U_{дв}, i_{дв}$ – соответственно фазные напряжения и токи; Ω (Ω_C), φ (φ_C) – соответственно скорость и угол поворота выходного вала двигателя (привода).

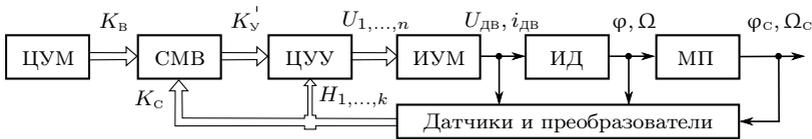


Рис. 1. Структура цифрового электропривода

В качестве ИД рассматриваются обычный коллекторный двигатель с независимым возбуждением от постоянных магнитов (ДПТ) и трёхфазный ВД с распределённой и сосредоточенной обмотками и фазами, соединёнными по схемам «звезда» и «треугольник».

ИУМ представляет собой многостоечный усилитель с ключевыми элементами (КЭ) на основе полевых транзисторов (MOSFET) или биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Считается, что вопросы, связанные с обеспечением устойчивой работы ИУМ (защита от перенапряжения, перегрева и т. д.), рекуперации энергии и исключения влияния энергетического канала на информационный решаются на аппаратном уровне в пределах ИУМ.

ЦУУ согласно реализованному методу импульсного управления на основе входных сигналов, которые содержат информацию о желаемых направлении и скорости вращения, текущем положении ротора, разрядности данных и т. д., формирует циклическую последовательность управляющих сигналов, подаваемых на ИУМ.

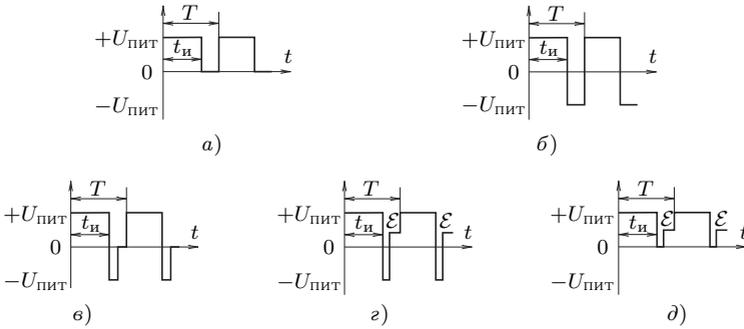


Рис. 2. Импульсные режимы

Вопросы вычисления ошибок, выполнения коррекции и т. д. для каждого из возможных контуров с целью формирования входных сигналов в ЦУУ решаются с помощью СМВ.

В главе 1 представлен обзор существующих методов импульсного управления системой «ИУМ – ИД» и попыток их систематизации отечественными и зарубежными учёными.

Предложена классификация импульсных режимов (рис. 2), которая учитывает появление прерывистого тока и охватывает пять импульсных режимов. При режиме I (рис. 2, а) на обмотке имеют место однополярные импульсы напряжения питания (последовательность импульсов на периоде широтно-импульсного сигнала (ШИС): $U_{\text{пит}}$, 0 или $-U_{\text{пит}}$, 0), при режиме II (рис. 2, б) — двуполярные импульсы (последовательность: $+U_{\text{пит}}$, $-U_{\text{пит}}$ или $-U_{\text{пит}}$, $+U_{\text{пит}}$), при режиме III (рис. 2, в) — три уровня напряжения (последовательность $+U_{\text{пит}}$, $-U_{\text{пит}}$, 0 или $-U_{\text{пит}}$, $+U_{\text{пит}}$, 0), при режиме IV (рис. 2, г) — двуполярные импульсы с участком противо-ЭДС в конце периода ШИС (последовательность: $+U_{\text{пит}}$, $-U_{\text{пит}}$, $\mathcal{E}_{\text{дв}}$ или $-U_{\text{пит}}$, $+U_{\text{пит}}$, $\mathcal{E}_{\text{дв}}$) и при режиме V (рис. 2, д) — однополярные импульсы с участком противо-ЭДС в конце периода ШИС (последовательность: $+U_{\text{пит}}$, 0, $\mathcal{E}_{\text{дв}}$ или $-U_{\text{пит}}$, 0, $\mathcal{E}_{\text{дв}}$). Режимы I, II и IV могут присутствовать при реализации всех режимов работы двигателя (двигательный, генераторный, противовключения и электродинамического торможения), режим III — только при реализации двигательного и генераторного режимов в случае наличия переменного тока и режим V — только при реализации двигательного режима. Импульсные режимы IV и V соответствуют областям прерывистых токов на плоскости механических характеристик.

На основе импульсных режимов разработана классификация методов импульсного управления, показанная на рис. 3, где Д — диагональный, Н — несимметричный, П — поочерёдный, С — симметричный, НД — несимметрично-диагональный, ПД — поочерёдно-диагональный, СН — симмет-

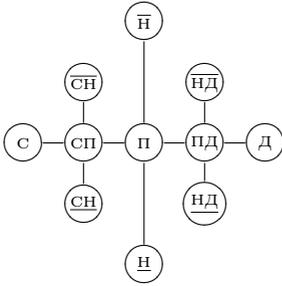


Рис. 3. Классификация методов коммутации

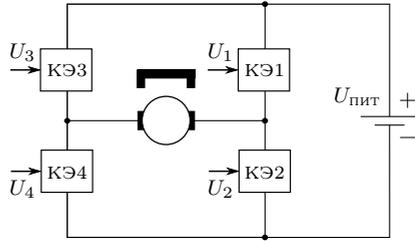


Рис. 4. Двухстоечный ИЗМ с ДПТ

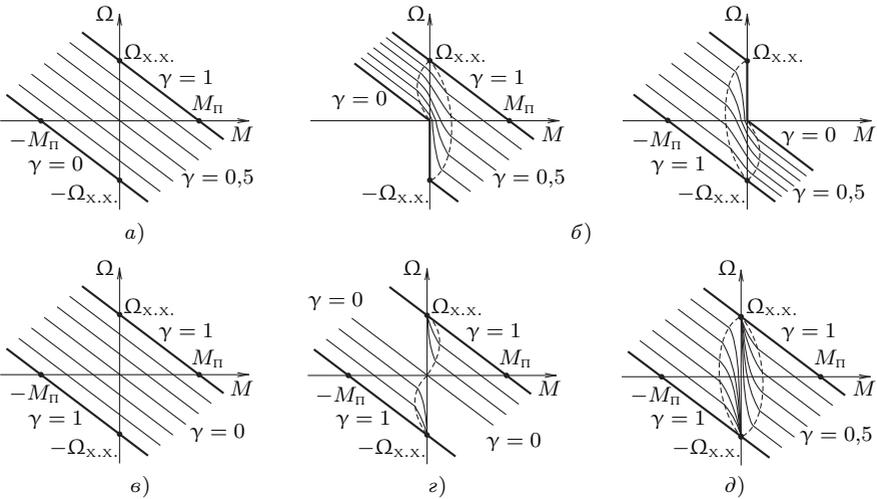


Рис. 5. Механические характеристики

рично-несимметричный и СП — симметрично-поочерёдный. Методы Н, НД и СН имеют по два варианта реализации. Методы и варианты их реализации отличаются друг от друга состояниями КЭ при нулевом значении ШИС. В таблице 1 показаны связи между методами и импульсными режимами, а также значения УБФ в момент импульса (и) и паузы (п) на периодах ШИС (T_i, T_{i+1}) при ДПТ (рис. 4). Методы, которые расположены в центре на горизонтальной линии, обеспечивают равномерную загрузку КЭ по току, а методы, размещённые на одной вертикальной линии, приводят к аналогичным механическим характеристикам (рис. 5, а — с; рис. 5, б — СП и СН; рис. 5, в — П и Н; рис. 5, г — ПД и НД).

Таблица 1. Связь методов импульсного управления и импульсных режимов

Методы	Повторяющаяся последовательность УБФ ($U_1U_2U_3U_4$)		Режимы
	Прямое вращение	Обратное вращение	
\bar{H}	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 1010 \text{ (п)}$	$T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 1010 \text{ (п)}$	I
\underline{H}	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 0101 \text{ (п)}$	$T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 0101 \text{ (п)}$	I
П	$T_i \rightarrow T_{i+1}: \bar{H} \rightarrow \underline{H}$		I
С	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 0110 \text{ (п)} \text{ (1)}; T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 1001 \text{ (п)} \text{ (2)}$		II
Д	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 0000 \text{ (п)}$	$T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 0000 \text{ (п)}$	II, IV
$\bar{H}\bar{D}$	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 1000 \text{ (п)}$	$T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 0010 \text{ (п)}$	I, V
$\underline{H}\underline{D}$	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 0001 \text{ (п)}$	$T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 0100 \text{ (п)}$	I, V
ПД	$T_i \rightarrow T_{i+1}: \bar{H}\bar{D} \rightarrow \underline{H}\underline{D}$		I, V
$\bar{C}\bar{H}$	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 0010 \text{ (п)}$	$T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 1000 \text{ (п)}$	I, II, III, IV
$\underline{C}\underline{H}$	$T_i: 1001 \text{ (и)} \rightarrow 0100 \text{ (п)}$	$T_i: 0110 \text{ (и)} \rightarrow 0001 \text{ (п)}$	I, II, III, IV
СП	$T_i \rightarrow T_{i+1}: \bar{C}\bar{H} \rightarrow \underline{C}\underline{H}$		I, II, III, IV

Введено обобщённое обозначение для методов импульсного управления $(_{60})(n)X_{(п)}^{(э)}$, где 60 — сдвиг сигналов от положения ротора (не указывается при 120-градусном сдвиге, который используется по умолчанию), n — продолжительность нахождения КЭ в открытом состоянии в градусной мере на периоде фазных напряжений в случае единичной скважности ШИС (при ДПТ не используется, при трёхфазном ВД: 120 или 180), X — символьное обозначение метода согласно рис. 3, Э — учёт знака противо-ЭДС в неактивной фазе на межкоммутационном интервале, П — учёт паузы при переключении КЭ. Предложенный принцип обозначения методов импульсного управления может быть использован также при обозначении комбинированных методов (например, 120П-ПД $_{(п)}^{(э)}$) и методов с векторной ШИМ (например, $\bar{180}\bar{П}_{(п)}$).

Выполнено сопоставление введённых обозначений и названий методов импульсного управления с названиями и обозначениями, встречаемыми в англоязычной литературе (таблица 2). Из таблицы 2 видно, что несмотря на предпринимаемые за рубежом попытки систематизации отсутствует единство в обозначении методов импульсного управления.

В главе 2 предложен автоматизированный метод синтеза УБФ, состоящий из следующих шагов:

- 1) анализ условий работы системы «ЦУУ – ИУМ – ИД» и определение совокупности условий, обеспечивающих требуемое управление;
- 2) формализация совокупности условий в виде системы переменных и функций;

Таблица 2. Соответствие отечественных и зарубежных методов управления

Метод	Method
д	PWM Scheme 1 (4 Quadrant, Simultaneous) [<i>D. Ohm</i>]
120д	Hard chopping [<i>Texas Instruments</i>], Bipolar independent PWM mode [<i>P. Grasblum, Freescale</i>], PWM Scheme 1 (4 Quadrant, Simultaneous) [<i>D. Ohm</i>]
с	PWM Scheme 2 (4 Quadrant, Simultaneous, Complementary) [<i>D. Ohm</i>]
120с	PWM Scheme 2 (4 Quadrant, Simultaneous, Complementary) [<i>D. Ohm</i>]
120с _п	Bipolar Complementary PWM mode with Dead time [<i>P. Grasblum, Freescale</i>], Synchronous rectification “Fast-Decay Current” with Dead time [<i>Allegro</i>]
120Н	Synchronous Rectification “Slow-Decay Current” [<i>Freescale</i>]
120Н _п	Synchronous Rectification “Slow-Decay Current” with dead time [<i>Allegro</i>], Synchronous Rectification with dead time [<i>STMicroelectronics, Infineon</i>]
п	PWM Scheme 4 (4 Quadrant Non-Simultaneous, Complementary) [<i>D. Ohm</i>]
120п	PWM Scheme 4 (4 Quadrant Non-Simultaneous, Complementary) [<i>D. Ohm</i>]
120п _п	Unipolar complementary PWM mode with Dead time [<i>P. Grasblum, Freescale</i>]
нд	PWM Scheme 0 (2 Quadrant) [<i>D. Ohm</i>]
120нд	Unipolar independent PWM mode [<i>P. Grasblum, Freescale</i>]
120нд _д	Soft chopping [<i>Texas Instruments</i>], PWM Scheme 0 (2 Quadrant) [<i>D. Ohm</i>]
пд	PWM Scheme 3 (4 Quadrant Non-Simultaneous) [<i>D. Ohm</i>]
120пд	PWM Scheme 3 (4 Quadrant Non-Simultaneous) [<i>D. Ohm</i>]
120пд ⁹	Alternate High-side/Low-side PWM [<i>R. Lopez</i>], PWM_ON_PWM [<i>Wei Kun</i>]

- 3) описание метода импульсного управления;
- 4) формирование таблицы состояний управляющих булевых функций;
- 5) получение описания УБФ в полной системе булевых функций;
- 6) анализ последовательности УБФ с помощью интерактивной демонстрационной панели, включающей схему «ИУМ – ИД» и временную диаграмму (рис. 6);
- 7) анализ состояний и переходов управляющего слова (УС) с целью определения запрещённых состояний и переходов, приводящих к аварийным ситуациям;

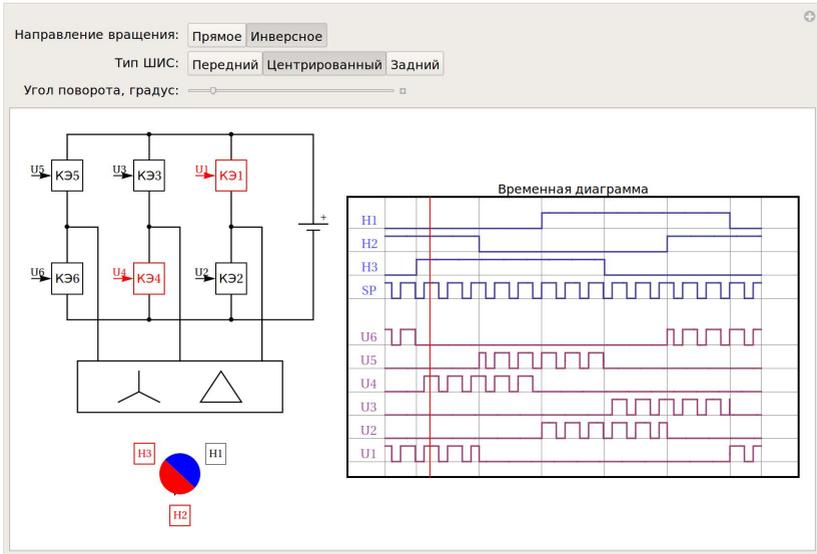


Рис. 6. Демонстрационная панель для исследования УБФ при методе 120д

8) экспорт полученных результатов в необходимый формат для выполнения моделирования.

Выражения (1) описывают УБФ метода C_{Π} , а выражения (2), (3), (4) и (5) — УБФ методов SP_{Π} , Π_{Π} , ΠD_{Π} и D_{Π} соответственно. Приравнявая в этих выражениях переменные DT_{DR} , DT_{PR} и DT_{SP} нулю, можно получить выражения УБФ методов C , SP , Π , ΠD и D . Описания для U_3 и U_4 в выражениях (2), (3) и (4) отличаются соответственно от U_1 и U_2 только видом DR . Полагая в (2), (3) и (4) $PR = 1$, получаются описания УБФ соответственно методов \overline{H}_{Π} , $\overline{H}D_{\Pi}$ и \overline{CH}_{Π} , а $PR = 0$ — методов \underline{H}_{Π} , $\underline{H}D_{\Pi}$ и \underline{CH}_{Π} .

$$\begin{aligned} U_1 = U_4 &= (\overline{DR} SP \vee DR \overline{SP}) \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}}, \\ U_2 = U_3 &= (DR SP \vee \overline{DR} \overline{SP}) \overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U_1 &= \overline{DR} SP (\overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \vee DT_{DR} PR DT_{SP}) \vee DR PR \overline{SP} (DT_{DR} \vee \overline{DT_{SP}}), \\ U_2 &= DR SP (\overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \vee DT_{DR} \overline{PR} DT_{SP}) \vee \overline{DR} \overline{PR} \overline{SP} (DT_{DR} \vee \overline{DT_{SP}}). \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} U_1 &= \overline{DR} SP (\overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \vee DT_{SP} (\overline{PR} DT_{PR} \vee PR \overline{DT_{PR}})) \vee \\ &\vee PR \overline{SP} (\overline{DR} \overline{DT_{DR}} \vee DR DT_{DR} \vee \overline{DT_{SP}}), \\ U_2 &= DR SP (\overline{DT_{DR}} \overline{DT_{SP}} \vee DT_{SP} (PR DT_{PR} \vee \overline{PR} \overline{DT_{PR}})) \vee \\ &\vee \overline{PR} \overline{SP} (DR \overline{DT_{DR}} \vee \overline{DR} DT_{DR} \vee \overline{DT_{SP}}). \end{aligned} \quad (3)$$

$$U_1 = \overline{DR} \overline{DT}_{DR} (PR \vee SP), \quad U_2 = DR \overline{DT}_{DR} (\overline{PR} \vee SP). \quad (4)$$

$$U_1 = U_4 = \overline{DR} \overline{DT}_{DR} SP, \quad U_2 = U_3 = DR \overline{DT}_{DR} SP. \quad (5)$$

Выражения (6), (7), (8), (9) и (10), являются описаниями УБФ для одной из стоек иум (U_u — верхний КЭ, U_d — нижний КЭ) соответственно методов ${}_{(60)}120C_{\Pi}$, ${}_{(60)}120C_{\Pi\Pi}$ (${}_{(60)}120C_{\Pi\Pi}^{\exists}$), ${}_{(60)}120\Pi_{\Pi}$ (${}_{(60)}120\Pi_{\Pi}^{\exists}$), ${}_{(60)}120\Pi_{\Pi\Pi}$ (${}_{(60)}120\Pi_{\Pi\Pi}^{\exists}$) и ${}_{(60)}120\underline{D}_{\Pi}$. Полученные выражения справедливы при обоих вариантах сдвига сигналов о положении ротора и обеих схемах соединения фаз, а также учитывают паузу при переключении КЭ и знак противо-ЭДС в неактивной фазе. Одна из возможных комбинаций для связи переменных A и B с сигналами о положении ротора: U_1 и U_2 : $A \rightarrow H_1, B \rightarrow H_2$; U_3 и U_4 : $A \rightarrow H_3, B \rightarrow H_1$; U_5 и U_6 : $A \rightarrow H_2, B \rightarrow H_3$.

$$U_u = ((DR \overline{A} B \vee \overline{DR} A \overline{B}) SP \vee \overline{SP} (\overline{DR} \overline{A} B \vee DR A \overline{B})) \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP}, \quad (6)$$

$$U_d = ((DR A \overline{B} \vee \overline{DR} \overline{A} B) SP \vee \overline{SP} (\overline{DR} A \overline{B} \vee DR \overline{A} B)) \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP}.$$

$$U_u = (DR \overline{A} B \vee \overline{DR} A \overline{B}) (DT_{DR} PR DT_{SP} \vee \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP}) SP \vee$$

$$\vee (DR A \overline{B} \vee \overline{DR} \overline{A} B) (DT_{DR} \vee \overline{DT}_{SP}) PR \overline{SP}, \quad (7)$$

$$U_d = (DR A \overline{B} \vee \overline{DR} \overline{A} B) (DT_{DR} \overline{PR} DT_{SP} \vee \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP}) SP \vee$$

$$\vee (DR \overline{A} B \vee \overline{DR} A \overline{B}) (DT_{DR} \vee \overline{DT}_{SP}) \overline{PR} \overline{SP}.$$

$$U_u = (DR \overline{A} B \vee \overline{DR} A \overline{B}) ((\overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} \vee (\overline{PR} DT_{PR} \vee PR \overline{DT}_{PR})) \wedge$$

$$\wedge DT_{SP}) SP \vee \overline{DT}_{DR} PR \overline{SP} \vee$$

$$\vee (A \overline{B} (DR DT_{DR} \vee \overline{DT}_{SP}) \vee \overline{A} B (\overline{DR} DT_{DR} \vee \overline{DT}_{SP})) PR \overline{SP}, \quad (8)$$

$$U_d = (DR A \overline{B} \vee \overline{DR} \overline{A} B) ((\overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} \vee (PR DT_{PR} \vee \overline{PR} \overline{DT}_{PR})) \wedge$$

$$\wedge DT_{SP}) SP \vee \overline{DT}_{DR} \overline{PR} \overline{SP} \vee$$

$$\vee (\overline{A} B (DR DT_{DR} \vee \overline{DT}_{SP}) \vee A \overline{B} (\overline{DR} DT_{DR} \vee \overline{DT}_{SP})) \overline{PR} \overline{SP}.$$

$$U_u = (DR \overline{A} B \vee \overline{DR} A \overline{B}) (PR \vee SP) \overline{DT}_{DR}, \quad (9)$$

$$U_d = (DR A \overline{B} \vee \overline{DR} \overline{A} B) (\overline{PR} \vee SP) \overline{DT}_{DR}.$$

$$U_u = (DR \overline{A} B \vee \overline{DR} A \overline{B}) \overline{DT}_{DR} SP, \quad (10)$$

$$U_d = (DR A \overline{B} \vee \overline{DR} \overline{A} B) \overline{DT}_{DR} SP.$$

Если в выражениях (6)–(10) положить DT_{DR} , DT_{PR} и DT_{SP} равными нулю, то получатся выражения УБФ без учёта паузы при переключении КЭ. Выражения УБФ (7), (8) и (9) при $PR = 1$ преобразуются соответственно в выражения для методов ${}_{(60)}120C_{\Pi\Pi}$, ${}_{(60)}120\underline{H}_{\Pi}$ и ${}_{(60)}120\underline{H}_{\Pi\Pi}$, а при $PR = 0$ — в выражения для методов ${}_{(60)}120C_{\Pi\Pi}$, ${}_{(60)}120\underline{H}_{\Pi}$ и ${}_{(60)}120\underline{H}_{\Pi\Pi}$.

В главе 3 описан автоматизированный метод анализа состояний и переходов УС, который основывается на паттернах ограничений и модифицированной матрице смежности и состоит из следующих шагов:

- 1) определение множества состояний управляющего слова;
- 2) выявление наборов условий нахождения в состояниях УС в виде соответствующих им наборов значений логических переменных;
- 3) создание двух матриц условий переходов. Первая матрица содержит условия переходов между состояниями в виде двух наборов значений логических переменных (ЛП), соответствующих начальному и конечному состояниям УС при переходе. Вторая матрица состоит из условий изменения ЛП в моменты переходов;
- 4) формирование паттернов ограничений, с помощью которых накладываются ограничения на изменения ЛП во время работы;
- 5) применение паттернов ограничений к матрицам условий переходов для удаления из них условий, которые не существуют при рассматриваемом методе импульсного управления;
- 6) составление модифицированной матрицы смежности, содержащей информацию о всех возможных состояниях УС и переходах между ними;
- 7) отображение результатов в виде модифицированной таблицы состояний, модифицированной матрицы смежности и таблиц переходов.

Определены множества располагаемых, допустимых и запрещённых состояний УС для ИУМ, состоящего из n -стоек. Рассмотрены примеры использования предлагаемого подхода для ДПТ и трёхфазного ВД.

В случае метода Д множество состояний УС $D^2 = \{d_0^2, d_1^2, d_2^2\}$ и множество наборов значений ЛП $\Delta^2 = \{\delta_0^2, \delta_1^2, \delta_2\}$ состоят из трёх элементов, где верхний индекс в обозначении элементов соответствует числу стоек. Элемент $\delta_0^2 = \{\{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\}\}$ содержит наборы значений ЛП, при которых УС находится в состоянии $d_0^2 = \{0, 0, 0, 0\}$.

Элементы матриц переходов связаны с отдельными переходами. Элементы первой матрицы формируются с помощью выражения

$$\mathbf{a}_{m,n} = \left\{ \mathbb{L}_{i=0}^k \mathbb{S}_{j=0}^l \{ \alpha_{m,i}, \alpha_{n,j} \} \right\}, \quad (11)$$

где \mathbb{S} — операция создания последовательности, \mathbb{L} — операция создания списка, $\alpha_{m,i}$ и $\alpha_{n,j}$ — наборы ЛП, m и n — номера элементов множества наборов значений ЛП, i и j — номера наборов значений ЛП, k и l — число наборов в элементах α_m и α_n соответственно.

Согласно (11) в случае метода Д элемент

$$\mathfrak{d}_{1,1} = \left\{ \left\{ \{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{\overline{DR}, \overline{SP}\} \right\}, \left\{ \{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\} \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \{DR, \overline{SP}\}, \{\overline{DR}, \overline{SP}\} \right\}, \left\{ \{DR, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\} \right\} \right\}.$$

Вторая матрица условий переходов содержит информацию о том, какие ЛП изменяют своё значение в случае выполнения перехода. Отрицание ЛП означает, что она не изменила своё значение при переходе. Каждый набор переменных в элементах этой матрицы связан с соответствующей парой наборов значений ЛП из первой матрицы. Следовательно,

$$\partial'_{1,1} = \{\{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\}, \{\overline{DR}, SP\}, \{DR, SP\}\}.$$

Так как матрицы условий переходов содержат все возможные сочетания пар наборов значений ЛП, то необходимо из них удалить те случаи, которые нарушают принципы формирования ЛП. Удаление реализуется при помощи паттернов или шаблонов ограничений, которые состоят из двух частей. В первой части размещаются варианты изменения ЛП, соответствующие наборам из второй матрицы условий переходов, а во второй части — пары наборов значений ЛП, соответствующие парам из первой матрицы. Определены паттерны ограничений для $H_{1,2,3}$, PR , DT_{DR} , DT_{PR} и DT_{SP} . Паттерны ограничений для ЛП $H_{1,2,3}$ и PR на языке Mathematica:

```
constrainsH1H2H3 = {{Alternatives@@Flatten[(Insert[Riffle[#, ___], ___,
  {{1}, {-1}]]&/@ Permutations[#]&/@ Subsets[{H1, H2, H3}, {2, 3}]), 1], {}}};
constrainsPR = {{{___, PR, ___}, {{___, !SP, ___}, {___, !SP, ___}}};
```

Так как для реализации метода Д достаточно двух ЛП DR и SP , с которыми не связаны паттерны ограничений, то итоговые матрицы условий переходов совпадают с соответствующими исходными матрицами.

На основе итоговых матриц условий переходов составляются модифицированные матрицы смежности, содержащие информацию не только о наличии или отсутствии переходов между состояниями УС, но и о числе стоек ИУМ, по которым протекает сквозной ток при выполнении соответствующих переходов в случае использования незащищённых КЭ. В модифицированной матрице смежности используются следующие обозначения: -1 или пробел — переход отсутствует, 0 — переход присутствует, но не приводит к протеканию сквозных токов, $+n$ — переход существует и является причиной возникновения сквозного тока в n стойках. Модифицированные матрицы смежности для методов Д и D_{Π} показаны на рис. 7 и 8 соответственно. Следовательно, при методе Д существуют девять переходов, два из которых приводят к возможности появления сквозных токов в двух стойках (рис. 7). В случае использования метода D_{Π} имеют место семь переходов, ни один из которых не приводит к появлению сквозных токов (рис. 8).

	0	6	9
0	0	0	0
6	0	0	2
9	0	2	0

Рис. 7. Матрица метода Д

	0	6	9
0	0	0	0
6	0	0	
9	0		0

Рис. 8. Матрица метода D_{Π}

Таблица 3. Результаты анализа УС при трёхфазном ВД

Метод коммутации КЭ	Кол-во ЛП	Кол-во состояний УС	Количество переходов			
			Без сквозных токов	Со сквозными токами		
				В одной стойке	В двух стойках	В трёх стойках
120Д (120Д _п)	5 (6)	7 (7)	31 (31)	12 (0)	6 (0)	0 (0)
120С (120С _п)	5 (7)	6 (7)	36 (31)	12 (0)	6 (0)	0 (0)
120Н (120Н _п)	5 (7)	9 (13)	39 (91)	36 (0)	6 (0)	0 (0)
120П (120П _п)	6 (8, 9)	12 (19, 19)	60 (151, 169)	60 (12, 0)	6 (0, 0)	0 (0)
120НД (120НД _п)	5 (6)	9 (10)	51 (70)	24 (0)	6 (0)	0 (0)
120ПД (120ПД _п)	6 (7)	12 (13)	84 (109)	36 (0)	6 (0)	0 (0)
120СН (120СН _п)	5 (7)	9 (10)	51 (70)	24 (0)	6 (0)	0 (0)
120СП (120СП _п)	6 (8)	12 (13)	84 (121)	36 (0)	6 (0)	0 (0)

Разработанный метод был применён для анализа состояний УС при всех методах импульсного управления согласно предложенной классификации для ДПТ и трёхфазного ВД. Результаты анализа для трёхфазного ВД показаны в таблице 3. В случае реализации метода 120П_п можно обойтись и без DT_{PR} при использовании центрированного и заднего фронтального ШИС. Однако, при переднем фронтальном ШИС имеют место 12 переходов, которые приводят к возможности возникновения сквозного тока в одной из стоек ИУМ.

В главе 4 разработана структура ЦУУ (рис. 9) и выполнено его математическое описание. На рис. 9 приняты следующие обозначения для блоков: 1 — генератор импульсов; 2 — блок загрузки КУ; 3 — блок загрузки кода разрядности; 4 — блок загрузки кода частоты; 5 — блок загрузки кода длительности паузы; 6 — блок преобразования загруженного КУ; 7 — блок преобразования загруженного кода разрядности; 8 — блок преобразования загруженного кода частоты; 9 — блок преобразования загруженного кода длительности паузы; 10 — блок формирования логических переменных; 11 — блок формирования управляющих булевых функций; 12 — блок приёма сигналов о положении ротора. Блоки 3, 4, 5, 7, 8 и 9 являются дополнительными и позволяют изменять во время работы привода разрядность КУ, период ШИС и длительность паузы при переключении КЭ.

Аналитическое выражение загруженного кода управления

$$LC_{CTRL}^+ = C_{CTRL} E_{LD} d\overline{CLK} \vee LC_{CTRL} \overline{E_{LD} d\overline{CLK}}, \quad (12)$$

где CLK — тактовый сигнал; $d\overline{CLK}$ — изменение тактового сигнала с 0 на 1 (передний фронт); LC_{CTRL} , LC_{CTRL}^+ — соответственно текущее и следующее значения загруженного кода управления.

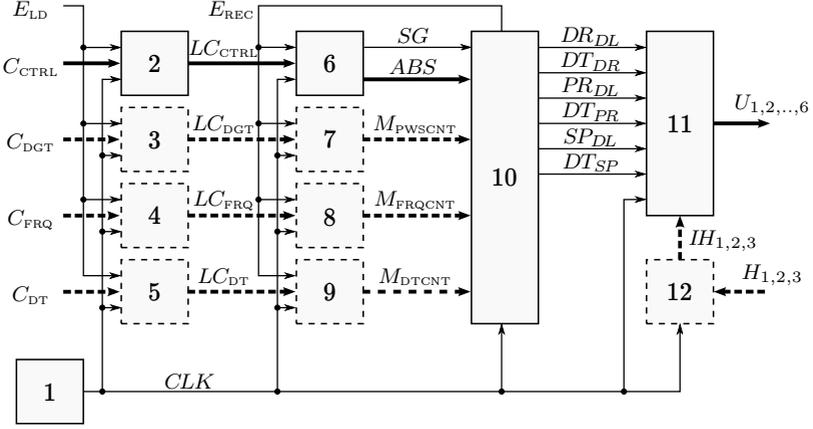


Рис. 9. Структура цифрового устройства управления

Описание знака и абсолютного значения внутреннего КУ

$$\begin{cases} SG^+ = LC_{CTRLn-1} E_{REC} \overline{dCLK} \vee SG \overline{E_{REC} dCLK}, \\ ABS_i^+ = (LC_{CTRLi} \oplus LC_{CTRLn-1}) E_{REC} \overline{dCLK} \vee SG \overline{E_{REC} dCLK}, \end{cases} \quad (13)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, n-2$ — номер разряда внутреннего и загруженного кода управления; $LC_{CTRLn-1}$ — старший разряд загруженного кода управления; ABS_i , ABS_i^+ — соответственно текущее и следующее значения разряда абсолютного значения внутреннего кода управления; SG и SG^+ — соответственно текущее и следующее значения знака внутреннего кода управления; E_{REC} — сигнал разрешения записи загруженных данных.

Описание сигнала E_{REC} в случае использования переднего фронтального или центрированного ШИС с одним обновлением данных за период:

$$E_{REC} = \begin{cases} 1, & \text{если } (PWC_j = M_{PWSCNT_k}) (FRC_i = 1); \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (14)$$

где PWC_j — значение счётчика периода ШИС; M_{PWSCNT_k} — значение модуля счёта счётчика периода на k -периоде ШИС; FRC_i — значение счётчика делителя частоты.

Математическая запись сигнала направления вращения имеет вид

$$DR^+ = SG \overline{dCLK} \vee DR \overline{dCLK}, \quad (15)$$

где DR , DR^+ — соответственно текущее и следующее значения сигнала направления вращения ротора двигателя.

Широтно-импульсный сигнал описывается соотношением

$$SP^+ = Q \overline{dCLK} \vee SP \overline{\overline{dCLK}}, \quad (16)$$

где SP , SP^+ — текущее и следующее значения сигнала необходимой скорости вращения соответственно;

$$Q = \begin{cases} 1, & \text{если } PWC_j \geq ABS_i, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (17)$$

PWC_j , ABS_i — текущие значения счётчика периода ШИС и сигнала абсолютного значения внутреннего кода управления соответственно.

Сигнал равномерной загрузки КЭ по току

$$PR^+ = (PR \oplus Y) \overline{dCLK} \vee PR \overline{\overline{dCLK}}, \quad (18)$$

где PR , PR^+ — соответственно текущее и следующее значения сигнала равномерной загрузки КЭ по току;

$$Y = \begin{cases} 1, & \text{если } E_{\text{WORK}} \text{ DIR } (PWC_j = M_{\text{PWSCNT}_k}) (ABS_i > 0) \vee \\ & \vee (Z_{ABS_{i-1}} \oplus (ABS_i = 0)), \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (19)$$

где i — порядковый номер цикла формирования ЛП; $Z_{ABS_{i-1}}$ — сигнал сравнения абсолютного значения внутреннего КУ с нулевым значением на предыдущем цикле формирования ЛП; ABS_i — абсолютное значение внутреннего КУ на текущем цикле формирования ЛП; DIR — направление счёта счётчика периода ШИС; E_{WORK} — сигнал разрешения работы.

В случае формирования сигналов паузы необходимо ввести задержку на один период тактового сигнала для ЛП DR (DR_{DL}), PR (PR_{DL}) и SP (SP_{DL}). Выражения для сигнала паузы, связанного с изменением SP :

$$DT_{SP}^+ = L_{SP} \overline{dCLK} \vee DT_{SP} \overline{\overline{dCLK}}, \quad (20)$$

$$L_{SP} = (SP \oplus SP_{DL}) \vee DT_{SP} \left(\prod_{i=1}^n \overline{\overline{DTC_i}} \right), \quad (21)$$

DT_{SP} , DT_{SP}^+ — соответственно текущее и следующее значения сигнала паузы, DTC_i — разряд счётчика длительности паузы.

Описание внутренних сигналов о положении ротора

$$IH_i^+ = H_i \overline{dCLK} \vee IH_i \overline{\overline{dCLK}}, \quad (22)$$

где i — номер сигнала о положении ротора.

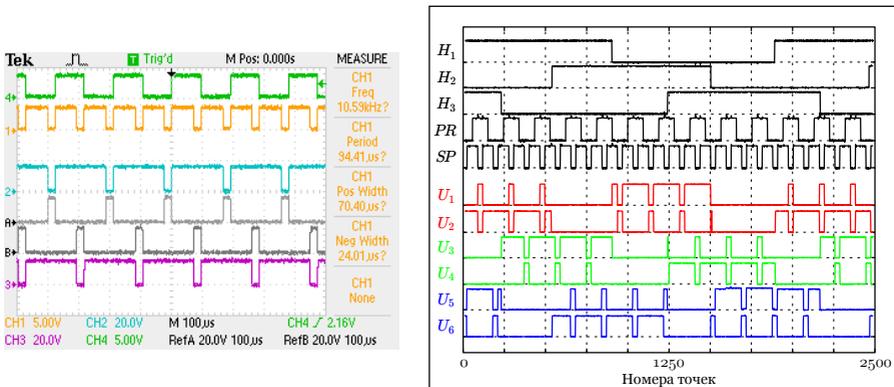
Аналитические выражения (12)–(22) справедливы при отсутствии одновременного изменения значений сигналов, поступающих на информационные входы триггеров, и тактового сигнала CLK с 0 на 1.

В главе 5 представлены описания разработанных интеллектуальных блоков ЦУУ в виде параметризованных функций (модулей), реализованных на языке описания цифровой аппаратуры AHDL. Сигнатуры функций при использовании ДПТ и трёхфазного ВД имеют следующий вид:

```
FUNCTION dsys ( Clock, E_Load, Code[ _Width_ - 1 .. 0 ] )
WITH ( _Width_, _FRQ_Time_, _Type_, _DT_Time_, _Method_, _Open_Drain_ )
RETURNS ( DR, DT_DR, PR, DT_PR, SP, DT_SP, U[4..1] );
FUNCTION dsys_vd ( Clock, E_Load, Code[ _Width_ - 1 .. 0 ], H[3..1] )
WITH ( _Width_, _FRQ_Time_, _Type_, _DT_Time_, _Method_, _Open_Drain_,
_Alarm_, _Shift_ )
RETURNS ( DR, DT_DR, PR, DT_PR, SP, DT_SP, U[6..1] );
```

Входными сигналами в функции являются тактовый сигнал (Clock), сигнал разрешения загрузки данных (E_Load), код управления (Code) и сигналы о положении ротора (H[3..1]), выходными сигналами — УБФ и дополнительно ЛП. Параметрами функций служат разрядность кода управления (_Width_ = 8), номер периода прохождения тактового сигнала (_FRQ_Time_ = 15), тип ШИС (_Type_ = "ADD"), код продолжительности паузы (_DT_Time_ = 4), метод импульсного управления (_Method_ = "DIAGONAL"), режим работы выводов микросхемы с выходными сигналами (_Open_Drain_ = "NO"), состояние УС при возникновении аварийной ситуации (_Alarm_ = B'000000") и угловой сдвиг сигналов о положении ротора (_Shift_ = 120).

Оциллограммы работы ЦУУ в составе ММ в виде эпюр ЛП и УБФ после настройки параметров функций и программирования полученных в результате компиляции данных в микросхему приведены на рис. 10.



а) метод П

б) метод 120П

Рис. 10. Временные диаграммы цифровых сигналов

При аппаратной реализации восьмиразрядного ЦУУ обычным ДПТ требуется от 700 до 1100 эквивалентных логических вентилях, а трёхфазным ВД — от 900 до 1500. Максимальное число логических вентилях необходимо при реализации метода Π_{Π} ($120\Pi_{\Pi}$) с переменной DT_{PR} , а минимальное число — при реализации методов Д ($120D$), С ($120C$), Н ($120H$) и НД ($120HD$).

В главе 6 описаны автоматизированные подходы к получению математического описания статических характеристик и их исследованию с помощью демонстрационных панелей. Предлагаемый подход для формирования механических характеристик состоит из следующих шагов:

- 1) составление для каждого импульсного режима системы дифференциальных и алгебраических уравнений;
- 2) получение аналитических выражений для тока и его амплитуды при всех импульсных режимах;
- 3) получение описаний механических характеристик для каждого импульсного режима;
- 4) формирование математических выражений граничных линий между токами одного и разных знаков, а также между непрерывными и прерывистыми токами;
- 5) объединение соответствующих аналитических описаний импульсных режимов и граничных линий для получения математического описания механических характеристик при методе импульсного управления;
- 6) создание демонстрационной панели для исследования форм механических характеристик, эпюр напряжения и тока на периоде ШИС при различных значениях параметров двигателя и частоты ШИС.

Команды для получения аналитических выражений тока, его амплитуды, механических характеристик, граничных линий и ширины зоны переменных токов при импульсном режиме I:

```
sgn = 1; F = R*i[t]+L*i'[t]+Ce*Ωcp; r1 = R/L->1/Ta; r2 = U/R->Iп;
r3 = Cm*Iп->Mп; r4 = Ce*Cm*Ωcp/R->Mп*Ω; r5 = Iп->U/R; r6 = U/Ce->Ωxx;
sol1 = DSolve[F == sgn*U, i[t], t, GeneratedParameters->A][[1]];
sol2 = DSolve[F == 0, i[t], t, GeneratedParameters->B][[1]];
init = Solve[{(i[t]/.sol1/.t->0)==(i[t]/.sol2/.t->T),
  (i[t]/.sol1/.t->γ*T)==(i[t]/.sol2/.t->γ*T)}, {A[1], B[1]}][[1]];
{i1, i2} = Collect[Expand[i[t]/.#/.init/.r1]/.r2, In]&/@{sol1, sol2};
ΔI = sgn*((i1/.t->γ*T)-(i1/.t->0))/FullSimplify;
M = Collect[Simplify[Cm/T*(Integrate[i1, {t, 0, γ*T}]+
  Integrate[i2, {t, γ*T, T}]), In]/.r3/.r4//Simplify;
{Ωbrd1, Ωbrd2} = ((Ωcp/.Solve[(i1/.t->#)==0, Ωcp][[1]])/.r5/
  r6)&/@{0, γ*T}; {Mbrd1, Mbrd2} = (M/.Ω->#/Ωxx)&/@{Ωbrd1, Ωbrd2};
W = sgn*Plus@@(#/.Solve[D[#, γ]==0, γ][[1]]&/@
  {Mbrd1, -Mbrd2})//FullSimplify;
```

Амплитуда пульсации тока якоря:

$$\begin{aligned}\Delta I_{i*} &= 2 \operatorname{csch}(\tau_{я}/2) \operatorname{sh}(\gamma \tau_{я}/2) \operatorname{sh}((1-\gamma)\tau_{я}/2), \\ \Delta I_{\text{II}*} &= \left(2 e^{\gamma \tau_{я}} - e^{\tau_{я}} - e^{t_0/T_{я}}\right) (1 - e^{-\gamma \tau_{я}})/(1 - e^{\tau_{я}}), \\ \Delta I_{\text{IV}*} &= |(\operatorname{sgn} U_{\text{пит}} - \Omega_{\text{СР}*}) (1 - e^{-\gamma \tau_{я}})|,\end{aligned}$$

где $\Delta I_{i*} = \Delta I_i / I_{\text{п}}$ – амплитуда пульсации тока в относительных единицах при i -м импульсном режиме ($\Delta I_{\text{II}*} = 2 \Delta I_{i*}$, выражение для $\Delta I_{\text{V}*}$ совпадает с выражением для $\Delta I_{\text{IV}*}$); $I_{\text{п}}$ – пусковой ток; γ – скважность ШИС; $\tau_{я} = T/T_{я}$ – относительная длительность периода ШИС; T – период ШИС; $T_{я}$ – электромагнитная постоянная времени якоря; $\operatorname{sgn} U_{\text{пит}}$ – знак напряжения источника питания; $\Omega_{\text{СР}*}$ – среднее значение скорости вращения двигателя; t_0 – интервал времени с начала периода ШИС до момента, когда ток меняет свой знак при нулевом значении ШИС (имеется в виду передний фронтальный ШИС):

$$t_0 = T_{я} \ln \frac{2 e^{\gamma \tau_{я}} - 1}{1 + \operatorname{sgn} U_{\text{пит}} \Omega_{\text{СР}*} (1 - e^{-\tau_{я}})}. \quad (23)$$

Выражения для граничных линий в относительных единицах

$$M_{\text{ГР. I}*} = (1/\tau_{я}) \ln(1 - \Omega_{\text{ГР. I}*} (1 - e^{\tau_{я}})) - \Omega_{\text{ГР. I}*}, \quad (24)$$

$$M_{\text{ГР. II}*} = 1 - (1/\tau_{я}) \ln(e^{\tau_{я}} + \Omega_{\text{ГР. II}*} (1 - e^{\tau_{я}})) - \Omega_{\text{ГР. II}*}, \quad (25)$$

$$M_{\text{ГР. III}*} = -(1/\tau_{я}) \ln(1 + \Omega_{\text{ГР. III}*} (1 - e^{\tau_{я}})) - \Omega_{\text{ГР. III}*}, \quad (26)$$

$$M_{\text{ГР. IV}*} = -1 + (1/\tau_{я}) \ln(e^{\tau_{я}} - \Omega_{\text{ГР. IV}*} (1 - e^{\tau_{я}})) - \Omega_{\text{ГР. IV}*}, \quad (27)$$

$$M_{\text{ГР. I-IV}*} = -1 + \frac{2}{\tau_{я}} \ln \frac{1 + e^{\tau_{я}} - \Omega_{\text{ГР. I-IV}*} (1 - e^{\tau_{я}})}{2} - \Omega_{\text{ГР. I-IV}*}, \quad (28)$$

$$M_{\text{ГР. II-III}*} = 1 - \frac{2}{\tau_{я}} \ln \frac{1 + e^{\tau_{я}} + \Omega_{\text{ГР. II-III}*} (1 - e^{\tau_{я}})}{2} - \Omega_{\text{ГР. II-III}*}, \quad (29)$$

где $\Omega_{\text{ГР. } i*} = \Omega_{\text{ГР. } i} / \Omega_{\text{х.х}}$ – средняя скорость двигателя в относительных единицах на граничной линии в i -м квадранте; $\Omega_{\text{х.х}}$ – скорость холостого хода; $M_{\text{ГР. } i*} = M_{\text{ГР. } i} / M_{\text{п}}$ – средний момент двигателя в относительных единицах на граничной линии в i -м квадранте; $M_{\text{п}}$ – пусковой момент.

На основании (24)–(29) получают аналитические выражения для ширины области переменных и прерывистых токов импульсных режимов

$$W_{\text{III}*} = \frac{1}{\tau_{я}} \left(2 \ln \frac{1 + e^{\tau_{я}}}{2} + \ln \frac{e^{\tau_{я}} - 1}{\tau_{я}} - 1 \right) + \frac{1}{e^{\tau_{я}} - 1} - 1,$$

$$W_{\text{V}*} = \frac{1}{\tau_{я}} \left(\ln \frac{e^{\tau_{я}} - 1}{\tau_{я}} - 1 \right) + \frac{1}{e^{\tau_{я}} - 1}, \quad W_{\text{I}*} = W_{\text{IV}*} = 2 W_{\text{V}*}, \quad W_{\text{II}*} = 4 W_{\text{V}*}.$$

Описания механических характеристик при импульсных режимах

$$M_{\text{СР*}} = \text{sgn } U_{\text{пит}} (2\gamma - t_0/T) - \Omega_{\text{СР*}}, \quad (30)$$

$$M_{\text{СР*}} = \text{sgn } U_{\text{пит}} (2\gamma - 1) - \Omega_{\text{СР*}} + \tau_0(\text{sgn } U_{\text{пит}} + \Omega_{\text{СР*}}), \quad (31)$$

$$M_{\text{СР*}} = \text{sgn } U_{\text{пит}} \gamma - \Omega_{\text{СР*}} - \tau_0 \Omega_{\text{СР*}}, \quad (32)$$

где t_0 определяется с помощью (23), τ_0 — относительная длительность интервала с прерывистым током:

$$\tau_0 = 1 - \frac{1}{\tau_{\text{я}}} \ln \frac{2e^{\gamma\tau_{\text{я}}} - 1 + \text{sgn } U_{\text{пит}} \Omega_{\text{СР*}}}{1 + \text{sgn } U_{\text{пит}} \Omega_{\text{СР*}}}, \quad (33)$$

$$\tau_0 = 1 - \frac{1}{\tau_{\text{я}}} \ln \left(1 + \frac{e^{\gamma\tau_{\text{я}}} - 1}{\text{sgn } U_{\text{пит}} \Omega_{\text{СР*}}} \right). \quad (34)$$

Выражение (30) описывает механические характеристики в случае импульсного режима III. Если положить $t_0 = \gamma T$ ($t_0 = T$), то получается описание механических характеристик при импульсном режиме I (II). Выражения (31) и (33) используются для формирования механических характеристик при импульсном режиме IV, а выражения (32) и (34) — в случае импульсного режима V.

Описания механических характеристик при методах П (Н) и С совпадают с описаниями характеристик при импульсных режимах I и II соответственно. Описание характеристик в случае использования метода Д является объединением описаний характеристик при импульсных режимах II и IV (методы ПД и НД — импульсные режимы I и V, методы СП и СН — импульсные режимы I, II, III и IV). Математические описания механических характеристик при методах Д и ПД (НД) соответственно

$$M_{\text{СР*}} = \begin{cases} 2\gamma - 1 - \Omega_{\text{СР*}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{+U_{\text{пит}}, -U_{\text{пит}}\}, \\ 2\gamma - 1 - \Omega_{\text{СР*}} + \tau_0(1 + \Omega_{\text{СР*}}) & \text{при } U_{\text{дв}} = \{+U_{\text{пит}}, -U_{\text{пит}}, \mathcal{E}_{\text{дв}}\}, \\ 1 - 2\gamma - \Omega_{\text{СР*}} - \tau_0(1 - \Omega_{\text{СР*}}) & \text{при } U_{\text{дв}} = \{-U_{\text{пит}}, +U_{\text{пит}}, \mathcal{E}_{\text{дв}}\}, \\ 1 - 2\gamma - \Omega_{\text{СР*}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{-U_{\text{пит}}, +U_{\text{пит}}\}, \end{cases}$$

$$M_{\text{СР*}} = \begin{cases} \gamma - \Omega_{\text{СР*}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{+U_{\text{пит}}, 0\}, \\ \gamma - \Omega_{\text{СР*}} - \tau_0 \Omega_{\text{СР*}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{+U_{\text{пит}}, 0, \mathcal{E}_{\text{дв}}\}, \\ -\gamma - \Omega_{\text{СР*}} - \tau_0 \Omega_{\text{СР*}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{-U_{\text{пит}}, 0, \mathcal{E}_{\text{дв}}\}, \\ -\gamma - \Omega_{\text{СР*}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{-U_{\text{пит}}, 0\}. \end{cases}$$

Внешний вид демонстрационной панели для формирования механических характеристик и исследования эпюр токов и напряжений при импульсных режимах и методах импульсного управления показан на рис. 11.

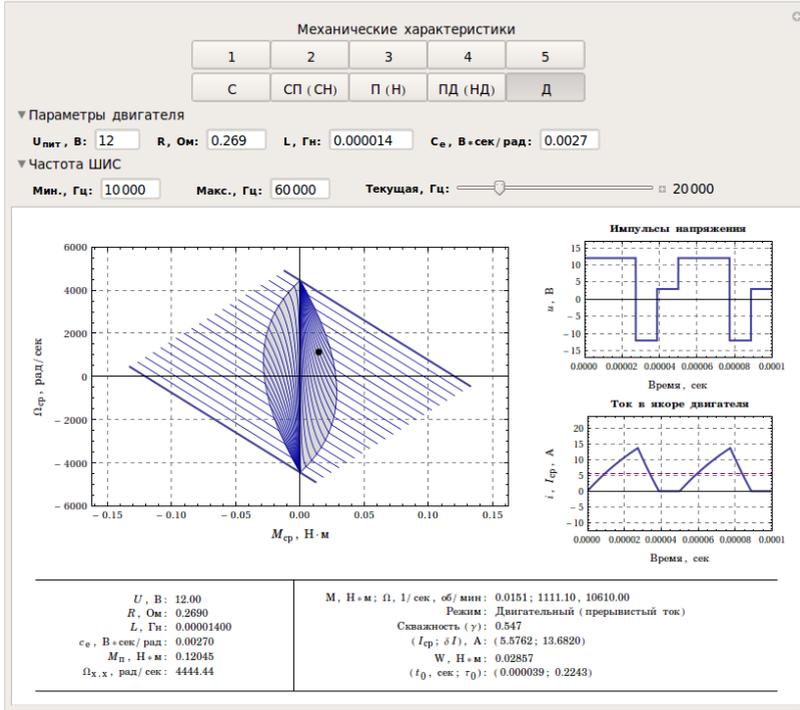


Рис. 11. Демонстрационная панель механических характеристик

Разработанный подход для формирования регулировочных характеристик состоит из следующей последовательности шагов:

- 1) получение для каждого импульсного режима описания среднего значения напряжения в относительных величинах $U_{ср*} = f(\gamma)$;
- 2) составление для каждого импульсного режима систем уравнений, которые справедливы на соответствующих интервалах периода ШИС;
- 3) получение выражений для скорости вращения двигателя и амплитуды её пульсации при всех импульсных режимах;
- 4) в случае необходимости, получение аналитического описания граничных линий для каждого импульсного режима;
- 5) объединение описаний регулировочных характеристик при импульсных режимах, которые имеют место для рассматриваемого метода;
- 6) создание демонстрационной панели, позволяющей исследовать регулировочные характеристики и эпюры скорости на периоде ШИС.

Выражения для среднего напряжения на обмотке двигателя:

$$\begin{aligned}
 U_{ср. I*} &= U_{ср. V*} = \text{sgn } U_{пит} \gamma, & U_{ср. II*} &= \text{sgn } U_{пит} (2\gamma - 1), \\
 U_{ср. III*} &= \text{sgn } U_{пит} (2\gamma - t_0/T), & U_{ср. IV*} &= \text{sgn } U_{пит} (2\gamma - 1 + \tau_0).
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

Выражение для амплитуды пульсации скорости при режимах I и II

$$\Delta\Omega_{\text{II}*} = 2\Delta\Omega_{\text{I}*} = \frac{2}{p_1 - p_2} \left(p_2 - p_1 + p_1 \operatorname{ch} \frac{(1 - 2\gamma)p_2 T}{4} \operatorname{sech} \frac{p_2 T}{4} - p_2 \operatorname{ch} \frac{(1 - 2\gamma)p_1 T}{4} \operatorname{sech} \frac{p_1 T}{4} \right) \approx \frac{T^2}{4} p_1 p_2 (1 - \gamma) \gamma, \quad (36)$$

где $p_{1,2} = (-1 \mp \sqrt{1 - 4T_{\text{я}}/T_{\text{м}}}) / (2T_{\text{я}})$ – корни характеристического уравнения; $T_{\text{м}}$ – механическая постоянная времени. Выражение (36) имеет место при $\tau_{\text{я}} < 1/2$. Амплитуда пульсаций скорости в остальных случаях определяется численно на основе полученных систем решений дифференциальных уравнений для скорости.

Описание регулировочных характеристик при импульсных режимах:

$$\Omega_{\text{ср}*} = \frac{U_{\text{ср}*} - M_{\text{н}*}}{1 - \tau_0}, \quad (37)$$

где $M_{\text{н}*} = M_{\text{н}}/M_{\text{п}}$ – значение момента нагрузки в относительных величинах; $U_{\text{ср}*}$ определяется согласно (35). При режимах I, II и III величина τ_0 в (37) равна нулю, в случае режима IV рассчитывается с помощью (33) и при режиме V – на основе (34).

Приближённые выражения регулировочных характеристик при импульсных режимах IV и V:

$$\begin{aligned} \Omega_{\text{ср. IV}*} &\approx \frac{\gamma^2 \tau_{\text{я}} - \operatorname{sgn} U_{\text{пит}} (1 + \gamma \tau_{\text{я}}) M_{\text{н}*}}{M_{\text{н}*} + \operatorname{sgn} U_{\text{пит}} \gamma^2 \tau_{\text{я}}}, \\ \Omega_{\text{ср. V}*} &\approx \frac{\tau_{\text{я}} \gamma (\gamma - \operatorname{sgn} U_{\text{пит}} M_{\text{н}*})}{\operatorname{sgn} U_{\text{пит}} \gamma^2 \tau_{\text{я}} + 2 M_{\text{н}*}}. \end{aligned} \quad (38)$$

Приближённые выражения характеристик для метода Д:

$$\Omega_{\text{ср}*} \approx \begin{cases} 2\gamma - 1 - M_{\text{н}*} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{+U_{\text{пит}}, -U_{\text{пит}}\}, \\ \frac{\gamma^2 \tau_{\text{я}} - (1 + \gamma \tau_{\text{я}}) M_{\text{н}*}}{M_{\text{н}*} + \gamma^2 \tau_{\text{я}}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{+U_{\text{пит}}, -U_{\text{пит}}, \mathcal{E}_{\text{дв}}\}, \\ \frac{\gamma^2 \tau_{\text{я}} + (1 + \gamma \tau_{\text{я}}) M_{\text{н}*}}{M_{\text{н}*} - \gamma^2 \tau_{\text{я}}} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{-U_{\text{пит}}, +U_{\text{пит}}, \mathcal{E}_{\text{дв}}\}, \\ 1 - 2\gamma - M_{\text{н}*} & \text{при } U_{\text{дв}} = \{-U_{\text{пит}}, +U_{\text{пит}}\}. \end{cases} \quad (39)$$

Описания (38) и (39) справедливы при $\tau_{\text{я}} < 1/2$. В случае $\tau_{\text{я}} \geq 1/2$ необходимо численно решать полученное трансцендентное уравнение (37).

Демонстрационная панель для исследования регулировочных характеристик и эпюр угловой скорости при импульсных режимах и методах импульсного управления на периоде ШИС представлена на рис. 12.

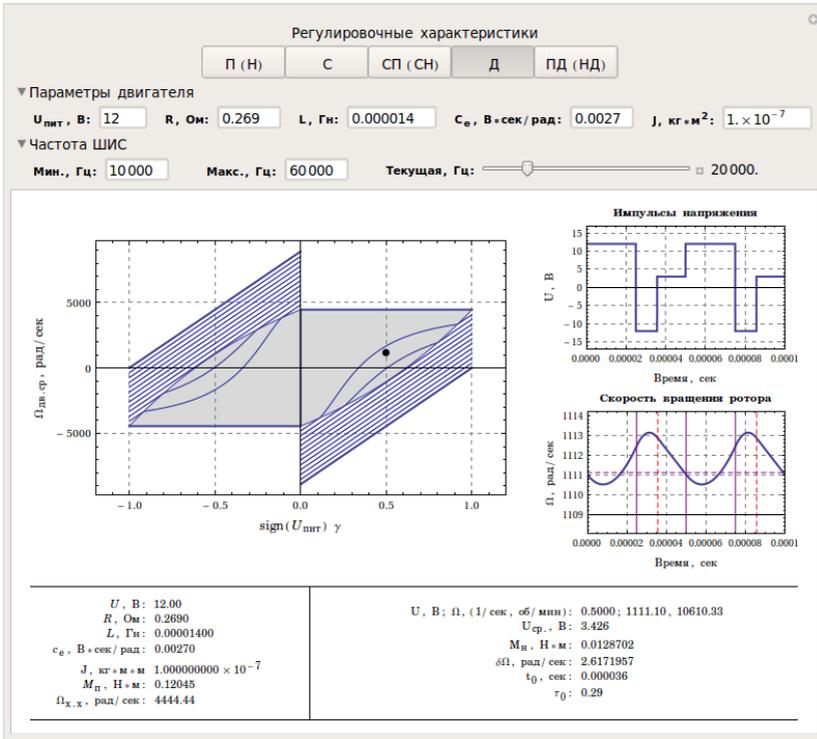


Рис. 12. Демонстрационная панель регулировочных характеристик

В главе 7 изложен автоматизированный подход к получению математического описания энергетических характеристик и исследованию дополнительных потерь мощности с помощью демонстрационной панели. Предлагаемый подход состоит из следующих шагов:

- 1) составление для каждого импульсного режима дифференциальных и алгебраических уравнений;
- 2) получение аналитических описаний потерь мощности с учётом дополнительных потерь и определение максимальных дополнительных потерь для каждого импульсного режима;
- 3) получение математических описаний механической и потребляемой мощности для каждого импульсного режима;
- 4) объединение соответствующих описаний дополнительных потерь мощности, механической и потребляемой мощности при импульсных режимах, которые имеют место в рассматриваемом методе управления;
- 5) создание демонстрационной панели, позволяющей исследовать дополнительные потери в плоскости механических характеристик.

Потери мощности при импульсном управлении состоят из основных потерь и дополнительных, связанных с пульсациями тока около его среднего значения, и определяются согласно выражению

$$P_{\text{пот}*} = M_{\text{н}*}^2 + \Delta P_*, \quad (40)$$

где ΔP_* — дополнительные потери мощности в относительных единицах. Выражение (40) не учитывает другие типы потерь (механические, в стали, в усилителе мощности и т. д.), т. к. в работе считается, что они составляют менее 10 % от основных потерь и ими можно пренебречь.

Дополнительные потери при импульсных режимах:

$$\Delta P_{\text{п}*} = 4 \Delta P_{\text{п}*} = 4 \left(\gamma - \gamma^2 - \frac{\Delta I_{\text{п}*}}{2 \tau_{\text{я}}} \right), \quad (41)$$

$$\Delta P_{\text{п}*} = 4\gamma(1-\gamma) + \theta_0(1-\theta_0-4\gamma) - \frac{1}{\tau_{\text{я}}} \operatorname{csch} \frac{\tau_{\text{я}}}{2} \left(3 \operatorname{ch} \frac{\tau_{\text{я}}}{2} + \operatorname{ch} \frac{\tau_{\text{я}}(2\theta_0-1)}{2} - 2 \left(\operatorname{ch} \frac{\tau_{\text{я}}(1-2\gamma)}{2} + \operatorname{ch} \frac{\tau_{\text{я}}(2\gamma+2\theta_0-1)}{2} \right) \right), \quad (42)$$

$$\Delta P_{\text{в}*} = \frac{4}{1-\tau_0} \left(\gamma - \gamma^2 + \tau_0(M_{\text{н}*}^2/4 - \gamma) - \frac{1-\tau_0 + \operatorname{sgn} U_{\text{пит}} M_{\text{н}*}^2/2 - \gamma}{\tau_{\text{я}}} (1 - e^{-\gamma \tau_{\text{я}}}) \right), \quad (43)$$

$$\Delta P_{\text{в}*} = \frac{1}{1-\tau_0} \left(\gamma - \gamma^2 + \tau_0(M_{\text{н}*}^2 - \gamma) - \frac{1-\tau_0 + \operatorname{sgn} U_{\text{пит}} M_{\text{н}*}^2 - \gamma}{\tau_{\text{я}}} (1 - e^{-\gamma \tau_{\text{я}}}) \right), \quad (44)$$

где $\theta_0 = 1 - t_0/T$, t_0 определяется с помощью (23).

На основе (41)–(44) получаются выражения для максимальных дополнительных потерь мощности

$$\Delta P_{\text{п max}*} = \Delta P_{\text{в max}*} = 4 \Delta P_{\text{п max}*} = 4 \Delta P_{\text{в max}*} = 1 - \frac{4}{\tau_{\text{я}}} \operatorname{th} \frac{\tau_{\text{я}}}{4}.$$

Максимальные дополнительные потери $\Delta P_{\text{п max}*}$ могут быть определены только численно, т. к. после дифференцирования выражения (42) по γ получается трансцендентное уравнение. В расчётах можно использовать следующее допущение: $\Delta P_{\text{п max}*} \approx \Delta P_{\text{п max}*}$.

Механическая ($P_{\text{мех}*}$) и потребляемая ($P_{\text{ср}*}$) мощности в относительных единицах:

$$P_{\text{мех}*} = \frac{U_{\text{ср}*} M_{\text{н}*} - M_{\text{н}*}^2}{1 - \tau_0}, \quad P_{\text{ср}*} = U_{\text{ср}*} M_{\text{н}*} + \Delta P_*.$$

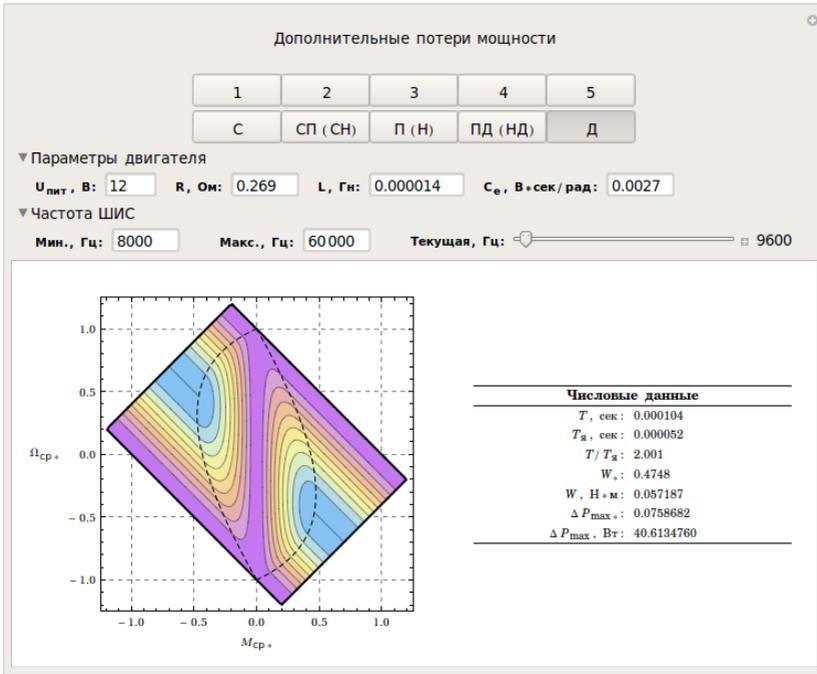


Рис. 13. Демонстрационная панель дополнительных потерь мощности

Демонстрационная панель, приведённая на рис. 13, может быть использована для исследования дополнительных потерь мощности при импульсных режимах и методах импульсного управления.

Дополнительными потерями можно пренебречь, если они менее 10% основных потерь в номинальном режиме работы ($M_{H*} \approx 0,1$). При использовании методов П (Н) и ПД (НД) дополнительные потери можно не учитывать, если $\tau_{я} \leq 0,43$, а в случае применения методов С, Д и СП (СН) — если $\tau_{я} \leq 0,21$.

В случае трёхфазного ВД выражения из глав 6 и 7 могут быть взяты для оценки его статических и энергетических характеристик при рассматриваемом методе импульсного управления, если использовать эквивалентные величины $R_{\text{ЭКВ}} = 2R_{\phi}$, $L_{\text{ЭКВ}} = 2(L_{\phi} - M)$ и $c_{e\text{ЭКВ}} = \sqrt{3}c_{e\phi}$, где R_{ϕ} , L_{ϕ} , M — активное сопротивление фазы, индуктивность фазы и взаимоиндукция между фазами соответственно; $c_{e\phi}$ — коэффициент противо-ЭДС фазы. Приведённые эквивалентные величины имеют место, когда магнитное поле якоря создаётся с помощью тока, протекающего по двум фазам в течение межкоммутационного интервала, и форма фазных противо-ЭДС представляет собой трапецию.

В главе 8 приведена разработанная структура программного комплекса (рис. 14) на основе компьютерной модели ММ. Помимо модели исследуемого объекта программный комплекс включает модули автоматизации расчёта и отображения результатов и обеспечивает максимальную загрузку имеющихся в наличии вычислительных ресурсов с помощью задействования параллельных или распределённых вычислений.

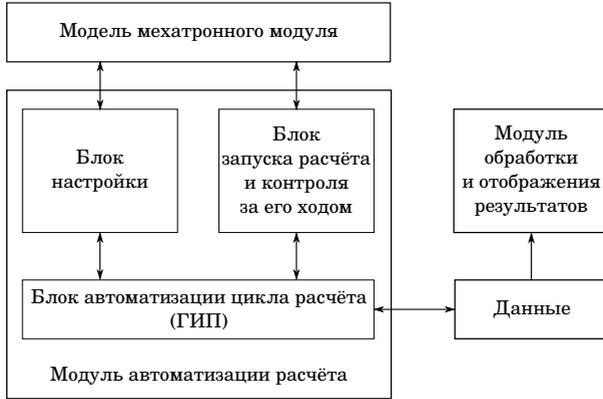


Рис. 14. Структура программного комплекса

С привлечением системы моделирования Simulink, интегрированной среды разработки графического интерфейса пользователя, языка программирования MATLAB и компилятора языка C разработаны программные комплексы для исследования физических процессов (эпюр цифровых сигналов, напряжений на якорной обмотке, токов в фазах двигателя и в источнике питания, режимов работы двигателя на периоде ШИС) и построения динамических, статических и энергетических характеристик ММ на основе ДПТ (ДПМ-35-Н1/Н2-05) и трёхфазного ВД (ДБМ-40-0.025-4-3).

На рис. 15 показан верхний уровень иерархической модели ММ с трёхфазным ВД. При описании моделей были использованы блоки из дополнительной библиотеки SymPowerSystems, обеспечивающие двухстороннюю передачу сигналов. В блоке SM реализована модель электромеханического преобразователя, учитывающая синусоидальную и трапецевидную форму противо-ЭДС. Блок Digital Control System содержит описания всех методов импульсного управления согласно введённой классификации. Модель наряду с блоками, линиями связи и собственной рабочей областью с текущими значениями коэффициентов, включает настраиваемые параметры (скважность и момент нагрузки) для обеспечения параллельных вычислений. При расчётах применялся стандартный метод Дж. Дормана и П. Принса (ODE45) с параметрами, заданными по умолчанию.

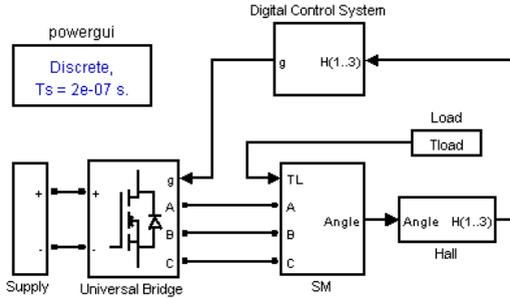


Рис. 15. Компьютерная модель ММ с трёхфазным ВД

Результаты расчёта эюр цифровых сигналов, фазных напряжений и напряжения в нейтральной точке относительно «земли», а также фазных токов при методе 120П показаны на рис. 16. В случае использования метода 120П двигатель при переменном токе на периоде ШИС, как следует из рис. 16, z , последовательно находится в режимах генераторном (Γ), двигательном (Δ) и электродинамического торможения (Θ). Введение паузы на переключение КЭ не влияет на последовательность режимов на периоде ШИС. В среднем при таком чередовании режимов в зависимости от момента нагрузки двигатель реализует либо режим Δ , либо режим Γ .

На основании проведенных исследований выявлены последовательности чередования режимов работы на периоде ШИС при работе ДПТ и трёхфазного ВД в каждом квадранте плоскости механических характеристик в случае применения методов импульсного управления:

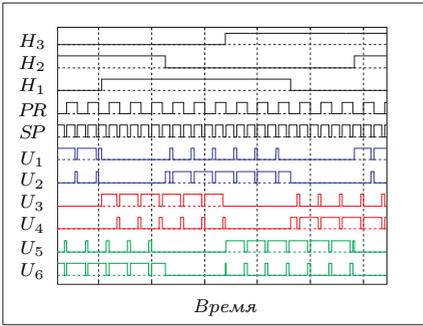
(120) $C_{(n)}$: *Режим* Δ — квадрант I: Δ , двигательный с рекуперацией (ДР) или Γ , Δ , ДР, противовключения (Π); квадрант III: ДР, Δ или ДР, Π , Γ , Δ . *Режим* Γ — квадрант II: Γ , Π или Γ , Δ , ДР, Π , где $t_r > t_{\Pi}$; квадрант IV: Π , Γ или ДР, Π , Γ , Δ , где $t_r > t_{\Pi}$. *Режим* Π — квадрант II: Γ , Π или Γ , Δ , ДР, Π , где $t_r < t_{\Pi}$; квадрант IV: Π , Γ или ДР, Π , Γ , Δ , где $t_r < t_{\Pi}$. *Режим* Θ — квадрант II: Γ , Π или Γ , Δ , ДР, Π , где $t_r = t_{\Pi}$; квадрант IV: Π , Γ или ДР, Π , Γ , Δ , где $t_r < t_{\Pi}$.

(120) $D_{(n)}$: *Режим* Δ — Δ , ДР (импульсный режим II) или Δ , ДР, прерывистый ток (ПТ) (IV). *Режим* Γ — Π , Γ (II) или Π , Γ , ПТ (IV), где $t_r > t_{\Pi}$. *Режим* Π — Π , Γ (II) или Π , Γ , ПТ (IV), где $t_r < t_{\Pi}$. *Режим* Θ — Π , Γ (II) или Π , Γ , ПТ (IV), где $t_r = t_{\Pi}$.

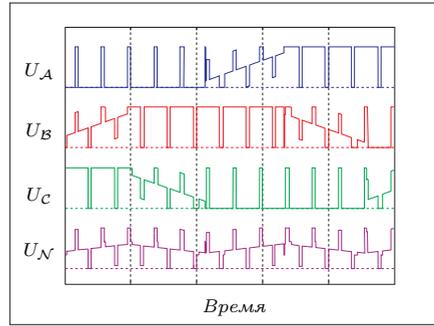
(120) $\Pi_{(n)}^{(\Theta)}$ или (120) $H_{(n)}$: *Режим* Δ — Δ (I) или Γ , Δ , Θ (I). *Режим* Γ — Γ , Θ (I) или Γ , Δ , Θ (I). *Режим* Π — Π , Θ (I). *Режим* Θ — Θ .

(120) $\Pi D_{(n)}^{(\Theta)}$ или (120) $H D_{(n)}$: *Режим* Δ — Δ (I) или Δ , ПТ (V). *Режим* Γ — отсутствует. *Режим* Π — Π , Θ (I). *Режим* Θ — Θ .

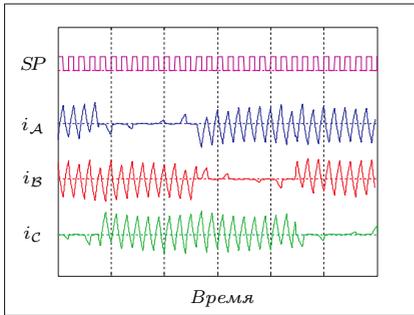
(120) $\Pi C_{(n)}^{(\Theta)}$ или (120) $C H_{(n)}$: *Режим* Δ — Δ , ДР (II) или Γ , Δ , ДР, Θ (III). *Ре-*



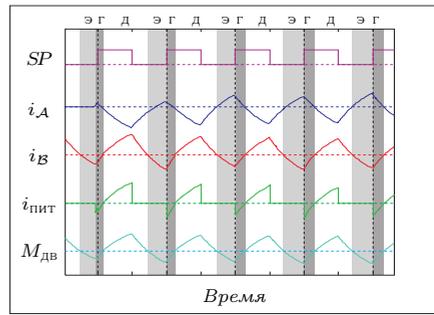
а) цифровые сигналы



б) фазные напряжения



в) фазные токи



г) режимы работы двигателя

Рис. 16. Эпюры сигналов при методе 120П

жсмм Г — Г, Э (I) или Г, Д, ДР, Э (III) или П, Г (II) или П, Г, ПТ (IV), где $t_r > t_n$. Режим П — П, Г (II) или П, Г, ПТ (IV), где $t_r < t_n$. Режим Э — Э или П, Г (II) или П, Г, ПТ (IV), где $t_r = t_n$.

При использовании методов $120П_{(n)}$, $120\bar{H}_{(n)}$, $120\underline{H}_{(n)}$, $120ПД_{(n)}$, $120\bar{H}\bar{D}_{(n)}$, $120\underline{H}\underline{D}_{(n)}$, $120СП_{(n)}$, $120\bar{C}\bar{H}_{(n)}$ и $120\underline{C}\underline{H}_{(n)}$ в неактивной на межкоммутационном интервале фазе будут иметь место пульсации тока, амплитуда которых зависит от значения противо-ЭДС этой фазы. Наличие пульсаций в неактивной фазе приводит к увеличению ΔP_* не более чем на 5% в режиме Д (максимум достигается при $M_{H*} = 0$ и $\gamma = 0,5$) и к повышению неравномерности электродвижущего момента. Для исключения пульсаций тока в неактивной фазе необходимо при отключении фаз от источника питания ($SP = 0$) организовывать контуры протекания тока через фазы двигателя в зависимости от знака противо-ЭДС этой фазы. В методах $120П_{(n)}^{\ominus}$, $120ПД_{(n)}^{\ominus}$ и $120СП_{(n)}^{\ominus}$, где отсутствуют пульсации тока в неактивных фазах, на первой половине межкоммутационного интервала используется один вариант соответственно методов $120H_{(n)}$, $120HD_{(n)}$ или $120CH_{(n)}$, а на второй половине — другой.

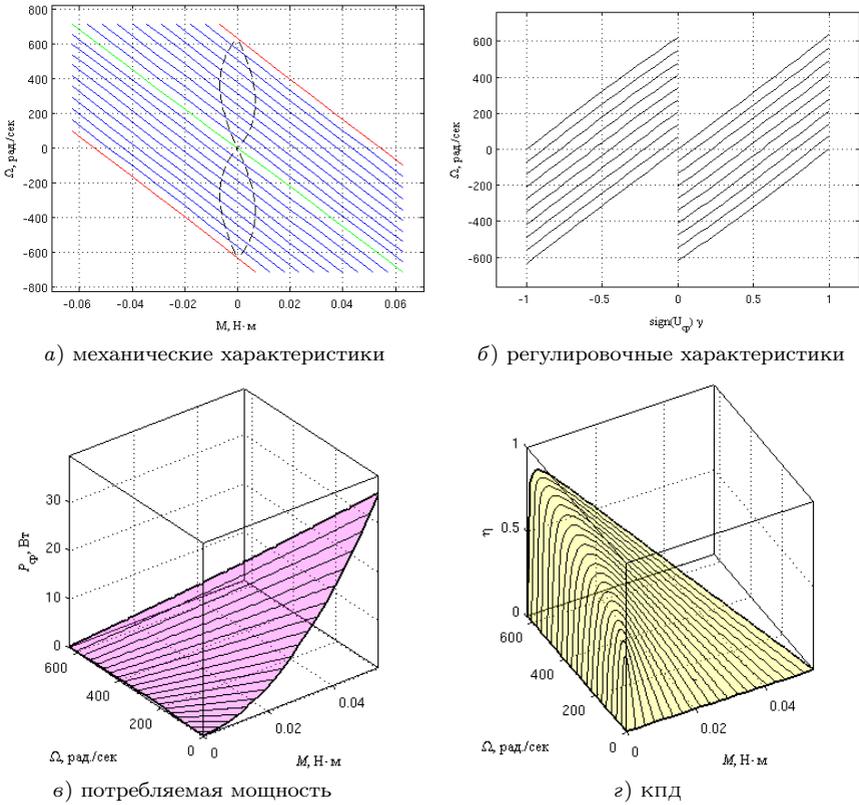
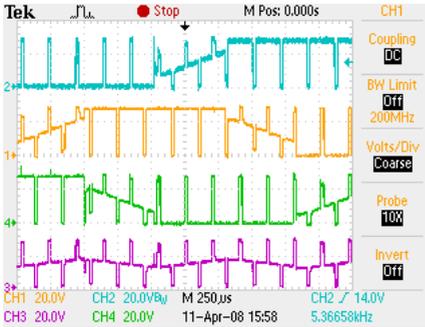
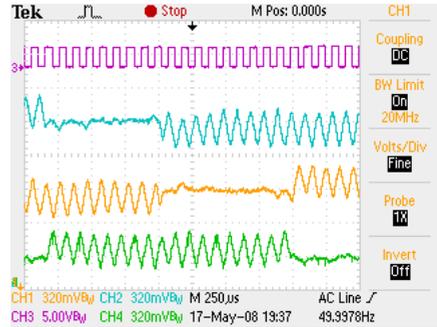


Рис. 17. Статические и энергетические характеристики при методе 120П

На рис. 17 показаны статические и энергетические характеристики при методе 120П. Пунктирной линией в плоскости механических характеристик (рис. 17,а) обозначена область переменных токов. Потребляемая мощность отображена с учётом дополнительных потерь и потерь в ИУМ на проводимость. Рассчитанные на базе компьютерной модели ММ с ДПТ характеристики совпадают с соответствующими характеристиками, построенными на основе аналитических выражений из глав 6 и 7. В случае использования модели трёхфазного ВД рассчитанные характеристики совпадают с допустимой погрешностью ($\approx 7\%$) с характеристиками, построенными на базе аналитических выражений и эквивалентных величин. Следовательно, модель ДПТ с эквивалентными величинами сопротивления, индуктивности и коэффициентов противо-ЭДС и момента можно использовать как упрощённую модель трёхфазного ВД при исследовании динамики сложных систем, включающих электрические приводы с ВД.

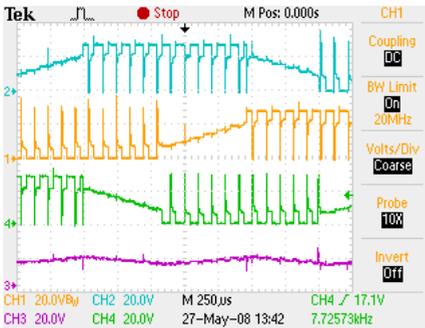


а) фазные напряжения

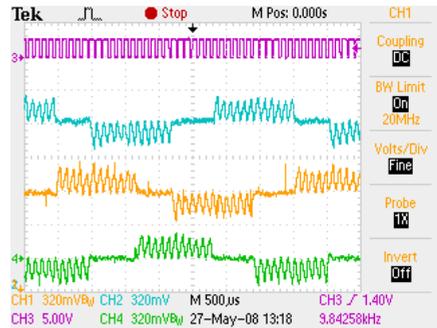


б) фазные токи

Рис. 18. Эпюры фазных напряжений и токов при методе 120П



а) фазные напряжения



б) фазные токи

Рис. 19. Эпюры фазных напряжений и токов при методе 120Д

В главе 9 показаны разработанные макеты ММ на основе ДПТ и трёх-фазного ВД, описана программа для автоматизации формирования входных сигналов в ЦУУ и приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтвердили теоретические положения и результаты компьютерного моделирования. На рис. 18 и 19 представлены эпюры фазных напряжений и токов при методах 120П и 120Д соответственно.

Заключение составлено из основных выводов по каждой главе.

В приложениях А, В, Г, Д, Е и Ж приведены соответственно реализации модулей отображения результатов синтеза, демонстрационных панелей механических характеристик, регулировочных характеристик, дополнительных потерь мощности, модуля автоматизации расчёта статических и энергетических характеристик и модуля обработки и отображения результатов расчёта. **В приложении Б** показаны модифицированные таблицы состояний и матрицы смежности. **Приложение З** состоит из актов о внедрении результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана научная концепция проектирования цифровых устройств управления системами «импульсный усилитель мощности – двигатель» на основе математической модели цифрового устройства, методов синтеза и анализа управляющих функций, интеллектуальных блоков в виде модулей с параметрами, вариантов классификации методов импульсного управления и импульсных режимов, подходов к формированию механических, регулировочных и энергетических характеристик, а также структуры высокопроизводительного программного комплекса с компьютерными моделями и модулями автоматизации расчёта и отображения результатов, которая отличается от известных тем, что позволяет разрабатывать с минимальными трудозатратами цифровые устройства, реализующие быстродействующие и энергоэффективные способы импульсного управления и обладающие высокой конкурентоспособностью на мировом рынке.
2. Предложены структура и математическое описание цифрового устройства управления на основе конвейерной обработки данных, отличающиеся от известных тем, что позволяют реализовывать быстродействующие и энергоэффективные алгоритмы импульсного управления системами «усилитель мощности – двигатель» на базе современных ПЛИС.
3. Разработаны методы синтеза и анализа управляющих функций на основе анализа требований, их формализации, паттернов ограничений, модифицированной матрицы смежности, применения символьных операций и использования интерактивной демонстрационной панели, отличающиеся от известных тем, что позволяют для рассматриваемого метода импульсного управления получить аналитические выражения управляющих функций, определить общее количество состояний управляющего слова и переходов между ними, выявить запрещённые состояния и опасные переходы, а также исследовать последовательность состояний управляющего слова на периоде фазных напряжений при различных направлениях вращения и типах широко-импульсного сигнала.
4. Для охвата новых физических процессов и технологических достижений расширены понятийные аппараты теории импульсного управления электродвигателями и теории цифровых устройств путём введения понятий «четвёртый импульсный режим», «пятый импульсный режим», «поочерёдно-диагональный метод импульсного управления», «несимметрично-диагональный метод импульсного управления», «симметрично-несимметричный метод импульсного управления», «симметрично-поочерёдный метод импульсного управления», «интерактивная демонстрационная панель», «интеллектуальный блок цифрового устройства управления системой “усилитель мощности – двигатель”», «паттерн ограничений», «модифицированная матрица смежности», а также принципа обозначения ме-

тодов импульсного управления, который учитывает состояния ключевых элементов усилителя мощности при нулевом широтно-импульсном сигнале, продолжительность нахождения ключевого элемента в открытом состоянии на периоде фазных напряжений, алгоритмическую паузу («мертвое время»), знак противо-ЭДС в неактивной фазе, угловой сдвиг сигналов о положении ротора друг относительно друга и тип ШИС.

5. С целью систематизации получения аналитических выражений и исследования механических, регулировочных и энергетических характеристик при рассматриваемом методе импульсного управления предложен новый вариант классификации импульсных режимов, базирующийся на пяти импульсных режимах и отличающийся от известного варианта тем, что учитывает импульсные режимы, при которых на обмотке двигателя появляются прерывистые токи, а также токи со следующей последовательностью режимов работы двигателя на периоде широтно-импульсного сигнала: генераторный, двигательный, двигательный с рекуперацией энергии и противовключение.

6. Предложен новый вариант классификации методов импульсного управления системами «усилитель мощности – двигатель», который базируется на статических характеристиках, равномерности загрузки ключевых элементов по току и импульсных режимах и отличается от известных на основе последовательного перечисления существующих методов, числа рабочих стоек в течение периода широтно-импульсного сигнала или межкоммутационного интервала, направления передачи энергии между источником питания и электродвигателем, скорости нарастания тока и полярности прикладываемых импульсов напряжения тем, что позволяет на ранних этапах проектирования электротехнической системы определить семейство статических характеристик, степень загрузки ключевых элементов по току и возможные направления передачи энергии.

7. Разработаны автоматизированные подходы к получению аналитических выражений и исследованию механических, регулировочных и энергетических характеристик с учётом дополнительных потерь мощности, базирующиеся на импульсных режимах, применении символьных операций и использовании демонстрационных панелей и отличающиеся от известных тем, что позволяют получить для рассматриваемого метода управления с несколькими импульсными режимами аналитические выражения тока и угловой скорости, амплитуды их пульсации, ширины зон прерывистых и переменных токов, а также механических, регулировочных и энергетических характеристик.

8. Предложен автоматизированный подход к расчёту и анализу статических и энергетических характеристик электротехнической системы на основе разработанной структуры высокопроизводительного программного комплекса с компьютерной моделью, модулями автоматизации расчёта,

хранения и отображения данных и возможностью задействования параллельных или распределённых вычислений. Предложенный подход позволяет автоматизировать расчёт и отображение эпюр исследуемых координат системы, а также динамических, статических и энергетических характеристик, существенно сокращая время на разработку энергоэффективного метода импульсного управления в сравнении с используемым в настоящее время подходом, при котором разработчик или исследователь последовательно получает информацию о каждой точке статических и энергетических характеристик.

9. Разработан и защищён патентом РФ на изобретение способ цифрового управления скоростью вращения трёхфазным вентильным двигателем с учётом знака противо-ЭДС, который отличается от известных отечественных и зарубежных способов тем, что отсутствует зона прерывистых токов в двигательной области и имеется возможность реализации двигателем режима генераторного торможения с учётом уменьшения пульсаций электродвижущего момента и дополнительных потерь мощности.

10. Созданы на языке описания цифровых устройств интеллектуальные блоки в виде модулей с настраиваемыми параметрами, которые позволяют задавать метод импульсного управления, разрядность входного сигнала, тип и частоту широтно-импульсного сигнала, состояние ключевых элементов в момент возникновения аварийной ситуации и угловой сдвиг сигналов о положении ротора. Использование разработанных интеллектуальных блоков при создании вычислительных систем более высокого уровня иерархии приведёт к сокращению сроков ввода в эксплуатацию электротехнической системы с цифровым устройством управления.

11. В защищённой диссертационной работе аспиранта С. А. Гагарина по теме «Автоматизированный синтез цифровых алгоритмов импульсного управления исполнительным механизмом привода с трёхфазным вентильным двигателем» разработанные теоретические положения были использованы при проектировании цифрового устройства, реализующего импульсное управление на основе векторной широтно-импульсной модуляции.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Кривилёв А. В.* Методы проектирования цифровой системы управления мехатронного модуля привода с вентильным двигателем. М.: Издательство МАИ-ПРИНТ, 2009, 192 с.
2. Пат. 2183031 РФ, МПК G05D13/62. Способ цифрового управления угловой скоростью трёхфазного бесконтактного двигателя постоянного тока / А. В. Кривилев; заявитель и патентообладатель А. В. Кривилев — № 2001111470/12; заявл. 27.04.2001; опубл. 27.05.2002.

3. Пат. 2438158 РФ, МПК G05D13/62. Способ цифрового управления угловой скоростью трёхфазного вентильного двигателя с учётом знака противо-эдс / С. А. Гагарин, А. В. Кривилев, А. В. Ситникова; заявитель и патенто-обладатель МАИ — № 2010137624/08; заявл. 10.09.2010; опубл. 27.12.2011.
4. *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.
5. *Кривилёв А. В., Стеблецов В. Г.* Автоматизированный метод синтеза управляющих булевых функций мехатронного модуля привода с двигателем постоянного тока // Вестник Московского авиационного института, 2009, т. 16, № 4, с. 62–68.
5. *Кривилёв А. В.* Автоматизированный метод анализа управляющего слова мехатронного модуля привода с двигателем постоянного тока // Вестник Московского авиационного института, 2009, т. 16, № 5, с. 171–177.
6. *Кривилёв А. В.* Автоматизированный синтез управляющих булевых функций мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем // Известия РАН. Теория и системы управления, 2010, № 2, с. 153–163.
7. *Кривилёв А. В., Ситникова А. В.* Автоматизированный анализ управляющего слова мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем // Известия РАН. Теория и системы управления, 2010, № 3, с. 5–13.
8. *Кривилёв А. В.* Математическое описание цифровой системы управления мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем // Мехатроника, автоматизация, управление, 2010, № 7, с. 40–48.
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, с. 18–24.
10. *Кондратьев А. Б., Кривилёв А. В., Ситникова А. В.* Исследование мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем при 180-градусном управлении [Электронный ресурс]: Труды МАИ / Моск. авиац. ин-т — Электронный журнал — М: МАИ, 2011.
12. *Кривилёв А. В.* Автоматизация формирования характеристик в задачах импульсного управления системой «усилитель мощности — исполнительный двигатель». I. Механические характеристики // Известия РАН. Теория и системы управления, 2013, № 2, с. 92–104.
13. *Кривилёв А. В.* Автоматизация формирования характеристик в задачах импульсного управления системой «усилитель мощности — исполнительный двигатель». II. Энергетические характеристики // Известия РАН. Теория и системы управления, 2013, № 3, с. 133–142.
14. *Кривилёв А. В.* Методы импульсного управления электрическими двигателями современных приводных систем // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013, № 4, с. 44–49.

Множительный центр МАИ (НИУ)
Заказ от 25.06.2013 г. Тираж 100 экз.