

На правах рукописи



Балковой Николай Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИМ МОМЕНТОМ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА СИСТЕМЫ
ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) и в акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полюс» (АО «НПЦ «Полюс»).

Научные руководители: доктор технических наук, профессор

Казанцев Юрий Михайлович

доктор технических наук, профессор
Михальченко Геннадий Яковлевич

Официальные оппоненты: **Гарганеев Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ), профессор Инженерной школы энергетики

Мурыгин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева), заведующий кафедрой Информационно-управляющих систем, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), г. Красноярск

Защита диссертации состоится «14» марта 2019 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «14» января 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.173.04, к.т.н.



Дыбко Максим Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Космический аппарат (КА) при выполнении своего функционального назначения должен занимать определенное угловое положение в орбитальной системе координат, что достигается с помощью системы ориентации и стабилизации (СОиС). Важными элементами СОиС являются исполнительные органы (ИО), которые создают моменты, прикладываемые к корпусу КА в процессе управления его движением относительно центра инерции.

Из всего многообразия ИО выделяют электромеханические исполнительные органы – управляющие двигатели-маховики (УДМ) и силовые гироскопы, которые обеспечивают точное дозирование выходного момента в широком диапазоне изменения задающего сигнала без использования невозобновляемых источников энергии.

Значительный вклад в развитие теории построения СОиС КА внесли известные отечественные и зарубежные ученые: Б.В. Раушенбах, Е.Н. Токарь, К.Б. Алексеев, Г.Г. Бебенин, В.И. Попов, А.Г. Иосифьян, В.Ф. Петрищев, А.Ю. Ишлинский, Н.Н. Шереметьевский, А.А. Анчев, Г.Г. Бебенин, М. Л. Дертозос, Д. М. Вейнберг, В. Н. Васильев, Д. С. Пельпор, А.Д. Джекот, F.L. Markley, J.L. Crassidi, J.R. Wertz, L-Q. Chen, L. Mazzini, C.D. Brown, W. Hu, M.J. Sidi, A. Tewari, W. Truszkowski, V.L. Pisacane, D. Sinclair, K.J. Walchko, Н.Н. Kurokawa. Развитие отечественной тематики исследований, анализа изобретений и конструирования приборов силовой гироскопии стало возможно благодаря изысканиям и труду Лянзбурга В.П., Гладышева Г.Н., Якимовского Д.О.

В связи с интенсивным применением мини- и микро-спутников для решения различных научно-производственных задач космонавтики интерес к УДМ резко возрос. Благодаря своим функциональным возможностям, простоте конструкции и высокой надежности эти исполнительные устройства конкурентоспособны с другими типами исполнительных органов.

Наиболее перспективным для использования в системах управления КА в качестве электромеханических исполнительных органов является электропривод на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Такой тип двигателя имеет высокие энергетические характеристики, а также обладает одними из лучших показателей по управлению скоростью и моментом. Основным функциональным назначением УДМ является формирование динамического момента пропорционально заданному коду управления.

Несмотря на то, что непосредственный метод управления динамическим моментом УДМ известен давно и позволяет получить линейные скоростные и регулировочные характеристики момента, его применение в УДМ невозможно из-за отсутствия простого и точного датчика момента, а также ввиду прочностных и конструктивных ограничений. Введение цифрового интегратора в структуру электропривода и использование в обратной связи сигнала частоты вращения двигателя также не решает проблему точностных и динамических характеристик электропривода УДМ, требует качественного сигнала частоты вращения и дополнительных мер для устранения всплесков динамического момента при начальной синхронизации.

В этой связи, до настоящего времени при разработке УДМ использовался косвенный метод управления динамическим моментом, основанный на регулировании фазного тока двигателя. Ввиду того, что при косвенном методе погрешность реализации динамического момента из-за момента сопротивления может достигать до 20% и полностью компенсировать ее средствами СОиС КА вследствие нелинейностей момента сопротивления, особенно в зоне околонулевых частот вращения не представляется возможным, поиск новых технических решений по управлению динамическим моментом двигателя-маховика является актуальной задачей.

Тема диссертационной работы «Разработка и исследование системы управления динамическим моментом двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата» соответствует перечню критических технологий Федерального уровня, а именно «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения».

Целью диссертационной работы является разработка и исследование способа управления динамическим моментом с компенсацией момента сопротивления и обеспечение линейного характера регулировочной и моментно-скоростных характеристик УДМ во всем диапазоне рабочих частот вращения (в том числе околонулевых), а также устройств для технической реализации этого способа.

Достижение поставленной цели предполагает конкретизацию и решение следующих **задач**:

1. Построение структурных и функциональных схем электропривода УДМ с новой системой управления на основе эталонной цифровой модели (ЭЦМ) и электропривода с фазовой синхронизацией (с фазовой автоподстройкой частоты ФАПЧ).
2. Разработка алгоритма работы ЭЦМ движения ротора-маховика с ускорением.
3. Математическое описание синтезированных структур электропривода УДМ и исследование динамических режимов замкнутой системы автоматического регулирования.
4. Разработка прототипов, проведение экспериментальных исследований и сравнение с теоретическими результатами.

Объектом исследования является электропривод УДМ на базе синхронного двухфазного двигателя с постоянными магнитами.

Предметом исследования является анализ способа управления динамическим моментом УДМ на основе принципа фазовой синхронизации с ЭЦМ, его динамические и точностные характеристики.

Методы исследований. Применяемые для исследования методы относятся к общим методам системного анализа, статистической обработки, фильтрации информации, линейной алгебры и аналитической геометрии, методам структурного и объектно-ориентированного программирования, методам теории автоматического управления, теории электрических машин и электропривода, методам имитационного моделирования и эмпирического исследования. Расчетные исследования выполнены в системах MathCAD 14, MATLAB R2016b. Проверка и отладка работы программ, написанных на языке Verilog, осуществлена во встроенном симуляторе САПР Quartus II 9.0 и в среде симуляции ModelSim 6.4a. Моментно-скоростные и моментно-регулируемые характеристики электропривода УДМ рассчитаны с помощью программ, написанных в средах разработки Borland C++ Builder 6.0, NetBeans IDE 7.4.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов и выводов подтверждается их соответствием общей теории электротехники и электропривода, адекватностью разработанных моделей, согласованностью с результатами экспериментальных исследований на физической модели устройства, а также положительными решениями патентных экспертиз.

Научная новизна.

1. Впервые предложен способ управления динамическим моментом двигателя-маховика на основе системы с созданной эталонной цифровой моделью в контуре фазовой синхронизации.
2. Разработаны алгоритмы работы эталонной цифровой модели УДМ и алгоритмы синхронизации ее параметров с текущими выходными координатами двигателя.
3. Впервые предложен способ сложения частот пилообразных цифровых сигналов, реализуемый путем отбрасывания старшего бита результата суммирования.

4. Разработана трехконтурная имитационная модель электропривода УДМ на основе ЭЦМ и принципа фазовой синхронизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный способ и устройство для реализации управления динамическим моментом УДМ позволяют обеспечить линейную форму моментно-скоростных и стабильность крутизны моментно-регулирующих характеристик УДМ, то есть получить пропорциональную зависимость динамического момента от сигнала задания во всем диапазоне изменения кинетического момента и тем самым компенсировать влияние момента сопротивления на процесс ориентации и стабилизации КА.

2. Впервые созданная трехконтурная имитационная модель электропривода УДМ с учетом принятых допущений отражает электромеханические процессы, протекающие в системе управления двигателя-маховика по динамическому моменту (ускорению). Имитационная математическая модель является структурно-целостным инструментом, который включает в себя систему дифференциальных уравнений, построенную в базе коммутационно-разрывных функций и необходимые логические функции, позволяющие реконфигурировать независимые контуры регулирования.

3. Предложенный способ сложения частот пилообразных сигналов позволяет перейти от операций с тригонометрическими функциями (4 умножения, 2 сложения) к суммированию пилообразных функций и реализовать этот процесс аппаратно-программными средствами, упростив при этом структуру системы управления.

4. Созданный комплекс математических и научно-технических инструментов позволяет проектировать надежные системы управления динамическим, кинетическим моментами СДПМ с возможностью угловой стабилизации и является гибким средством анализа вновь разрабатываемых приборов и отладки уже существующих.

Практическая значимость работы:

1. Синтезирована система управления УДМ, позволяющая повысить точность реализации динамического момента при заданных динамических характеристиках в широком диапазоне изменения частоты вращения маховика для исключения влияния момента сопротивления на процесс ориентации и стабилизации КА.

2. Разработаны методики испытаний и измерений параметров приборов с новой системой управления, которые заложены в алгоритмы автоматических проверок в составе контрольно-проверочной аппаратуры приборов.

3. Электропривод УДМ с новой системой управления позволяет уменьшить шаг задания динамического момента с 0,1 мН·м до 0,025 мН·м (и менее) и уменьшить погрешность с 10-20 % до 0,5 %, а также погрешность измерения кинетического момента с 3 % до 0,2 % при увеличении разрядности и уменьшении интервала измерения.

4. Изготовлены экспериментальные и опытные образцы приборов. Проведены лабораторно-отрабочные испытания, предварительные испытания, испытания на ЭМС.

5. Электропривод УДМ с новой системой управления позволяет повысить точности СОиС за счет исключения мертвых зон трогания УДМ, компенсации возмущающих моментов без участия управления СОиС при снижении динамических отклонений стабилизации КА.

Внедрение результатов.

Выполнение задач диссертационной работы осуществлялось в соответствии со следующими договорами и государственными контрактами:

– тема «Создание высокоэффективных инерционных исполнительных органов нового поколения для систем ориентации КА» (шифр ОКР «Гироскоп-2»), государственный контракт № 650-8606/07 с Федеральным космическим агентством от 24.03.2007 при проектировании блока электроники – модуля управления динамическим моментом двигателя-маховика УДМ-2-50;

– договор № 159/13 с ФГУП «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» от 20.02.13 при проведении работ по изготовлению, испытаниям, созданию имитационной модели прибора УДМ-2-50М;

– по теме «Акварель», договор № 770/766/63-2014-177/14 от 19.11.2014 (с АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва) при эскизном проектировании;

– по теме «Геракл-КВ», договор № 770/770/75-2014-175/14 от 30.09.2014 (с АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва) при создании эскизного проекта;

– по теме «ТЭМ-А-УДМ», договор № 191/15 от 01.10.2015 (с ФГУП «КБ «Арсенал») при выпуске эскизного проекта;

– СЧ ОКР по теме «Нумизмат-МДП», контракт № 180/15/1226-Г от 11.03.2015 с ФГУП «ЦНИИХМ» при разработке эскизного проекта и конструкторской документации; изготовлены устройства с системой управления на основе эталонной цифровой модели и принципа фазовой синхронизации: инженерные модели регулятора динамического момента (РДМ), пульта для разгона и настройки электродвигателя-маховика, экспериментальные и опытные образцы приборов.

Личный вклад автора: предложены структурная и функциональная схемы системы управления УДМ на основе ЭЦМ и электропривода с фазовой синхронизацией; приведены аналитические соотношения, методики расчета и алгоритмы работы ЭЦМ движения ротора-маховика с ускорением; предложено уточнение математической модели момента сопротивления в части дополнения характера изменения момента трогания; разработан модуль вычисления кода углового положения ротора на основе алгоритма CORDIC; разработан модуль формирователя сигнала кинетического момента; предложен способ сложения частот пилообразных сигналов; разработаны экспериментальные образцы регулятора динамического момента; проведены экспериментальные исследования предложенной системы управления УДМ; создана имитационная модель УДМ, представлено аналитическое описание ее отдельных блоков; работа силовой части представлена в базисе коммутационно-разрывных функций; проведен частотный анализ предложенной системы. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат: разработка основных теоретических положений и способов их реализации, получение и оценка результатов экспериментальных исследований.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях различного уровня, в числе которых:

1. VIII Международная научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «НПЦ "ПОЛЮС" 17-21 апреля 2010 г.

2. V Юбилейная международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии», посвященной памяти Г.А. Сипайлова, Томск, ТПУ 12-14 октября 2011 г.

3. XXXVI Академические чтения по космонавтике, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24-27 января 2012 г.

4. Молодёжная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике» 27 -29 июня 2012 г. ФГБУ «НИИ Центр подготовки космонавтов им. Ю.А.Гагарина»

5. XVI Международная научная конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (7-9 ноября 2012, г. Красноярск).

6. Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» 14-15 февраля 2013 г. ОАО «НПЦ «Полус», г.Томск.

7. Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» 16-17 апреля 2015. АО «НПЦ «Полус», г.Томск.

8. VIII Молодежная научно-техническая конференция «Инновационный арсенал молодежи» 31 мая – 2 июня 2017. АО «КБ «Арсенал», Санкт-Петербург.

9. Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» 12-13 апреля 2018 г. ОАО «НПЦ «Полус», г. Томск.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 16 печатных работах, в том числе имеются 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, получены 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 141 наименования, 4 приложений. Общий объем диссертации без приложений 173 страницы, в том числе 112 рисунков, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований, приведены сведения о научной значимости и практической ценности, реализации и апробации работы.

В первой главе рассмотрены основные типы электромеханических исполнительных органов космического аппарата, их преимущества и недостатки. Кратко описаны физические основы построения систем ориентации и стабилизации космических аппаратов.

Предложена классификация двигателей-маховиков по способу управления. Согласно этому критерию УДМ можно разделить на четыре категории по реализации пропорциональной зависимости между кодом управления и следующими моментами: динамическим с помощью обратной связи по ускорению или сигналам датчика динамического момента (прямой способ); электромагнитным (косвенный способ); динамическим на основе электромагнитного момента и обратной связи по углу с компенсацией отклонений от эталонной траектории движения вала (комбинированный способ, разработке и исследованию которого посвящена данная работа); кинетическим с помощью обратной связи по угловой скорости.

Основными выходными параметрами УДМ являются кинетический $H = J\omega$ и динамический $M_d = J\dot{\omega} = \dot{H}$ моменты, где J – момент инерции маховика, ω – угловая скорость. В обычном электроприводе сигнал управления N_y определяет значение и знак скорости, а момент имеет подчиненное значение, зависящее от закона управления. В данном случае сигналу управления должен соответствовать динамический момент, а угловая скорость определяется накопленным значением согласно соотношению

$$\omega = \int_0^t \frac{M_d}{J} dt \quad \text{или} \quad H = \int_0^t M_d dt . \quad (1)$$

Сигнал управления "N_y" динамическим моментом вырабатывается устройствами СОИС и, как в любой замкнутой автоматической системе в процессе отработки заданного направления ориентации или стабилизации, может изменяться в широких пределах от

минус $N_{у\text{ макс}}$ до $+N_{у\text{ макс}}$, проходя через нулевое значение. Следовательно, и момент M_d должен изменяться в соответствующем диапазоне.

Свободному вращению маховика (выбегу) препятствует момент сопротивления M_c , представляющий собой сложную функцию угловой скорости $M_c(\omega)$. Электродвигатель УДМ физически создает электромагнитный момент $M_{эм}$, поэтому маховик вращается под действием двух моментов:

$$M_d = M_{эм} - M_c = \dot{H} = J\dot{\omega}, \quad (2)$$

где M_d - динамический момент; $M_{эм}$ - электромагнитный момент; M_c - момент сопротивления вращению маховика; H - кинетический момент УДМ.

На практике точная оценка M_c и его составляющих не всегда возможна по техническим причинам, особенно сильное влияние на динамику КА оказывает момент трогания (M_T), воздействие которого равносильно размыканию цепи управления и ведет к перерегулированию и автоколебаниям.

Экспериментальные данные (рисунки 1, 2), подтверждают нестабильность момента трогания и нелинейный характер зависимости моментов сопротивления от кинетического момента в вакууме ($1,33 \cdot 10^{-1}$ Па) для УДМ с номинальными кинетическим моментом 2 Н·м·с и динамическим моментом 50 мН·м. Кроме того, функция M_c имеет сингулярность в виде разрыва первого рода в области перехода через ноль.

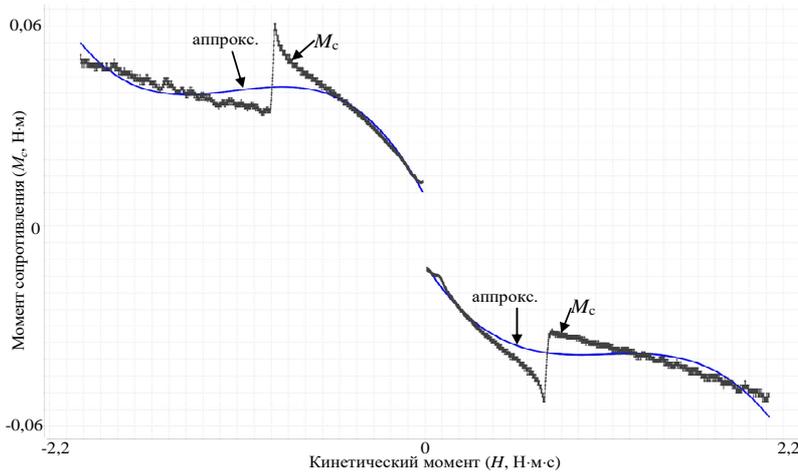


Рисунок 1 – Зависимость M_c от кинетического момента ДМ2 в вакууме при $-20\text{ }^\circ\text{C}$

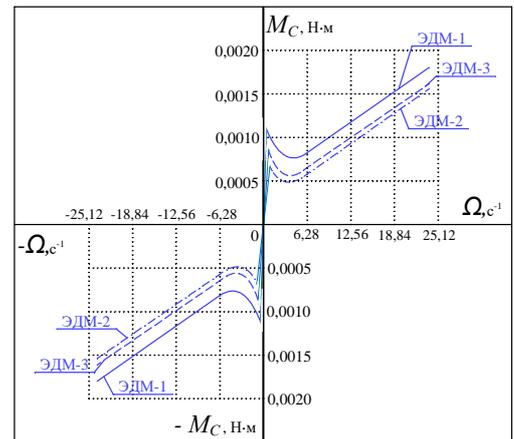


Рисунок 2 – График момента сопротивления в зоне нулевых частот вращения УДМ

Нелинейность момента сопротивления негативно сказывается на качестве работы СОиС КА и выполнении им целевого назначения в целом. Таким образом, актуален поиск путей компенсации момента сопротивления УДМ и в частности его момента трогания для нивелирования влияния нелинейности и сингулярности M_c .

При синтезе нового способа управления динамическим моментом основополагающей задачей являлось обеспечение линейной зависимости между динамическим моментом УДМ и заданным кодом управления: $M_d = K_{дм} N_y$, и, как следствие, исключение необходимости компенсации дестабилизирующих факторов УДМ (вызываемых M_c) средствами СОиС КА.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы построения систем управления динамическим моментом УДМ на основе эталонной цифровой модели (ЭЦМ) и принципа фазовой синхронизации.

На рисунке 3 представлена обобщенная структурная схема устройства, поясняющая принцип действия предложенного способа управления динамическим моментом УДМ. В ее состав входят: эталонная цифровая модель ЭЦМ, преобразователи частот ПЧ1, ПЧ2, генератор опорной частоты ГОЧ, частотно-фазовый дискриминатор ЧФД,

корректирующее устройство КУ, устройство коммутации контуров УКК, ключи К1, К2, электропривод ЭП (в состав которого входят синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов СДПМ, датчик положения ротора ДПР, регуляторы тока РТ).

Задающая частота $\pm \omega_3$ вырабатывается ЭЦМ (в виде ортогональных гармонических сигналов или кода углового положения ротора с частотой

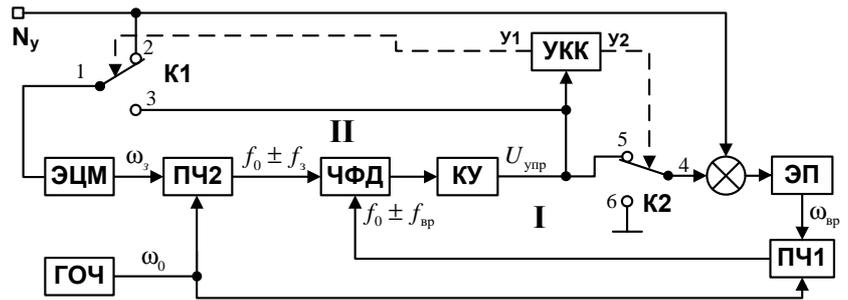


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема электропривода

ω_3), на вход которой через замкнутые контакты 1 и 2 ключа К1 подаются управляющие сигналы динамического момента N_y . В состав модели входят два последовательно соединенных интегратора, первый из которых формирует мгновенное значение частоты ω_3 с темпом изменения (ускорением), пропорциональным входному сигналу управления, а второй преобразует эту частоту в мгновенное значение фазы (углового положения) φ_3 ротора УДМ. В случае использования тригонометрических соотношений для сложения частот выход второго интегратора модели соединяется с конвертером фазы в амплитуду, преобразующим входной пилообразный сигнал в ортогональные гармонические сигналы.

В контур I представленного на рисунке 3 устройства входят ЧФД, КУ, УДМ, ПЧ1, К2. Принцип действия преобразователя частоты основан на тригонометрических соотношениях

$$\begin{aligned} \sin((\omega_0 + \omega_3)t) &= \sin(\omega_3 t) \cos(\omega_0 t) + \cos(\omega_3 t) \sin(\omega_0 t); \\ \cos((\omega_0 + \omega_3)t) &= \cos(\omega_3 t) \cos(\omega_0 t) - \sin(\omega_3 t) \sin(\omega_0 t), \end{aligned} \quad (3)$$

а задачей является сложение гармонических частот $\pm \omega_{вр}$ (знак $\omega_{вр}$ определяется направлением вращения), пропорциональной скорости вращения двигателя с опорной частотой ω_0 (вырабатывается ГОЧ) и выделение из суммарной гармонической частоты $\omega_0 \pm \omega_{вр}$ импульсов с частотой $f_0 \pm f_{вр}$ (при этом может быть выделено от 1 до k импульсов за один период частоты $\omega_0 \pm \omega_{вр}$). Также следует отметить, что для упрощения системы тригонометрические операции могут быть заменены на иные операции, позволяющие производить сложение различных частот с большой точностью.

Импульсы с суммарной частотой $f_0 \pm f_{вр}$ подаются на вход ЧФД, на другой вход которого подается частота $f_0 \pm f_3$, аналогичным образом полученная в ПЧ2.

Для согласования начальных значений ЭЦМ с текущей скоростью и угловым положением ротора, т.е. принудительной синхронизацией (например, при включении устройства в момент, когда частота вращения вала двигателя отлична от нулевой) структурная схема устройства переключается с помощью УКК: контакты 1 и 2 и 4 и 5 размыкаются, а контакты 1 и 3, 4 и 6 замыкаются. При этом контур I размыкается и замыкается контур II. Вход УДМ при этом замыкается на ноль, а сигнал управления динамическим моментом N_y отключается от входа модели.

Контур II является следящим и аналогичен контуру I, только в нем УДМ заменен на ЭЦМ движения ротора-маховика с ускорением. Поэтому он уравнивает частоту ω_3 с частотой $\omega_{вр}$, при этом последняя в данном случае является задающей. Коэффициент передачи первого интегратора модели при замыкании контура II скачком увеличивается до максимально допустимой величины с целью ускорения синхронизации.

Контур подчиненного регулирования входит в структуру ЭП и представляет собой двухфазный мостовой инвертор с обратной связью по току.

В работе детально описаны особенности функционирования каждого контура, условия и последовательности их переключения.

Необходимость начальной синхронизации координат ЭЦМ с реальными выходными координатами двигателя по частоте вращения и углу обусловлена стремлением системы минимизировать фазное рассогласование путем приведения вала двигателя с маховиком в исходное состояние с нулевой начальной частотой вращения и нулевым углом, автоматически устанавливаемым в интеграторах ЭЦМ в нештатных и переходных режимах, например, при включении питания, переключении с основного канала управления на резервный или при возникновении сбоев в бортовой системе электропитания. В случае отсутствия начальной синхронизации сведение фазового рассогласования к нулю происходило бы с максимальным электромагнитным моментом и приводило бы к формированию недопустимых неконтролируемых управляющих моментов, прикладываемых к корпусу КА.

Для улучшения динамики системы и обеспечения требуемых параметров по быстродействию и перерегулированию ток двигателя формируется не только из сигнала рассогласования между ЭЦМ и УДМ, но и сигнала, пропорционального коду управления. При такой структуре контур с ЭЦМ выполняет функцию коррекции токов двигателя с целью достижения синхронности сигналов ЭЦМ и ДПР УДМ в то время, как сигнал, пропорциональный коду управления, задает основное значение тока в фазах двигателя.

Проведены разработка и исследования цифровой системы управления динамическим моментом УДМ (рисунок 4), реализующей принцип фазовой синхронизации. Такая система позволяет заменить сложные тригонометрические операции (3) с гармоническими сигналами, требующими сложения и умножения, на простую операцию сложения с отбрасыванием старших битов результата, добиться высокой точности и стабильности параметров функционирования отдельных узлов системы, а также обеспечить гибкость при настройке и отладке всего электропривода в целом.

Основным вычислительным устройством такой системы является программируемая логическая схема (ПЛИС). Входной кодовый сигнал управления поступает по интерфейсной магистрали и преобразуется модулем информационного обмена, откуда поступает на сумматор и определяет основную составляющую сигнала задания для регуляторов тока – инверторов (И). Второй составляющей сигнала задания инверторов является выходной сигнал контура коррекции углового положения двигателя, который отслеживает угловое рассогласование между ЭЦМ и реальными координатами двигателя. Для работы на сверхнизких частотах вращения и с целью упрощения выявления фазного рассогласования применяются ЧФД и ГОЧ, определяющий частоты работы ЧФД. Демодулятор датчика положения ротора (ДМ) формирует огибающую выходных сигналов ДПР, которая переводится в цифровую форму с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Для получения из ортогональных гармонических сигналов пилообразного сигнала, соответствующего коду углового положения двигателя, применяется алгоритм (CORDIC). Полученный низкочастотный сигнал складывается с кодом опорной частоты и с помощью ЧФД сравнивается с аналогичным сигналом, поступающим от ЭЦМ. Сглаженный с помощью фильтра (Ф) и смещенный выходной

сигнал ЧФД проходит через КУ, после чего представляет собой вторую составляющую для задающего сигнала инверторов. Блок формирования кода кинетического момента (ФСКМ) соединен с БСПИ и выдает информацию о текущем состоянии двигателя в СОиС КА.

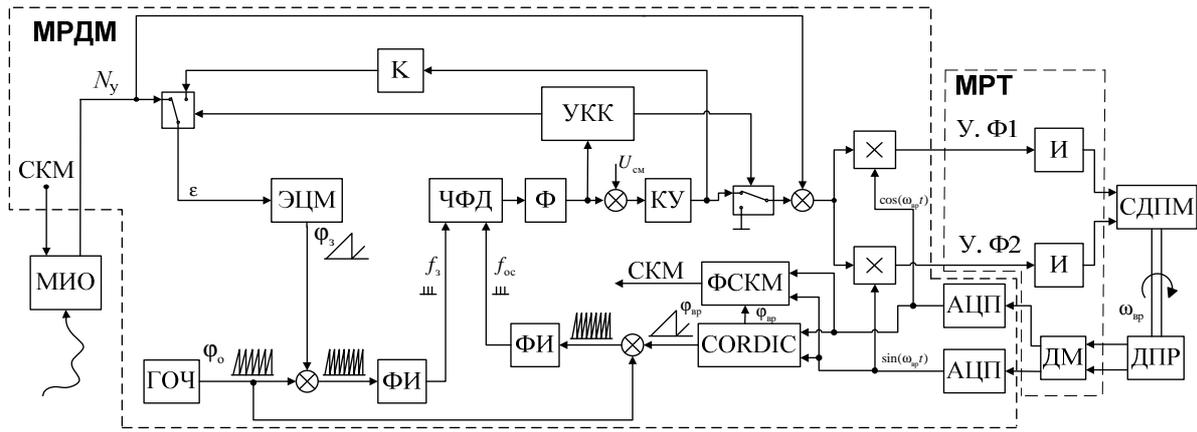


Рисунок 4 –Функциональная схема цифрового привода УДМ

Вторая глава также содержит описание и результаты реализации алгоритма CORDIC, который позволяет вычислять код углового положения ротора УДМ и использовать его в качестве сигнала обратной связи для контуров фазовой синхронизации

Приведены функциональная схема созданной ЭЦМ (рис. 5), основные расчетные соотношения и алгоритмы работы ее узлов. Базовым принципом, лежащим в ее основе, является прямой цифровой синтез (Direct Digital Synthesis или DDS). Отличия данного устройства от типовых DDS-синтезаторов заключаются в следующем: ЭЦМ производит функцию двойного интегрирования (а не одного, как в DDS), поэтому, кроме аккумулятора фазы, применяется еще и аккумулятор частоты; входной код динамического момента N_y пропорционален ускорению (а не частоте) и может быть как положительным, так и отрицательным; в составе ЭЦМ имеются два аккумулятора фазы для формирования синуса и косинуса; выходные сигналы содержат информацию о направлении вращения.

ЭЦМ состоит из двух цифровых интеграторов, которые называются аккумуляторами частоты и фазы. Каждый из таких аккумуляторов строится на основе накапливающего сумматора-вычитателя, представляющего собой регистр, инкрементирующийся или декрементирующийся на значение входного кода с каждым тактом работы устройства.

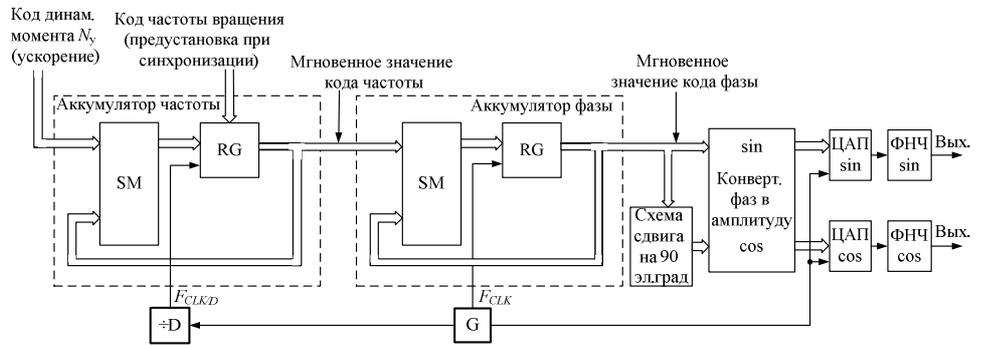


Рисунок 5 –Функциональная схема ЭЦМ движения ротора-маховика с ускорением

Код управления N_y , поступающий на вход аккумулятора частоты, преобразуется в мгновенные значения выходной частоты с приращением, пропорциональным входному коду и определяющим угловое ускорение, а следовательно, и динамический момент. Аккумулятор фазы преобразует текущее значение частоты вращения в мгновенное значение угла поворота ротора.

Преобразование пилообразных сигналов мгновенного кода угла в соответствующие им значения гармонических функций (при необходимости) производится в конвертере фаз в амплитуду. На его вход подается усеченное справа значение аккумулятора фазы, а на выходах цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) формируются сигналы с частотой ω_3 . На выходе фильтров получают искомые сигналы задающей частоты $\sin(\omega_3 t)$ и $\cos(\omega_3 t)$.

Преобразование пилообразных сигналов мгновенного кода угла в соответствующие им значения гармонических функций (при необходимости) производится в конвертере фаз в амплитуду. На его вход подается усеченное справа значение аккумулятора фазы, а на выходах цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) формируются сигналы с частотой ω_3 . На выходе фильтров получают искомые сигналы задающей частоты $\sin(\omega_3 t)$ и $\cos(\omega_3 t)$.

На основе требований к алгоритму работы ЭЦМ, функциональной схемы (рис. 4, 5) и выведенных расчетных соотношений разработаны алгоритмы работы аккумуляторов фазы и частоты. Причем эти алгоритмы составлены с использованием синтаксиса, наиболее близкого к языку описания цифровых устройств Verilog, для простого перехода к программируемой логике и написания соответствующего кода.

На блок-схеме алгоритма функционирования аккумулятора частоты (рис. 6) с каждым фронтом частоты $F_{CLK/D}$ происходит смена значения s -разрядного двоичного регистра частоты K , которое является входным кодом для аккумулятора фазы. Здесь также происходят инициализация и дальнейшее изменение регистра направления вращения rot_znak , определяющего правильное чередование фаз синуса и косинуса. Если

текущий код N_y равен коду разгрузки $N_{разгр}$, то алгоритм идет по отдельной ветви, в которой регистр K с максимальным кодом $N_{y\ max}$ за определенное количество тактов доходит до нулевого значения. Если текущий код N_y не равен коду разгрузки $N_{разгр}$, то в зависимости от знака направления вращения и направления динамического момента регистр K инкрементируется или декрементируется на текущее значение N_y . Алгоритм работы аккумулятора фазы заключается в изменении регистра аккумулятора фазы A_{sin} на величину текущего значения выходного кода аккумулятора частоты. Таким образом, в регистре A_{sin} хранится информация о фазе выходного синуса. При этом мгновенное значение фазы косинуса A_{cos} определяется программным сдвигом фазы синуса на 90 электрических градусов.

В цифровой системе управления УДМ, представленной на рисунке 4 применен «принцип сложения частот пилообразных сигналов» (4), который позволяет заменить 4 операции умножения и 2 сложения на 1 операцию сложения с отбрасыванием старшего бита результата, что позволяет упростить структуру электропривода.

$$QS(t, \tau_1, \tau_2) = Q\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \cdot \tau_2} t\right) \quad (4)$$

Эффект суммирования частот (4) является свойством аналоговых функций вида $Q\left(\frac{t}{\tau}\right)$, а проявление этого эффекта для оцифрованных функций вида $E_1\left(2^n \cdot Q\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)$ является лишь следствием из (4) для кусочно-постоянных функций и справедливо лишь с точностью дискретизации АЦП и может иметь соответствующие ошибки квантования и апертурные ошибки.

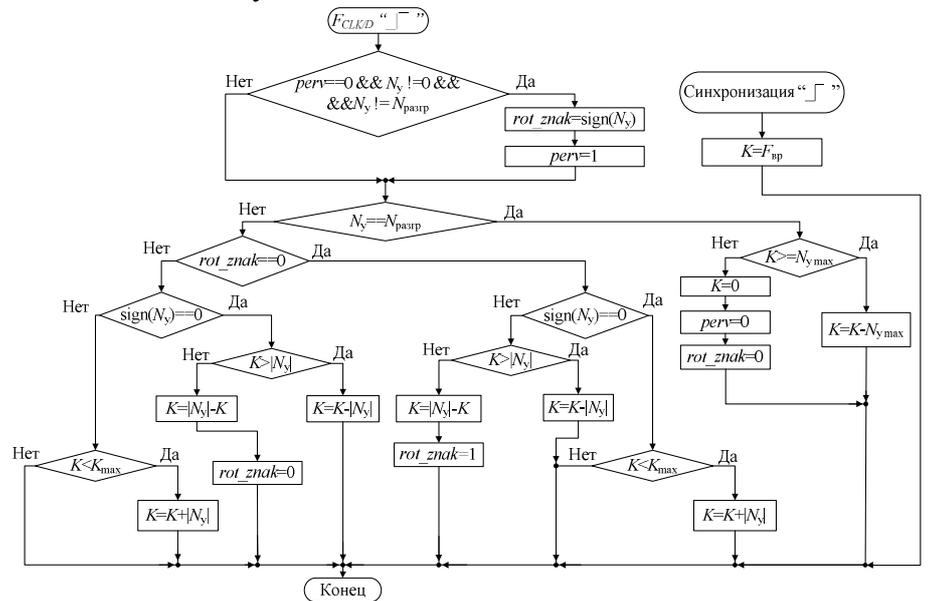


Рисунок 6 – Алгоритм функционирования аккумулятора частоты

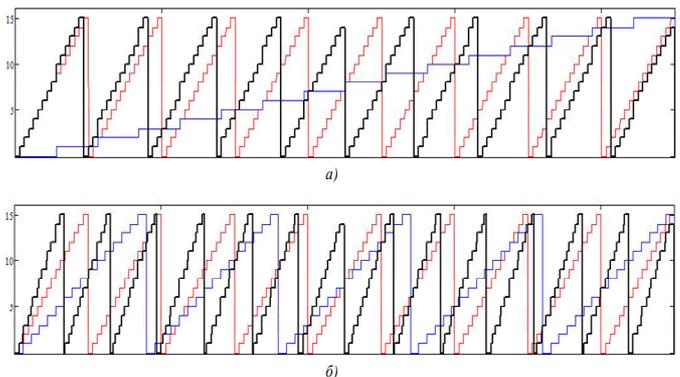


Рисунок 7 – Результаты цифрового суммирования пил с отбрасыванием старшего разряда

Во второй главе также приведены результаты оценочного моделирования работы СОиС КА в режиме стабилизации в условиях идеальных измерений углового положения и угловой скорости, приводится сравнение работы предлагаемого УДМ с классическими приборами. Результаты расчетов для СОиС при использовании УДМ с контуром фазовой синхронизации представлены на рис. 8. На рисунках 9 показаны аналогичные результаты для системы с УДМ, управляемым только по электромагнитному моменту. При этом в обоих вариантах рассмотрен случай прохождения нулевой угловой скорости ротора по каналу Z. Анализ результатов показывает, что для СОиС КА, в которой используется УДМ с управлением электромагнитным моментом, приходится примерно десятикратно увеличивать коэффициент усиления при интегральной составляющей сигнала в законе управления относительно системы, в которой используется УДМ с контуром фазовой синхронизации и ЭЦМ. Такое увеличение требуется для компенсации статической ошибки за время не более 100 с. При этом, как видно из графиков, время «залипания» ротора значительно выше, чем при использовании УДМ с новой системой управления. Вследствие этого всплеск по стабилизационным отклонениям оказывается примерно в пять раз больше. Кроме того, поскольку интегральная составляющая сигнала выше, увеличивается колебательность системы.

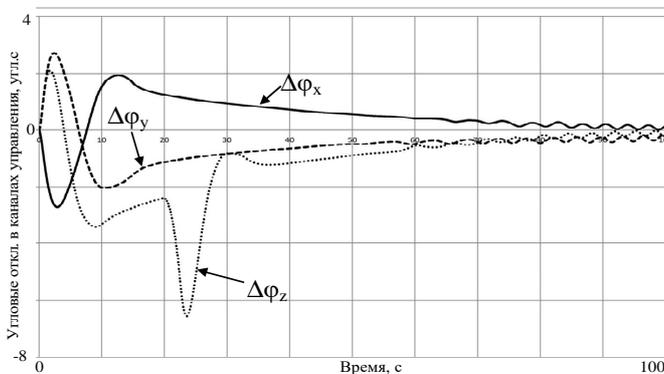


Рисунок 8 – Угловые отклонения КА в трёх каналах управления при использовании УДМ с контуром фазовой синхронизации

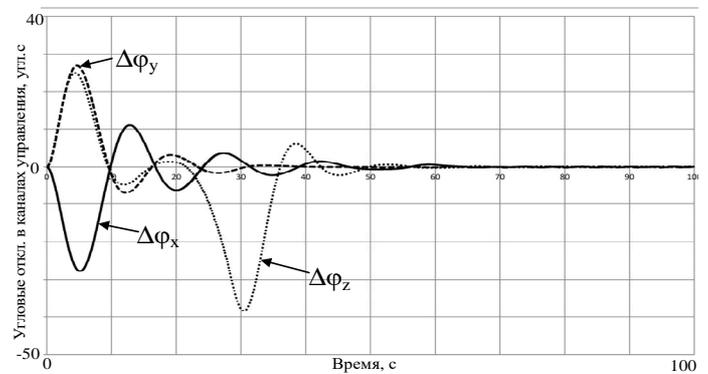


Рисунок 9 – Угловые отклонения КА в трёх каналах управления при использовании УДМ, управляемого по электромагнитному моменту

Система управления КА, использующая в своем составе УДМ с внутренней компенсацией момента сопротивления на основе контура фазовой синхронизации и ЭЦМ, обладает более высокими точностными и динамическими характеристиками по сравнению с СОиС, в которой используются классические УДМ. Следовательно, применение новых УДМ предпочтительнее для построения прецизионных СОиС КА, так как позволяет уменьшить «мертвую зону» по управлению, колебательность системы, а также стабилизационные отклонения углового положения, особенно в области околонулевых угловых скоростей УДМ.

В третьей главе описывается построение имитационных математических моделей отдельных структурных блоков, а также всего электропривода УДМ с новой системой управления в целом.

Математическая модель с учетом традиционных допущений, описывающая схему силовой цепи УДМ на основе двух мостовых инверторов и СДПМ (рис. 10), представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно токов соответствующих фаз двигателя и угловой скорости СДПМ:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{-R}{L}i_1 - \frac{1}{L}e_1 + \frac{E_0KF_1}{L}; \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{-R}{L}i_2 - \frac{1}{L}e_2 + \frac{E_0KF_2}{L}; \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{\Phi_\delta \sin \Theta}{J}i_1 + \frac{\Phi_\delta \cos \Theta}{J}i_2 - \frac{M_c}{J}, \end{cases} \quad (5)$$

где KF_1, KF_2 – коммутационные функции инверторов соответствующих фаз;

J – момент инерции двигателя; E_0 – напряжение питания инверторов; Φ_δ – магнитный поток ротора; R – полное сопротивление фазы двигателя; L – полная индуктивность фазы двигателя; M_c – момент сопротивления.

ЭДС обмоток двигателя e_1 , e_2 выражаются через частоту вращения и фазу ротора следующим образом:

$$e_1 = \Phi_\delta \Omega \sin \Theta; \quad e_2 = \Phi_\delta \Omega \cos \Theta. \quad (6)$$

На рисунке 10 представлена схема силовой цепи УДМ. В нее входят два регулятора тока РТ1, РТ2 на основе мостовых инверторов, замкнутых по току с помощью шунта R1, R2 и усилителя датчика тока УДТ. Блоки ШИМ генерируют требуемые импульсные последовательности на основе коммутационных функций для управления ключами VT1–VT4 с обратными диодами с целью формирования соответствующего напряжения, прикладываемого к нагрузке. Силовые ключи управляются от драйверов ДР1, ДР2. Регуляторы токов формируют квазисинусоидальные токи в соответствии с сигналами ДПР в фазах двигателя амплитудой I_3 , устойчивость обеспечивается с помощью корректирующих устройств КУ.

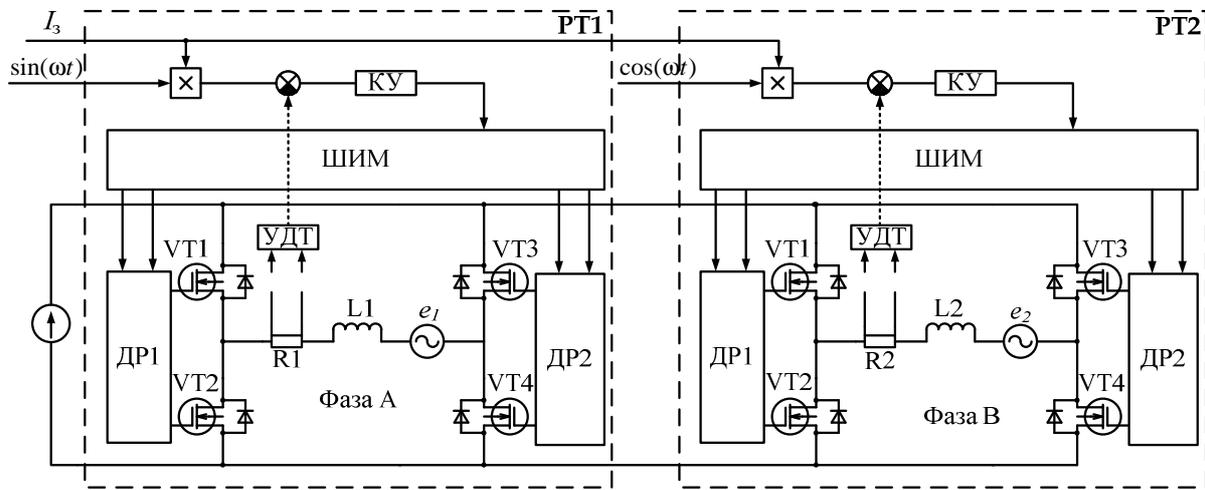


Рисунок 10 – Схема силовой цепи двухфазного УДМ

Математическая модель коммутационных функций с широтно-импульсной однополярной реверсивной модуляцией (ШИМ типа ОРМ) для каждого из ключей в стойках мостовых инверторов формируется как сигнум-функция разностного уравнения сигнала ошибки по току и уравнения развертки:

$$\begin{aligned} KF_{A1}(t) &= \frac{1}{2} [\text{sign}(\xi_{AP1}(t)) + 1]; & KF_{B1}(t) &= \frac{1}{2} [\text{sign}(\xi_{BP1}(t)) + 1]; \\ KF_{A2}(t) &= 1 - KF_{A1}(t); & KF_{B2}(t) &= 1 - KF_{B1}(t); \\ KF_{A3}(t) &= \frac{1}{2} [\text{sign}(-\xi_{AP2}(t)) + 1]; & KF_{B3}(t) &= \frac{1}{2} [\text{sign}(-\xi_{BP2}(t)) + 1]; \\ KF_{A4}(t) &= 1 - KF_{A3}(t); & KF_{B4}(t) &= 1 - KF_{B3}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $KF_{Ai}(t)$ – коммутационная функция i -го ключа фазы A , $KF_{Bi}(t)$ – коммутационная функция i -го ключа фазы B , $\xi_{AP1}(t)$, $\xi_{AP2}(t)$ – разностное уравнение ШИМ фазы A , $\xi_{BP1}(t)$, $\xi_{BP2}(t)$ – разностное уравнение ШИМ фазы B , причем

$$\begin{aligned} \xi_{AP1}(t) &= U_{3A}(t) - U_{P1}(t); & \xi_{BP1}(t) &= U_{3B}(t) - U_{P1}(t); \\ \xi_{AP2}(t) &= U_{3A}(t) - U_{P2}(t); & \xi_{BP2}(t) &= U_{3B}(t) - U_{P2}(t); \end{aligned} \quad (8)$$

в которых задающие напряжения фаз A и B

$$U_{3A}(t) = U_{\text{он}} \cdot \sin(\omega t); \quad U_{3B}(t) = U_{\text{он}} \cdot \cos(\omega t), \quad (9)$$

а двуполярные пилообразные развертывающие напряжения ШИМ, которые наиболее просты в реализации цифровыми вычислительными устройствами, а также имеют минимальные значения пульсаций модулированного сигнала, идентичные по уровню варианту с треугольными двуполярными развертывающими напряжениями, представлены следующими соотношениями

$$\begin{aligned}
 U_{P1}(t) &= 2 \cdot U_{\text{он}} \left(\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right) - U_{\text{он}}; & U_{P1}(t) &= U_{\text{он}} - \left[2 \cdot U_{\text{он}} \left(\frac{t+\beta}{a} - E_1 \left(\frac{t+\beta}{a} \right) \right) \right]; \\
 U_{P2}(t) &= U_{\text{он}} - \left[2 \cdot U_{\text{он}} \left(\frac{t}{a} - E_1 \left(\frac{t}{a} \right) \right) \right]; & U_{P2}(t) &= U_{\text{он}} - \left[2 \cdot U_{\text{он}} \left(\frac{t+\beta}{a} - E_1 \left(\frac{t+\beta}{a} \right) \right) \right];
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

здесь $E_1\left(\frac{t}{a}\right)$, $E_1\left(\frac{t+\beta}{a}\right)$ – целочисленные функции Антье, а $\frac{t}{a} - E_1\left(\frac{t}{a}\right)$, $\frac{t+\beta}{a} - E_1\left(\frac{t+\beta}{a}\right)$ – функции дробных частей; a – период развертывающих напряжений, с; β – угол сдвига между развертывающими напряжениями инверторов фаз A B (может быть равен 0, при $\beta = \frac{a}{2}$ достигается наименьший уровень пульсаций электромагнитного момента), эл. град; $U_{\text{он}}$ – амплитуда развертывающего напряжения, В; ω – частота гармонического напряжения, приложенного к фазе двигателя, рад/с.

Таким образом, коммутационные функции диагоналей мостовых инверторов

$$\begin{aligned}
 KF_{A1\&A4}(t) &= \begin{cases} 1 & \text{при } KF_{A1}(t) = KF_{A4}(t) = 1; \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases} & KF_{B1\&B4}(t) &= \begin{cases} 1 & \text{при } KF_{B1}(t) = KF_{B4}(t) = 1; \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases} \\
 KF_{A2\&A3}(t) &= \begin{cases} 1 & \text{при } KF_{A2}(t) = KF_{A3}(t) = 1; \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases} & KF_{B2\&B3}(t) &= \begin{cases} 1 & \text{при } KF_{B2}(t) = KF_{B3}(t) = 1; \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Следовательно, напряжения, прикладываемые к фазам двигателя A и B , определяются разностью соответствующих коммутационных функций

$$U_A(t) = U_{\text{п}} \cdot (KF_{A1\&A4}(t) - KF_{A2\&A3}(t)); \quad U_B(t) = U_{\text{п}} \cdot (KF_{B1\&B4}(t) - KF_{B2\&B3}(t)),
 \tag{12}$$

где $U_{\text{п}}$ – постоянное напряжение бортовой сети электропитания.

На основе математического аппарата, предложенного Шрейнером Р.Т., реализован блок формирования момента нагрузки, характерного для УДМ. Причем впервые внесено уточнение в уже известный математический аппарат в части дополнения характера изменения момента трогания по экспоненциальному закону при «залипании» и после начала движения ротора электродвигателя. Наглядные отличия характера результирующего момента сопротивления без уточнения и с ним прослеживаются на рисунках 11, 12.

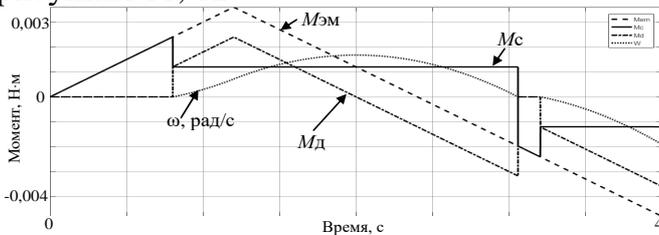


Рисунок 11 – Временные диаграммы функционирования блока «Мс» при линейном изменении $M_{ЭМ}$ без уточнения характера момента трогания

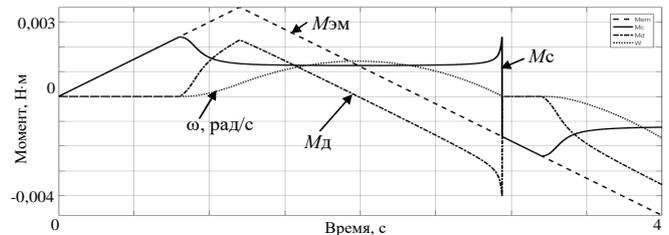


Рисунок 12 – Временные диаграммы функционирования блока «Мс» с уточнением характера момента трогания

Дополненная математическая модель вычисления нагрузки на валу двигателя описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 M_c &= \begin{cases} M_a + M_p \operatorname{sign} \Omega & \text{при } \Omega \neq 0; \\ f(M, M_{\text{тр}}) & \text{при } \Omega = 0; \end{cases} \\
 f(M, M_{\text{тр}}) &= \begin{cases} M & \text{при } |M - M_a| \leq M_{\text{тр}}; \\ M_a + M_{\text{тр}} \operatorname{sign}(M - M_a) & \text{при } |M - M_a| > M_{\text{тр}}; \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где M_a – активный момент статического сопротивления механизма; M_p – модуль реактивного момента статического сопротивления, возникающего при движении механизма; $M_{\text{тр}}$ – модуль реактивного момента статического сопротивления при трогании механизма; Ω – частота вращения вала двигателя; M – электромагнитный момент

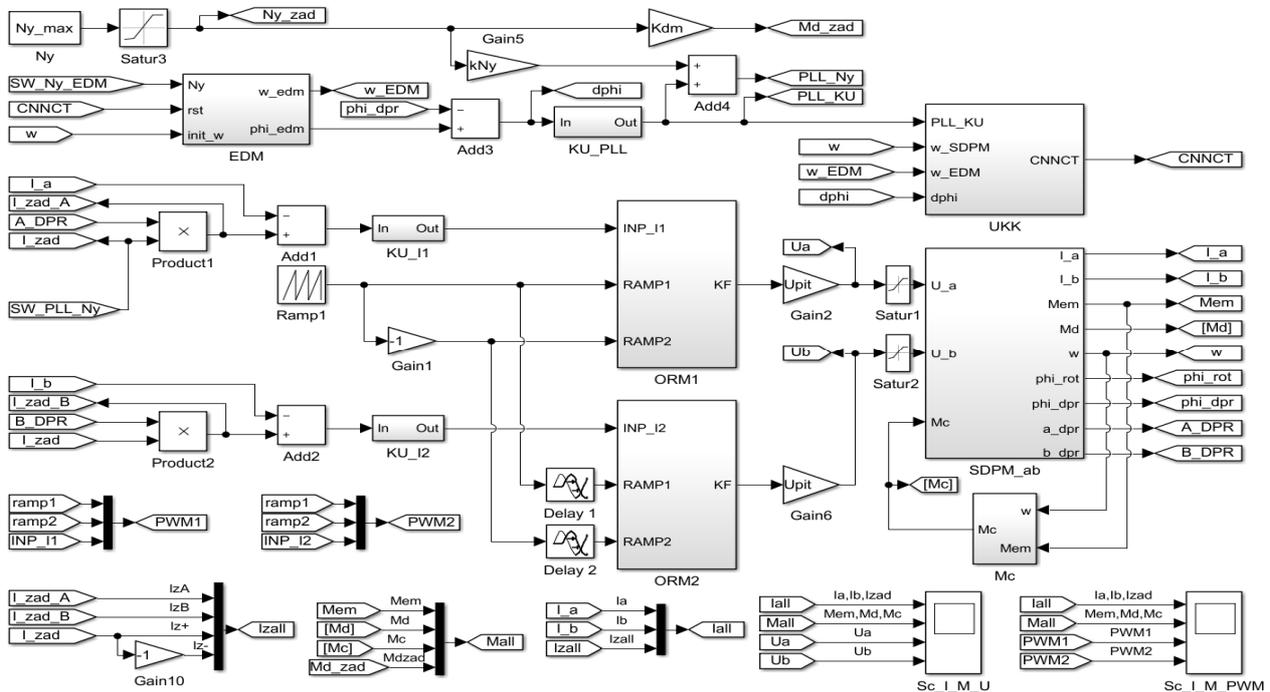
двигателя; M_c – результирующий момент статического сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя.

Для учета сухого и вязкого трения, а также особенностей нагрузки различных механизмов, целесообразно представление модуля реактивной составляющей момента их статического сопротивления, как комбинации постоянной составляющей, линейной, квадратичной, кубической и специальной функции частоты вращения ротора:

$$M_p = M_0 + A_1 \cdot |\Omega| + A_2 \cdot \Omega^2 + A_3 \cdot |\Omega^3| + (M_{тр} - M_0) \frac{e^{(k \cdot \Omega + 1)^{-1}} - 1}{e - 1} |\Omega|, \quad (14)$$

где M_0 – постоянная составляющая модуля реактивного момента; A_1, A_2, A_3 – весовые коэффициенты переменных составляющих модуля реактивного момента сопротивления механизма; k – экспериментальный коэффициент, определяющий скорость спада/нарастания момента трогания.

Полная структура имитационной математической модели УДМ (рис. 13) с новой системой управления синтезирована в приложении Simulink пакета Matlab R2016b на основе выкладок и структурных звеньев, детально описанных в третьей главе. Имитационная математическая модель УДМ путем многочисленных вычислений с применением метода последовательного перебора коэффициентов, параметров и пределов была отлажена и настроена для отображения характеристик, наиболее полно отражающих режимы работы реальных приборов ДМ2. Приводятся результаты моделирования, целью которых является подтверждение возможности согласованного управления требуемыми режимами работы предложенной системы управления динамическим моментом УДМ в основных (штатных) и нештатных ситуациях. В частности приводятся результаты моделирования в режимах начальной синхронизации, в режимах разгона и торможения, при трогании из неподвижного состояния, при разгрузке, насыщении УДМ, а также сопоставлены теоретические и экспериментальные исследования.



Ny – константа, задающая код управления «Constant»; Satur1...3 – блоки ограничения амплитуды «Saturation»; EDM – подсистема имитационной модели ЭЦМ; Add1...4 – блок сумматора «Adder»; Gain1, 2, 5, 6, 10, 11 – блоки усилителей «Gain»; KU_PLL – подсистема имитационной модели корректирующего устройства для контуров фазовой синхронизации; UKK – подсистема имитационной модели устройства коммутации контуров; Ramp1 – генератор пилообразного разветвляющего напряжения «Repeating Sequence»; Product1, Product2 – блоки умножения «Product»; KU_I1, KU_I2 – подсистемы корректирующих устройств контуров регулирования тока; ORM1, ORM2 – подсистемы имитационных моделей блоков ШИМ типа OPM; Delay1, Delay2 – блоки фазового сдвига между разветвляющими напряжениями инверторов «Transport Delay»; SDPM_ab – подсистема имитационной модели синхронного двухфазного двигателя с постоянными магнитами; Mc – подсистема имитационной модели момента сопротивления УДМ; символом \blacktriangleright U_{a_emf} представлены элементы «Goto» и «From» с соответствующими тэгами внутри символов, упрощающие трассировку и визуализацию цепей сигналов

Рисунок 13 – Полная структура имитационной модели УДМ

На рисунке 14 представлены результаты моделирования работы прибора ДМ2 с номинальными моментами ± 50 мН·м при начальной синхронизации с частотой вращения маховика (480 рад/с). Начальная синхронизация осуществляется за время в пределах одной секунды ($\sim 0,8$ с, что соответствует аналогичному процессу на рисунке 24 для прибора ДМ2), после чего замыкается основной контур управления и система управления путем регулирования тока в фазах двигателя компенсирует текущий момент сопротивления для стабилизации динамического момента на нулевом уровне. Установление динамического момента имеет вид апериодического переходного процесса второго порядка. Перерегулирование находится в пределах 30%. Время переходного процесса не превышает 0,5 с, постоянная времени эквивалентного апериодического звена не более 170 мс. С 3-ей по 10 секунду и с 17-ой по 20 секунду обрабатывает номинальный динамический момент 50 мН·м. С 10-ой по 17-ю секунду формирует номинальный динамический момент -50 мН·м, рекуперировав энергию в сеть за счет генераторного режима при торможении, что видно по превышению тока в фазах двигателя над сигналом задания по току.

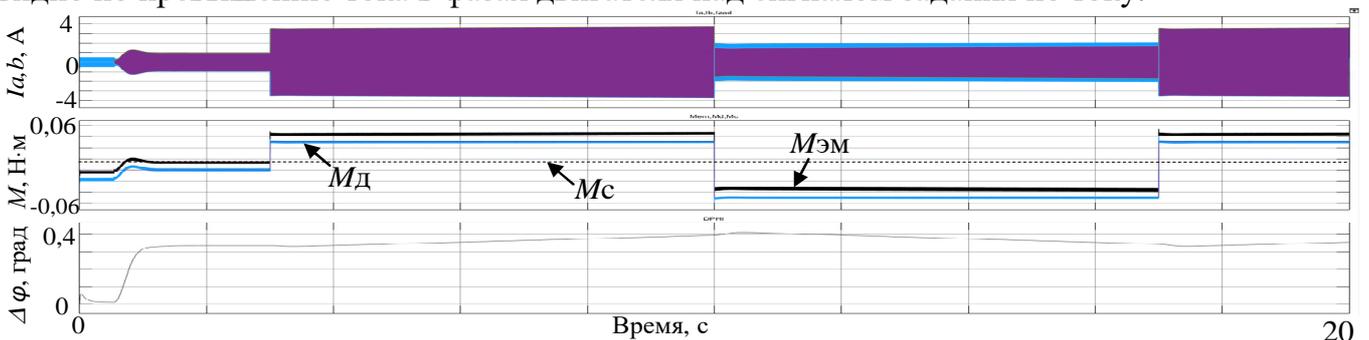


Рисунок 14 – Результаты моделирования работы прибора с моментами ± 50 мН·м при начальной синхронизации с частотой вращения маховика (480 рад/с) при штатной конфигурации системы (с основным сигналом задания по току)

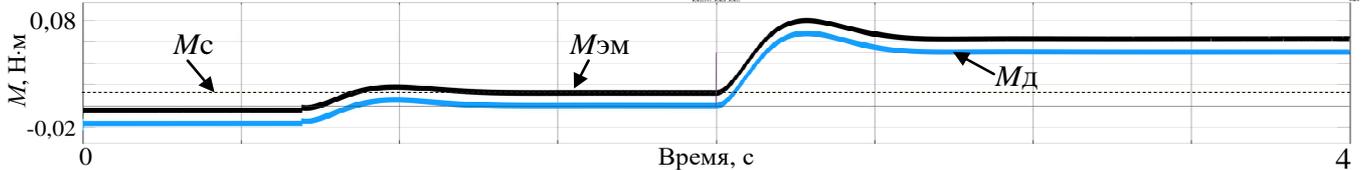


Рисунок 15 – Результаты моделирования работы прибора при начальной синхронизации с частотой вращения маховика (480 рад/с) и последующим формированием $M_{д}=50$ мН·м при работе только контура фазовой синхронизации

На рисунке 15 более детально представлена динамика начальной синхронизации с последующим формированием номинального динамического момента 50 мН·м при отключенном безинерционном управлении, т. е. только за счет контура фазовой синхронизации без основного сигнала задания по току. Установление динамического момента имеет вид апериодического переходного процесса второго порядка. Перерегулирование находится в пределах 30%. Время переходного процесса не превышает 0,5 с, постоянная времени эквивалентного апериодического звена не более 170 мс, что соответствует аналогичным характеристикам реального прибора ДМ2 и повторяет форму осциллограммы, представленной на рисунке 22 с точностью до 5 %.

На рисунке 16 приведены полный цикл разгонов и торможений с номинальными динамическими моментами ± 50 мН·м во всем диапазоне рабочих частот вращения маховика. Время разгона от 0 до 2 Н·м·с при номинальном динамическом моменте составляет 40 с. Момент сопротивления компенсируется системой управления во всем рабочем диапазоне, позволяя добиться линейности характеристики динамического момента. При переходе через нулевую частоту вращения имеется всплеск динамического момента, обусловленный прохождением точки сингулярности, вызванной действием момента трогания. Максимальная потребляемая от 16 В источника мощность составляет 40 Вт, рекуперированная мощность достигает величины 11 Вт (доступна для дальнейшего

использования в бортовой питающей сети). Данные цифры соответствуют реальной мощности ДМ2 с точностью не хуже 5 %.

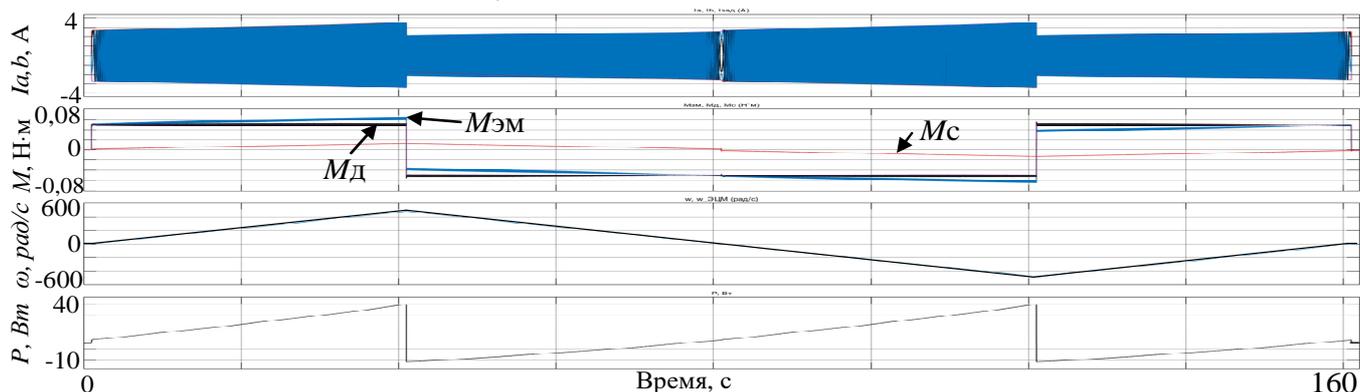


Рисунок 16 – Результаты моделирования работы прибора при разгоне и торможении с номинальными моментами

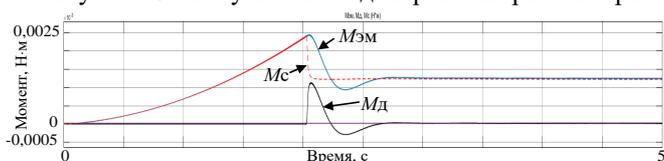


Рисунок 17 – Результаты моделирования работы прибора при трогании из неподвижного положения $Nu=1$ ($M_Д=2,5 \cdot 10^{-5}$ Н·м)

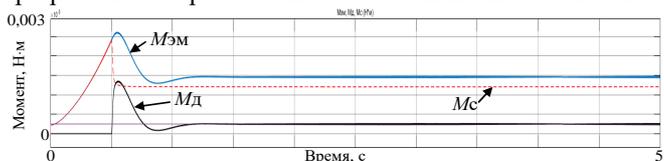


Рисунок 18 – Результаты моделирования работы прибора при трогании из неподвижного положения $Nu=10$ ($M_Д=2,5 \cdot 10^{-4}$ Н·м)

На рисунках 17, 18 приведены временные диаграммы трогания маховика из неподвижного состояния при малых кодах управления ($M_{тр}=2,4$ мН·м выбран для моделирования как худший случай, на практике обычно значительно ниже). Полученные диаграммы позволяют исследовать характер поведения прибора с новой системой управления в области нулевой частоты вращения, что в реальных условиях с настоящим прибором сделать практически невозможно ввиду отсутствия на текущее время измерителей столь малых динамических моментов (порядок $2,5 \cdot 10^{-5}$ Н·м). Исходя из этих диаграмм можно сделать вывод, что система преодолевает момент трогания с динамикой контура фазовой синхронизации, причем время начала движения обратно пропорционально заданному малому коду управления и в худшем случае составляет не более 2,5 с. Примечательно, что по интегральному значению за время действия кода управления формируемый момент имеет требуемое значение, т.е. к корпусу КА в итоге прикладывается заданный управляющий момент без необходимости компенсации сингулярности моментной характеристики УДМ в бортовой системе управления движением КА за счет использования обратных связей от акселерометров и звездных датчиков.

Динамика работы контуров фазовой синхронизации, как и различные режимы работы УДМ в целом соответствует тем же параметрам реального электропривода ДМ2 с точностью не хуже 5%, что подтверждает адекватность разработанной модели. Упрощенный частотный анализ новой системы управления УДМ подтверждает ее устойчивость и удовлетворяет требования по частотным характеристикам. Впервые синтезированная математическая модель трехконтурной системы управления УДМ является удобным и гибким средством отладки и анализа уже существующих и вновь разрабатываемых приборов.

В четвертой главе приведены результаты практической реализации устройства управления динамическим моментом УДМ. Также приводится сравнение осциллограмм, зафиксированных в реальном приборе и соответствующие диаграммы, полученные при построении имитационной модели (разгон, торможение, остановка, реверс).

Достигнутые значения погрешности ускорения и частоты выходного сигнала ЭЦМ не превышают 0,1 % и зависят лишь от аппаратных ограничений и могут изменяться в зависимости от разрядности аккумулятора фазы и соотношения тактовых частот

внутренних интеграторов ЭЦМ.

Цифровые 12-разрядные коды реального угла, полученного по CORDIC и эталонного угла, выдаваемого ЭЦМ проходят операцию сложения с кодами опорной 12-разрядной пилы. При этом старший бит результата отбрасывается и получаются две пилы, частоты и фазы которых можно сравнивать с помощью ИЧФД. С помощью цифрового осциллографа были зафиксированы осциллограммы выходных сигналов ЦАПов и входы-выходы ИЧФД (рисунок 20). Полученные осциллограммы подтверждают корректность функционирования алгоритма сложения частот пилообразных напряжений.

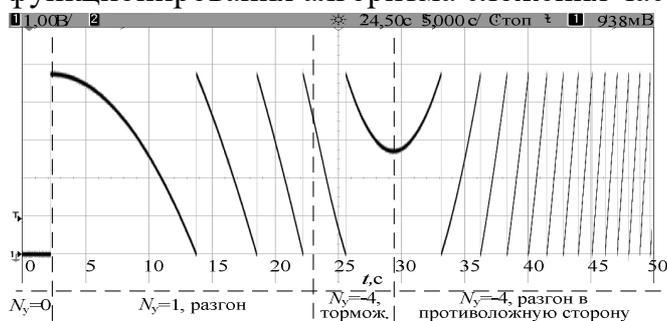


Рисунок 19 – Осциллограммы работы ЭЦМ

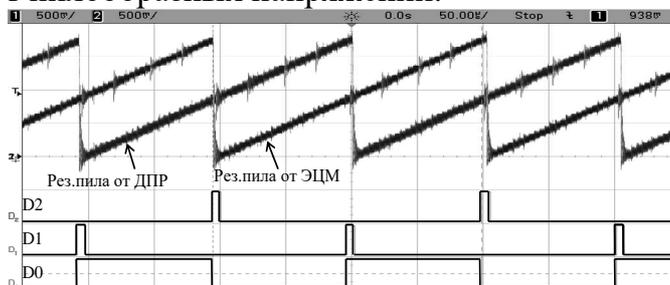


Рисунок 20 – Осциллограммы ИЧФД входы (D1, D2), выход (D0) ИЧФД при $\gamma=50,1\%$

На основе результатов моделирования и реальных осциллограмм (рис. 21) работы прибора также можно сделать вывод о том, что постоянная времени регулятора динамического момента (РДМ) при максимальном изменении кода управления определяется скоростью нарастания тока в фазах. В момент изменения кода управления необходимая величина компенсации момента сопротивления уже установлена внешним контуром. Измеренное значение постоянной времени РТ составляет не более 400 мкс, что соответствует результатам моделирования. На основе диаграмм (рисунки 21, 22) можно сделать вывод, что сигнал суммарного тока в фазах имеет пульсации, период которых совпадает с периодом сигналов ДПР.

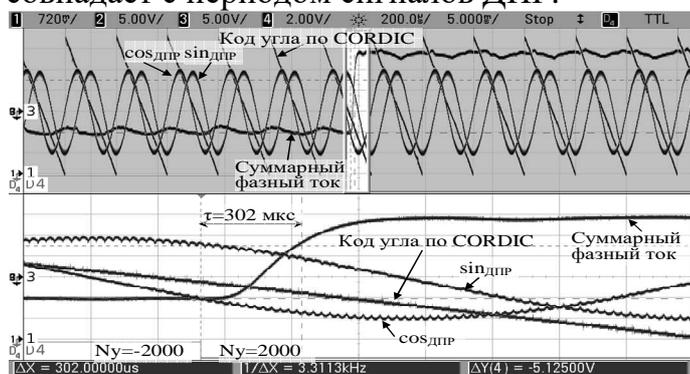


Рисунок 21 – Переключение кода управления от $N_y=-2000$ к $N_y=2000$, $\omega \approx 5000$ об/мин

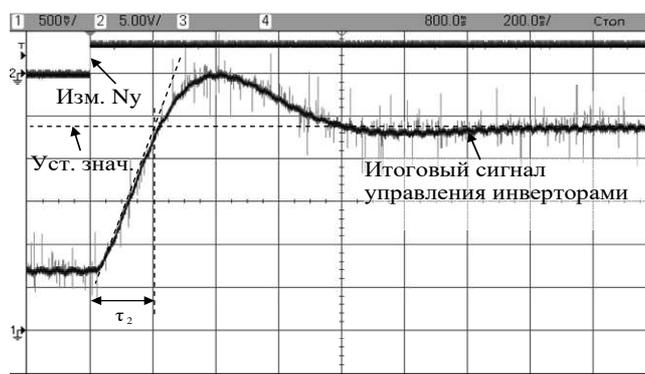


Рисунок 22 – Динамика РДМ при работе только контура фазовой синхронизации

Пульсации сигналов тока не влияют на форму выходных сигналов ДПР и кода угла; следовательно, ток в фазах двигателя отрабатывает нелинейности всей системы в целом (двигателя, ДПР, РТ). Динамика регуляторов тока определяется параметрами сопротивления и индуктивности фазы, паразитными параметрами схемы и частотой переключения ключей. В худшем случае (рис. 23) перерегулирование может достигать величины 50 %, время переходного процесса 400-600 мкс при колебательном характере переходного процесса. Время начальной синхронизации составляет от 0,6 до 1,1 с (рис. 24) и определяется временем установления питания ядра и периферии ПЛИС, временем конфигурирования ПЛИС, временем грубого подсчета текущей частоты вращения маховика и динамикой контура начальной синхронизации.

При начальном неподвижном состоянии маховика подавались коды управления $N_{\gamma}=\pm 1$ (25 мкНм, рис. 25), $N_{\gamma}=\pm 1$ (250 мкНм, рис. 26), что соответствует диаграммам 17, 18, полученным при моделировании. Зафиксировать время «залипания» ротора при столь

малом ускорении не представляется возможным, УДМ практически сразу после подачи кода управления начинает обрабатывать требуемое мгновенное угловое положение, компенсируя нелинейности и мертвые зоны электропривода. Следует считать результаты моделирования адекватными и отображающими худший случай, рекомендуется ориентироваться при проектировании СОиС КА именно на них.

Приведены результаты экспериментальных исследований прецизионного формирователя сигнала кинетического момента, который вместе с формирователем кода угла позволяет на порядок увеличить точность и на два порядка уменьшить время вычисления кода кинетического момента.

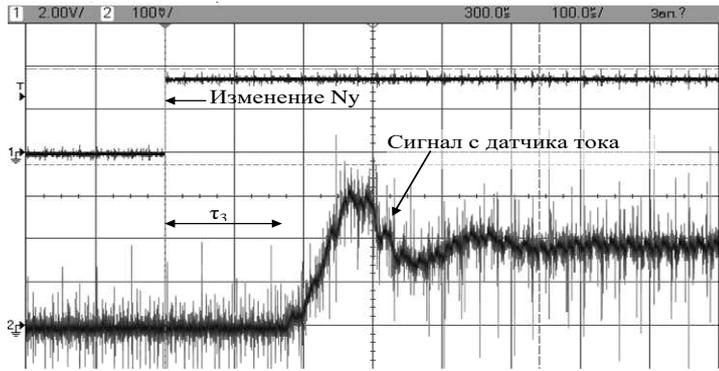


Рисунок 23 – Динамика регулятора тока в худшем случае

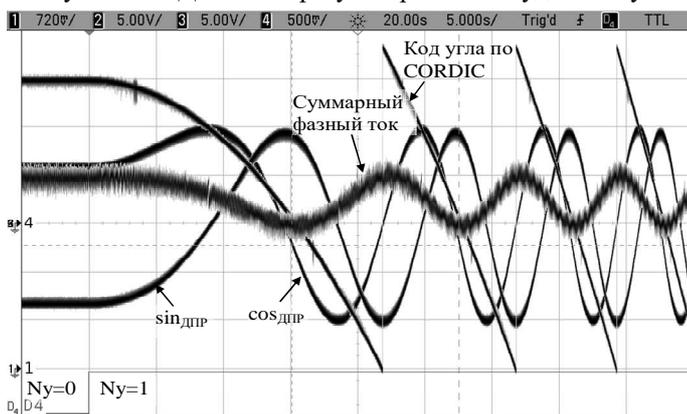


Рисунок 25 – Трогание маховика при $N_y=1$



Рисунок 24 – Динамика начальной синхронизации при включении питания УДМ

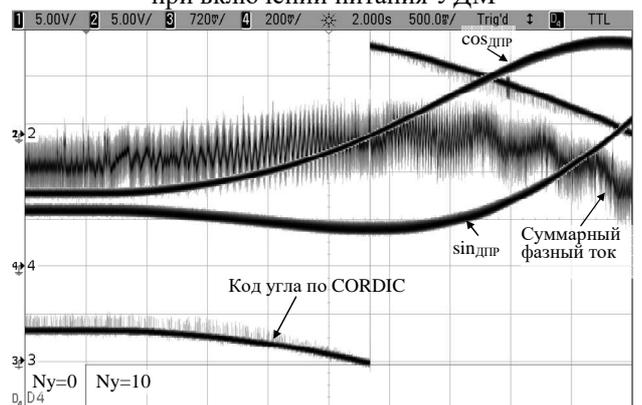


Рисунок 26 – Трогание маховика при $N_y = 10$

Проведенное макетирование (рис. 27) и лабораторные исследования на экспериментальных и опытных образцах приборов (рис. 28) с новой системой управления динамическим моментом показали следующее: регулировочная характеристика УДМ имеет линейный характер, а разрешающая способность прибора K_y (цена единицы младшего разряда кода N_y) составляет 0,000025 Н·м/ед. (для двигателя с кинетическим моментом 2 Н·м·с и динамическим моментом 0,05 Н·м); расчетная погрешность крутизны регулировочной характеристики УДМ по результатам испытаний составила не более 0,5 %; достигнутые значения погрешности ускорения и частоты выходного сигнала эталонной цифровой модели УДМ не превышают 0,01 % и зависят лишь от аппаратных ограничений; при трогании маховика с малым моментом имеется задержка, которая зависит от внутренних параметров системы (в том числе от момента трогания, точности датчика положения ротора, линейности электромагнитного момента, уровня задающего воздействия и параметров корректирующих устройств); время переходного процесса реализации заданного управляющего момента составляет не более 0,4 мс во всем диапазоне управляющих и кинетических моментов за исключением режима трогания; погрешность крутизны передаточной характеристики кода кинетического момента не превышает 0,2 %, а относительная погрешность – 0,05 % при соответствующем фильтре в диапазоне частот вращения двигателя от 0 до 6000 об/мин; потребляемая мощность не более 0,4 Вт; масса модуля РДМ не более 120 г.

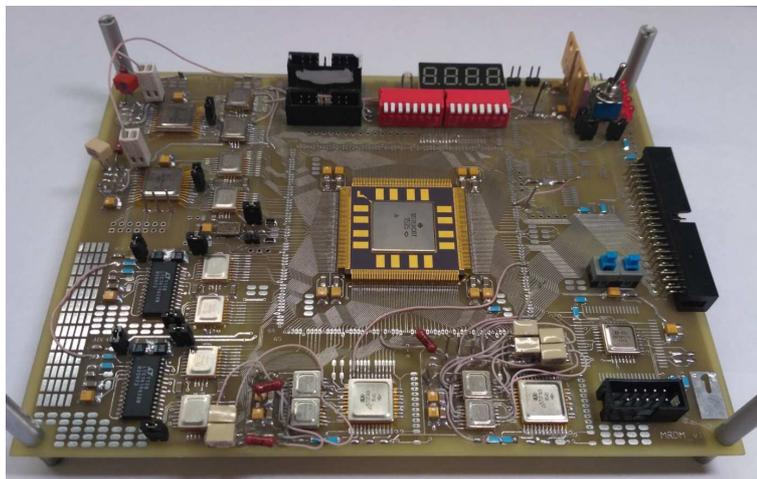


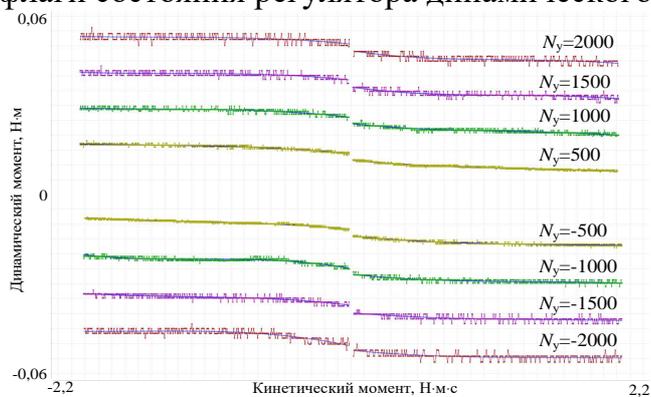
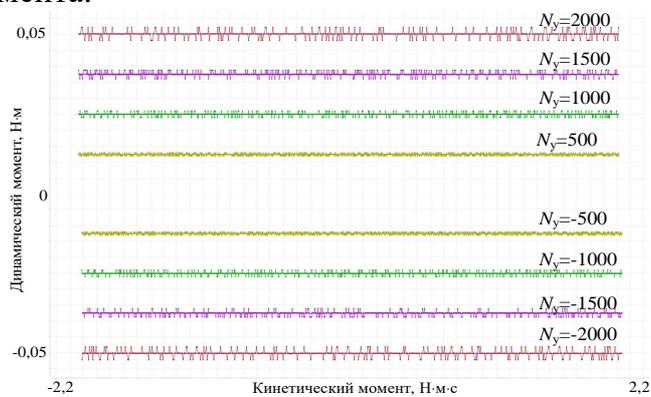
Рисунок 27 – Фото макета РДМ



Рисунок 28 – Прибор ДМ2 на технологическом кронштейне

Для наглядности приведены реальные моментно-скоростные характеристики (МСХ) одного из приборов ДМ2 в режимах управления по электромагнитному и по динамическому моментам в худшем случае при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в вакууме (рис. 29, 30). Также следует отметить, что во всех климатических условиях обеспечивается линейность характеристик УДМ при управлении по динамическому моменту.

Наличие РДМ в структуре электропривода позволяет передавать по интерфейсной линии следующие дополнительные информационные данные о состоянии УДМ: коды заданного и реального угловых положений ротора УДМ; код эталонной частоты (мгновенное значение кода заданной частоты вращения УДМ); код счетчика выхода прибора из синхронизации с эталонной цифровой моделью; заданный обрабатываемый код управления прибором и мгновенный код управления инверторами; сигнал насыщения УДМ; флаги состояния регулятора динамического момента.

Рисунок 29 – МСХ ДМ2 в вакууме при $t=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, управление по электромагнитному моменту.Рисунок 30 – МСХ ДМ2 в вакууме при $t=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, управление по динамическому моменту

Также РДМ позволяет реализовать следующие функциональные возможности: управление по электромагнитному, динамическому, кинетическому моментам, а также стабилизация углового положения ротора; ограничение частоты вращения при насыщении; разгрузка по команде с заданным динамическим моментом; верификация конфигурационной памяти статического оперативного запоминающего устройства программируемой логической интегральной схемы; возможность изменения соответствия между знаком кода управления и направлением реализуемого управляющего момента с соответствующим изменением знака кинетического момента (смена фазировки).

Адекватность синтезированной во второй главе имитационной математической модели подтверждена результатами экспериментальных исследований. Внедрение модуля регулятора динамического момента в разрабатываемые двигатели-маховики обеспечивает высокие точностные и динамические характеристики как управляющего момента, так и кодового сигнала кинетического момента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача, заключающаяся в повышении точности управления динамическим моментом двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата.

Основные результаты и выводы диссертационно работы:

1. Предложен способ и устройство для реализации управления динамическим моментом УДМ, которые позволяют обеспечить линейную форму моментно-скоростных и стабильность крутизны моментно-регулирующих характеристик УДМ, то есть получить пропорциональную зависимость динамического момента от сигнала задания во всем диапазоне изменения кинетического момента и тем самым компенсировать влияние момента сопротивления на процесс ориентации и стабилизации КА.

2. Впервые создана трехконтурная имитационная модель электропривода УДМ, которая отражает электромеханические процессы, протекающие в системе управления двигателя-маховика по динамическому моменту (ускорению).

3. Предложен способ сложения частот пилообразных сигналов, который позволяет перейти от операций с тригонометрическими функциями (4 умножения, 2 сложения) к суммированию пилообразных функций и реализовать этот процесс аппаратно-программными средствами, упростив при этом структуру системы управления.

4. Разработаны алгоритмы работы эталонной цифровой модели УДМ и алгоритмы синхронизации ее параметров с реальными выходными координатами двигателя.

5. Электропривод УДМ с новой системой управления позволяет уменьшить шаг задания динамического момента с 0,1 мН·м до 0,025 мН·м (и менее) и уменьшить погрешность с 10-20 % до 0,5 %, а также точность измерения кинетического момента с 3 % до 0,2 % при увеличении разрядности и уменьшении интервала измерения, что подтверждается экспериментальными исследованиями и актами внедрения.

6. Электропривод УДМ с новой системой управления позволяет повысить точности СОиС за счет исключения мертвых зон трогания УДМ, компенсации возмущающих моментов без участия управления СОиС при снижении динамических отклонений стабилизации КА.

7. Все перечисленное выше позволило создать основу для проектирования прецизионных систем управления динамическим, кинетическим моментами СДПМ с возможностью угловой стабилизации.

8. Изготовлены экспериментальные и опытные образцы приборов, проведены предьявительские, приемо-сдаточные, лабораторно-отрабочные, предварительные испытания и испытания на ЭМС с положительными результатами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Балковой, Н.Н. Эталонная цифровая модель управляющего двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата / Н.Н. Балковой, Г.Я. Михальченко // Доклады ТУСУР. – 2014. – №3(33) – С. 161–167.

2. Балковой, Н.Н. Цифровой астатический электропривод систем ориентации и стабилизации космических аппаратов / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург, Г.Я. Михальченко // Докл. Том. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2014. – № 3 (33). – С. 168–175.

3. Балковой, Н.Н. Анализ особенностей применения двигателей-маховиков с компенсацией собственных помеховых моментов / Н.Н. Балковой // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т.25. №3 – С. 203 – 210.

4. Поляков, М.В. Современное состояние и перспективы развития управляющих двигателей-маховиков / М.В. Поляков, А.С. Дмитриенко, О.Ю. Завьялова, В.П. Лянзбург, Г.Н. Гладышев, Н.Н. Балковой // Доклады ТУСУР. – 2018. – №3(21) – С. 109–114.

Объекты интеллектуальной собственности:

5. Пат. 2521617 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/28. Способ управления динамическим моментом двигателя-маховика / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин; патентообладатель ОАО "НПЦ "Полус"; опубл. 10.07.2014.

6. Пат. 2609673 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 6/08. Способ регулирования частоты вращения электродвигателя / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург; патентообладатель АО "НПЦ "Полус"; опубл. 02.02.2017.

Научные публикации в других изданиях:

7. Балковой Н.Н. Перспективы применения программируемых логических интегральных схем в электромеханических исполнительных органах. / Н.Н. Балковой, А.Н. Плеснивый, И.Ф. Сабинин // Электронные и электромеханические системы и устройства: Тез. докл. XVIII науч.-техн. конф. (22-23 апр. 2010 г., г. Томск) ОАО "НПЦ "Полус". - Томск: ООО "Печатная мануфактура", 2010. – С. 216–218.

8. Балковой Н.Н. Цифровая модель управляющего двигателя-маховика // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 275–280.

9. Балковой Н.Н. Устройство управления динамическим моментом двигателя-маховика на основе привода с частотно-фазовой синхронизацией / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 280-284.

10. Балковой Н.Н. Эталонная цифровая модель двигателя-маховика // «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники»: сборник материалов молодежной конференции. – Звездный городок, 2012. – С. 180–185.

11. Балковой Н.Н. Управление динамическим моментом двигателя-маховика / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург // Решетневские чтения: материалы XVI Междунар. науч. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева (7-9 ноября 2012, г. Красноярск): в 2-х ч. Под общ. ред. Ю.Ю. Логинова, Сиб. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2012. – Ч. 1. – С. 140–141.

12. Балковой Н.Н. Астатические системы электроприводов систем ориентации и стабилизации космических аппаратов / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург. // Электронные и электромеханические системы и устройства: Тезисы докл. науч.-тех. конф. молодых специалистов (Томск, 14-15 февраля 2013 г.). ОАО «НПЦ «Полус». – Томск, 2013. – С. 142–144.

13. Балковой Н.Н. Цифровой электропривод систем ориентации и стабилизации космических аппаратов / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург // Электронные и электромеханические системы и устройства: XIX науч.-тех. конф., тезисы докл. (Томск, 16-17 апреля 2015). АО «НПЦ «Полус». – Томск, 2015. – С. 156–158.

14. Лянзбург В.П. / Управление двигателем-маховиком по угловой скорости в системах ориентации и стабилизации космических аппаратов / В.П. Лянзбург, Н.Н. Балковой // Электронные и электромеханические системы и устройства: XIX науч.-тех. конф., тезисы докл. (Томск, 16-17 апреля 2015). АО «НПЦ «Полус». – Томск, 2015. – С. 168–170.

15. Балковой Н.Н. Интеллектуальный двигатель-маховик с управлением по динамическому моменту / Н.Н. Балковой, А.Н. Бутаков, С.Ю. Филонова, В.П. Лянзбург // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12-13 апр. 2018 г.). – 2018. – С. 137–140.

16. Балковой Н.Н. Реализация алгоритма CORDIC для определения углового положения вала двигателя в базе отечественной ПЛИС // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12-13 апр. 2018 г.). – 2018. С. 146–149.

17. Балковой Н.Н. Прецизионный цифровой формирователь сигнала кинетического момента двигателя-маховика // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12-13 апр. 2018 г.). – 2018. – С. 149–153.

18. Балковой Н.Н. Модуль прецизионного цифрового регулятора динамического момента двигателя-маховика // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12-13 апр. 2018 г.). – 2018. – С. 161–164.

Отпечатно в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л. Тираж 120 экз.
Заказ № 2025. Подписано в печать 11.01.2019 г.