

На правах рукописи



Завьялова Ольга Юрьевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СИСТЕМ
ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Специальность 05.09.03- Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» и открытом акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полус»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Казанцев Юрий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Иванчура Владимир Иванович

кандидат технических наук,
Теплов Алексей Иванович

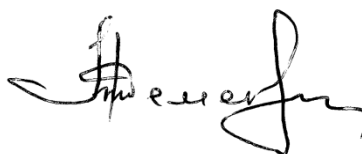
Ведущая организация: ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск)

Защита диссертации состоится «22» мая 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в ауд. 217 учебного корпуса 8 по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «16» апреля 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективность функционирования космического аппарата на орбите во многом зависит от точности и надежности работы его системы ориентации и стабилизации. С появлением космических аппаратов, предназначенных для длительного функционирования в космическом пространстве и требующих постоянной ориентации, для осуществления высокоточной угловой стабилизации и динамичных поворотов космического аппарата относительно центра масс, широко применяются системы ориентации и стабилизации с электромеханическими исполнительными органами (ЭМИО).

Развитие многочисленных функциональных областей применения электромеханических систем для КА с первых дней освоения космического пространства сопровождалось интенсивными научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами как в условиях наземных испытаний отдельных электрических машин, приборов и различных систем для КА, так и особенно их отработки в космических условиях орбитального полета. Значительный вклад в решение задачи управления ориентацией КА внесли ученые К.Б. Алексеев, А.А. Анчев, Г.Г. Бебенин, М.Л. Дертозос, И.В. Новожилов, Б.В. Раушенбах, Ж.К. Робердж, В.В. Румянцев, А.В. Сорокин, Е.Н. Токарь, Н.Н. Шереметьевский.

В настоящее время во многих электромеханических системах ориентации длительно существующих околоземных космических аппаратов и орбитальных космических станций в качестве исполнительных органов используются управляющие двигатели-маховики (УДМ).

Управление ориентацией осуществляется с их помощью за счет перераспределения кинетического момента между исполнительным органом и корпусом космического аппарата. При этом стабилизация с помощью УДМ осуществляется изменением угловой скорости маховика, установленного по соответствующей оси космического аппарата.

ЭМИО системы ориентации и стабилизации космического аппарата предназначены для создания управляющих динамических моментов, исходя из этого, электропривод (ЭП) ЭМИО имеет специфические характеристики, такие как: отсутствие полезной нагрузки на валу двигателя, жесткие ограничения по массогабаритным характеристикам, необходимость точного управления динамическим моментом.

Поскольку главными параметрами, определяющими эффективность работы УДМ в системах ориентации, являются развиваемый ими управляющий динамический и суммарный кинетический момент, а опыт разработки УДМ показывает, что погрешность реализации динамического момента достигает 20 %, и это при учете величины момента сопротивления вращению при задании входного сигнала, то актуальной задачей является разработка высокоточных регуляторов ЭМИО системы ориентации и стабилизации космического аппарата с погрешностью реализации динамического момента менее 5 %.

Объектом исследования является ЭП ЭМИО системы ориентации и стабилизации космического аппарата на базе двухфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Предметом исследования являются алгоритмы управления электроприводом электромеханического исполнительного органа и его точностные характеристики.

Целью диссертационной работы является улучшение точностных характеристик контура формирования динамического момента ЭП ЭМИО синтезом высокоточных регуляторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести анализ существующих алгоритмов управления ЭП ЭМИО;
- создать имитационную модель ЭП ЭМИО для исследования его динамических характеристик;
- разработать алгоритмы управления ЭП ЭМИО и провести синтез высокоточных регуляторов, обеспечивающих работу ключевых элементов ЭП ЭМИО в различных режимах;
- исследовать динамические характеристики разработанной имитационной модели ЭП ЭМИО с высокоточным регулятором.

Методы исследования базируются на теории электрических машин и электрического привода, теории дискретных систем управления, теории дифференциальных и алгебраических уравнений, вычислительных методах, современных инструментальных системах и методах математического моделирования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, адекватностью используемой при исследовании математической модели, компьютерным моделированием, экспериментальной проверкой результатов, сравнительным анализом полученных результатов теоретического и экспериментального исследования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- создана структурированная модель электромеханического исполнительного органа, как элемента системы ориентации и стабилизации космического аппарата, позволяющая описать его работу в реальных электрических и механических координатах и определить эффективные стратегии управления;
- разработан закон управления электроприводом электромеханического исполнительного органа с прогнозированием пульсирующей составляющей тока силовой цепи, обеспечивающий повышение точности управления динамическим моментом;
- предложены структуры и алгоритмы работы регуляторов, обеспечивающих высокую точность стабилизации динамического момента электромеханического исполнительного органа.

Практическая ценность работы:

- разработан моделирующий комплекс прибора «Агат-15М», позволяющий проводить исследования динамических и статических режимов работы ЭМИО;
- проведена схемная реализация высокоточных регуляторов ЭП ЭМИО, обеспечивающих улучшенные точностные характеристики.

Реализация результатов работы. Результаты исследований и разработанные имитационные модели использовались при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ОАО «НПЦ «Полюс» (г.Томск) по программе разработки ЭП на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, использующихся в качестве ЭМИО систем ориентации и стабилизации КА (приборов типа «Агат»), с улучшенными массогабаритными, динамическими и ресурсными характеристиками.

На защиту выносятся:

- математическая модель ЭП ЭМИО на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, состоящая из моделей его структурных звеньев, позволяющая описать его работу в реальных электрических и механических координатах и определить эффективные стратегии управления;
- метод синтеза высокоточного регулятора ЭП ЭМИО по условию нулевой ошибки на интервале после коммутации ключевого элемента;
- структуры и алгоритмы управления регуляторов и модуляторов обеспечивающие повышение точности стабилизации динамического момента ЭП ЭМИО.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на XV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2009 г.; научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», ОАО «НПЦ «Полюс», Томск, 2010 г.; молодежной конференции «Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике», Звездный городок, 2011 г.; V юбилейной международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» имени Г.А. Сипайлова, Томск, 2011 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах, из них 2 работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и одном патенте РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 126 наименований. Объем основной части – 152 страниц, 59 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены её цели и задачи, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается принцип действия ЭМИО на базе УДМ, специфические характеристики ЭП ЭМИО. Приводится обзор эксплуатационных характеристик и особенностей применения различных типов двигателей нашедших применение в ЭП ЭМИО. На основе приведенного обзора сделан вывод, что наиболее перспективным по линейности регулировочной характеристики и по энергетическим параметрам являются синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ).

Также в первой главе сделан обзор состояния и перспектив развития бортовых ЭП ЭМИО космических аппаратов. Приведены характеристики отечественных и зарубежных ЭМИО. Практически во всех последних разработках применяется СДПМ. В последние годы в области ЭМИО наметилась тенденция создания малогабаритных УДМ с высокой частотой вращения, большим значением динамического момента, управляемого с высокой степенью точности для малых космических аппаратов.

Следующая часть первой главы посвящена рассмотрению способов управления динамическим моментом ЭП ЭМИО.

Сигнал управления динамическим моментом N_y вырабатывается устройствами системы ориентации и стабилизации и как в любой замкнутой автоматической системе в процессе отработки заданного направления ориентации или стабилизации может изменяться в широких пределах от $-N_{y \max}$ до $+N_{y \max}$, проходя через нулевое значение. Следовательно, и динамический момент $M_d(t)$ должен изменяться в соответствующем диапазоне.

Также в первой главе проведен сравнительный анализ прямого и косвенного управления динамическим моментом, которые вытекают из выражения

$$M_d(t) = M_{\text{эм}}(t) - M_c(t) = \frac{dH(t)}{dt} = J \frac{d\Omega(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $M_{\text{эм}}(t)$ – электромагнитный момент двигателя; $M_c(t)$ – момент сопротивления вращению; $H(t)$ – кинетический момент; J – момент инерции маховика; $\Omega(t)$ – угловая скорость.

Отмечено, что первый способ основан на измерении динамического момента с введением сигнала, пропорционального измеренной величине, в цепь обратной связи замкнутого контура управления моментом двигателя. Главный недостаток такого способа с точки зрения конструирования УДМ – это наличие упругих элементов между основанием двигателя и платформой космического аппарата, что способствует увеличению массы прибора, повышению колебательности системы управления моментом, усложнению конструкции прибора и, значит, к снижению его надежности и к уменьшению точности ориентации вектора кинетического момента.

Сделан вывод о том, что более прост косвенный способ, при котором регулирование динамического момента осуществляется в соответствии с выражением (1) регулированием электромагнитного момента с учетом оценки момента сопротивления по параметрам динамического цикла в режиме стабилизации. Измерение электромагнитного момента и преобразование в электрический сигнал реализуется достаточно просто.

Для регулирования динамического момента ЭП на базе СДПМ существуют различные способы управления ключами инвертора, анализ которых проведен в первой главе. Проведенный анализ показал, что при управлении ключами инвертора с помощью позиционной обратной связи не отслеживаются мгновенные значения фазных токов, а электромагнитный момент зависит от углового положения ротора, что приводит к неравномерности частоты вращения двигателя, сужает границы устойчивости и затрудняет демпфирование; при векторном управлении ключами инвертора контролируемые координаты, измеренные в неподвижной системе координат статора, преобразуются к вращающейся системе координат ротора, поэтому базовым элементом такого управления является преобразователь координат (векторный преобразователь).

Показано, что наиболее предпочтителен для использования в ЭП ЭМИО частотно-токовый способ управления, который является частным случаем векторного управления. При регулировании фазного тока регулируется электромагнитный момент двигателя, поскольку он пропорционален амплитудному значению фазного тока: $M_{эм} \equiv I_{фm}$. Частотно-токовый способ управления предполагает «следящее» регулирование токов в обмотках двигателя, при котором регулятор отслеживает эталонные синусоидальные или близкие к ним сигналы, при этом обеспечивается равномерность вращения двигателя. Частота и фаза тока определяются частотой вращения и угловым положением ротора двигателя.

Выявлено, что для обеспечения управления с погрешностью менее 5 % необходимо формировать ток двигателя с учетом текущих параметров вращения ротора.

Вторая глава посвящена разработке имитационной модели ЭП ЭМИО, для решения поставленной в диссертации задачи синтеза высокоточного регулятора. Отмечено, что современные пакеты схемотехнического моделирования, позволяя использовать различные формы представления моделей, объединяют возможности моделирования принципиальных и функциональных схем, и поэтому могут эффективно служить для исследования и проектирования ЭП ЭМИО.

В диссертации для моделирования ЭП ЭМИО как на функциональном, так и схемотехническом уровне используется пакет OrCAD 9, который объединяет в себе возможности анализа, синтеза и расчета электронных схем и обладает очень обширной библиотекой (более 200 тыс.) электронных компонентов.

При составлении математической модели ЭП ЭМИО использовался метод электромеханических аналогий, который позволяет исследовать

механические системы на компонентном уровне, что дает возможность более наглядно учитывать влияние отдельных параметров на характеристики системы. При этом моделирование отдельных узлов может производиться на функциональном (формированием передаточных функций) и на компонентном (использованием электромеханических аналогий) уровне.

Для исследования и проектирования ЭП ЭМИО на базе СДПМ с учетом общепринятых допущений разработана имитационная модель, состоящая из четырех моделей: силовой электрической цепи, электромеханических преобразований в двигателе, механической системы и регулятора тока (рис. 1).

Имитационная модель ЭП ЭМИО построена на компонентном и частично на функциональном уровне.

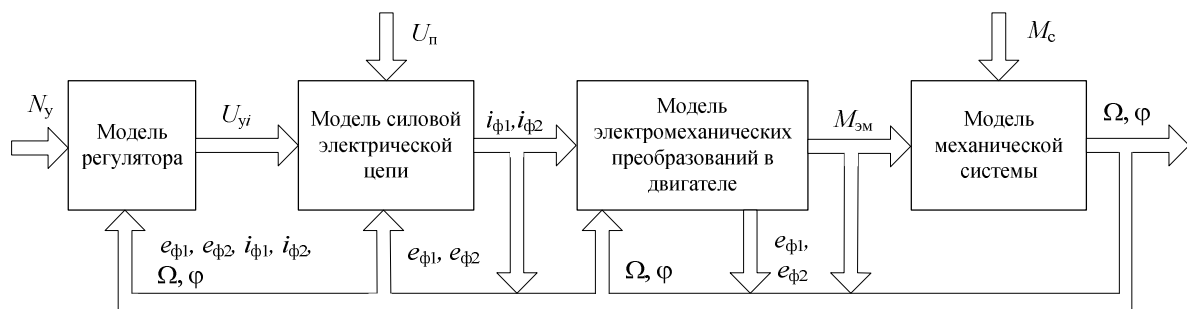
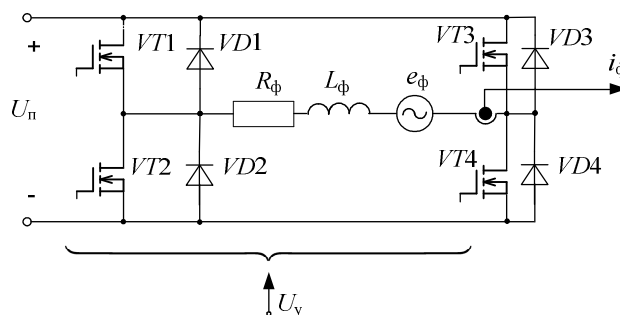


Рис. 1. Функциональная схема имитационной модели ЭП ЭМИО

Модель силовой электрической цепи ЭМИО (рис. 2) на базе двухфазного СДПМ включает в себя по каждой фазе один однофазный мостовой инвертор напряжения, сопротивление R_ϕ , индуктивность L_ϕ и ЭДС $e_\phi(t)$ обмоток двигателя. Поскольку она реализована на компонентном уровне, это позволяет исследовать режимы работы любого элемента в силовой электрической цепи.



$U_y(t)$ – сигнал управления ключевыми элементами инвертора;
 U_π – напряжение питания

Рис. 2. Модель силовой электрической цепи

Модель электромеханических преобразований (рис. 3) построена на функциональном уровне с реализацией математических операций, описывающих процесс электромеханических преобразований:

$$\begin{cases} M_{\text{эм}}(t) = \Phi_{\delta} \cdot i_{\phi 1}(t) \cdot \sin \varphi(t) + \Phi_{\delta} \cdot i_{\phi 2}(t) \cdot \cos \varphi(t); \\ e_{\phi 1}(t) = \Phi_{\delta} \cdot \omega(t) \cdot \sin \varphi(t); \\ e_{\phi 2}(t) = \Phi_{\delta} \cdot \omega(t) \cdot \cos \varphi(t), \end{cases}$$

где $i_{\phi 1}(t)$, $i_{\phi 2}(t)$ – ток первой и второй фазы двигателя; Φ_{δ} – магнитный поток; $\varphi(t)$ – угловое положение ротора двигателя; $\omega(t) = z_{\text{п}} \cdot \Omega(t)$, $z_{\text{п}}$ – число пар полюсов.

ЭДС в обмотках двигателя пропорциональна угловой скорости и является синусоидальной функцией углового положения ротора так же, как и электромагнитные моменты обмоток, которые пропорциональны фазному току и в сумме равны электромагнитному моменту двигателя.

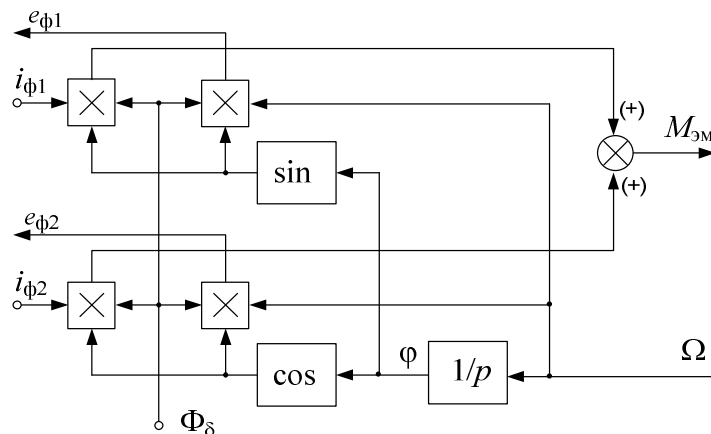


Рис. 3. Структура модели электромеханических преобразований в двигателе

Модель механических преобразований (рис. 4) описывается следующим уравнением:

$$M_{\text{д}}(t) = M_{\text{эм}}(t) - M_{\text{с}}(t),$$

где $M_{\text{с}}(t) = \kappa_{\text{с}} \cdot H(t) + M_{\text{т}} \cdot \text{sign}(H(t))$; $\kappa_{\text{с}}$ – коэффициент пропорциональности по угловой скорости; $M_{\text{т}} \cdot \text{sign}(H(t))$ – момент трогания.

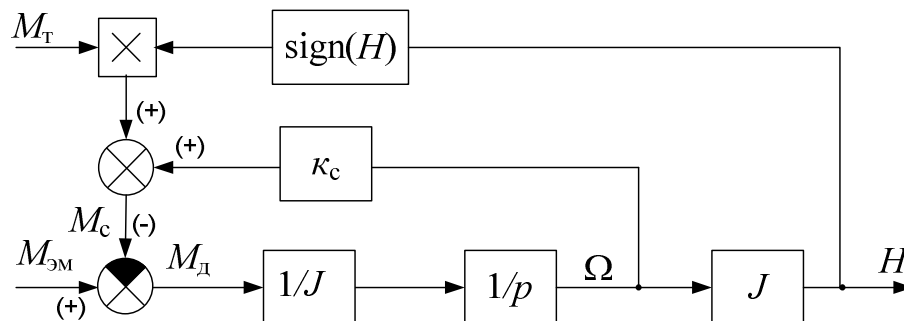
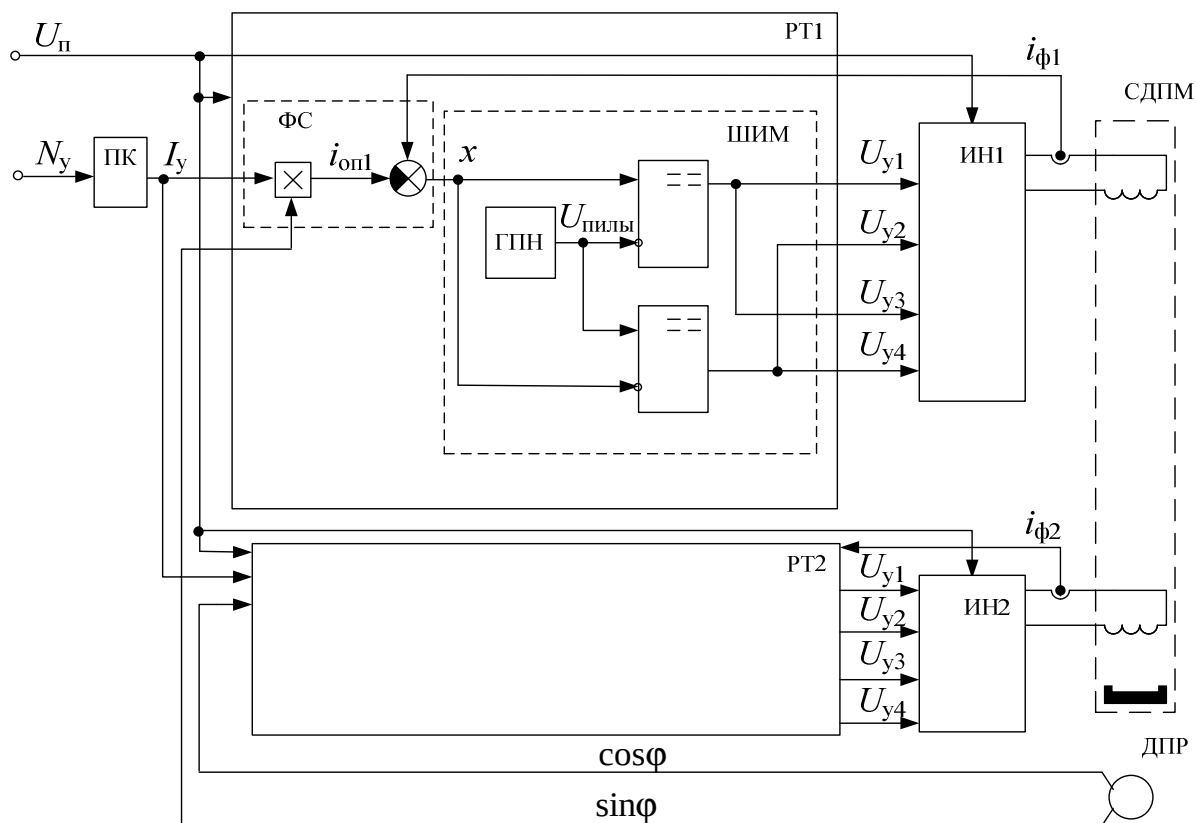


Рис. 4. Структура модели механических преобразований в двигателе

Структура имитационной модели ЭП ЭМИО приведена на рисунке 5.



U_n – напряжение питания; $U_{y1}(t) \dots U_{y4}(t)$ – сигналы управления ключевыми элементами инверторов ИН1, ИН2; ПК - преобразователь кодового управляющего сигнала N_y в аналоговый $I_y(t)$; ФС - формирователь сигналов управления: опорного тока $i_{оп1}(t)$, $i_{оп2}(t)$ и сигнала ошибки по току $x(t)$; ШИМ - широтно-импульсный модулятор; РТ1, РТ2 - регуляторы тока; ГПН - генератор пилообразного напряжения $U_{пилы}(t)$; ДПР - датчик положения ротора.

Рис. 5. Структура имитационной модели ЭП ЭМИО

При моделировании использованы параметры ЭП ЭМИО «Агат-15М», разработанного в ОАО «НПЦ «Полус»: диапазон изменения электромагнитного момента $M_{эм}$ от минус 0,15 до +0,15 Н·м; диапазон изменения кинетического момента H от минус 15 до +15 Н·м·с; момент инерции вращающихся частей УДМ $J=0,02388 \pm 0,00024$ кг·м²; момент трогания $M_T=0,0025$ Н·м; индуктивность фаз $L_{\phi1}, L_{\phi2}$ 0,299 мГн; активное сопротивление фаз $R_{\phi1}, R_{\phi2}$ 0,3 Ом; магнитный поток $\Phi_\delta = 0,95 \cdot 10^{-4}$ Вб; число пар полюсов СДПМ $z_n=4$.

Погрешность реализации электромагнитного момента, полученная в результате моделирования ЭМИО «Агат-15М» с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления силовыми ключами инвертора, составляет 12 % при максимальном управляющем воздействии (рис. 6), в зоне малых (менее 10 % от максимального) управляющих воздействий эта погрешность пропорционально возрастает. Поэтому актуальной задачей является разработка высокоточных регуляторов ЭП ЭМИО системы ориентации и стабилизации космического аппарата. В эксперименте указанная

погрешность достигает 20 %, полученные результаты свидетельствуют об адекватности модели.

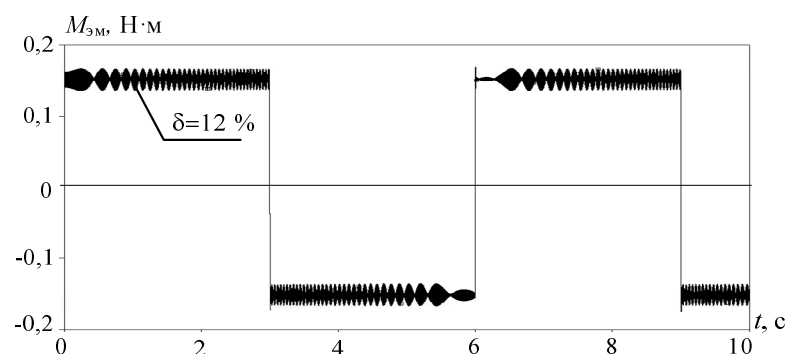


Рис. 6. Изменение электромагнитного момента при смене знака управляющего воздействия

В третьей главе проведен синтез закона управления ЭП ЭМИО по условию нулевой ошибки на интервале после коммутации ключевого элемента. Обосновывается целесообразность формирования управляющего сигнала в функции текущих и прогнозируемых параметров силовой части схемы. Предлагаются аналитические решения уравнений, прогнозирующих пульсирующую составляющую тока в непрерывной части системы, формируются законы управления для разных видов модуляции. Приводятся схемы регуляторов и модуляторов реверсивных ЭП ЭМИО и алгоритмы их работы.

Отмечено, что заметно повысить качество частотно-токового регулирования можно с помощью алгоритмов прогнозирующего управления, которые находят все более широкое применение в связи с активным развитием силовой электроники и микропроцессорной техники. Управление с прогнозированием это управление, при котором управляющие воздействия вырабатываются на основе как текущих, так и ожидаемых в будущем значений координат системы управления. Сущность таких алгоритмов заключается в прогнозировании результатов управления на некотором малом временном интервале (интервале управления) и определении оптимальной управляющей последовательности, наилучшим образом удовлетворяющей задаче управления. Подобные стратегии управления предполагают наличие математической модели объекта управления, определяющей векторы переменных состояния и возмущений, а также состав управляющих воздействий и их возможные (физически реализуемые) значения. Состав независимых координат, управляемых в рамках прогнозирующей стратегии управления, определяется на основе анализа модели.

Динамические процессы в системе тесно связаны с накоплением и передачей энергии, поэтому процессы формирования управляющих воздействий необходимо рассматривать совместно с процессами преобразования энергии.

Рассматривается процедура синтеза управления следящего регулятора тока по условию нулевой ошибки.

Ток силовой цепи $i_\phi(t)$ представлен в виде двух составляющих:

$$i_\phi(t) = i_{cr}(t) + \tilde{i}_L(t)$$

где $i_{cr}(t)$ – сглаженная составляющая тока силовой цепи, которая должна повторять опорный ток $i_{оп}(t)$; $\tilde{i}_L(t)$ – пульсирующая составляющая тока силовой цепи.

При выполнении условия

$$i_{cr}(t) - i_{оп}(t) = 0, \quad (2)$$

ток $\tilde{i}_L(t)$ представляет собой переменный ток треугольной формы с нулевой постоянной составляющей и амплитудой равной половине приращения тока фазной обмотки.

Условие (2) выполняется, если в качестве сигнала развертки $Y_p(t)$ в законе управления использовать прогнозируемое значение пульсирующей составляющей тока силовой цепи $\tilde{i}_L(t)$ на интервале после коммутации ключа, так чтобы в момент коммутации импульсного элемента регулятора выполнялось условие:

$$Y_p(t_k) = -\tilde{i}_L(t_k).$$

Таким образом, для ШИМ заднего фронта получен закон управления вида:

$$\begin{aligned} F(t) &= x(t) + Y_p(t); \\ VT &= \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t \leq t_k; \\ 0 & \text{при } t_k \leq t \leq T, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где t_k – момент коммутации, определяется наименьшим положительным корнем уравнения $F(t) = 0$; $x(t) = i_\phi(t) - i_{оп}(t)$ – сигнал ошибки по току; $VT = 1$ – силовой ключ открыт, $VT = 0$ – силовой ключ закрыт.

Показано, что при односторонней широтно-импульсной модуляции заднего фронта импульса сигнал развертки формируется в соответствии с выражением

$$Y_p(t) = -\frac{1}{2L_\phi} \int_t^T U_{L\phi}(t) dt, \quad (4)$$

где $U_{L\phi}(t)$ – напряжение на индуктивности силовой цепи на интервале после коммутации ключа; T – длительность периода модуляции; $t \in (0, T)$.

Поскольку период модуляции много меньше периода формируемого тока силовой цепи напряжение на индуктивности в схеме принимается постоянным и равным текущему значению и уравнение (4) приводится к виду

$$Y_p(t) = \frac{-U_{L\phi}}{2L_\phi} T \left(1 - \frac{t}{T}\right).$$

Предложенный закон управления ЭП ЭМИО с прогнозированием приращения тока в силовой цепи позволяет создавать регуляторы, обеспечивающие заданную точность формирования динамического момента.

В четвёртой главе приводятся результаты разработки устройства управления ЭП ЭМИО, реализующего принцип прогнозирования, имитационная модель, схемная реализация ШИМ, результаты исследования, сравнительный анализ полученных характеристик, исследование адекватности имитационных моделей.

Для исследования высокоточного следящего регулятора с управлением по условию нулевой ошибки разработана имитационная модель ЭП ЭМИО, структура которой представлена на рис. 7.

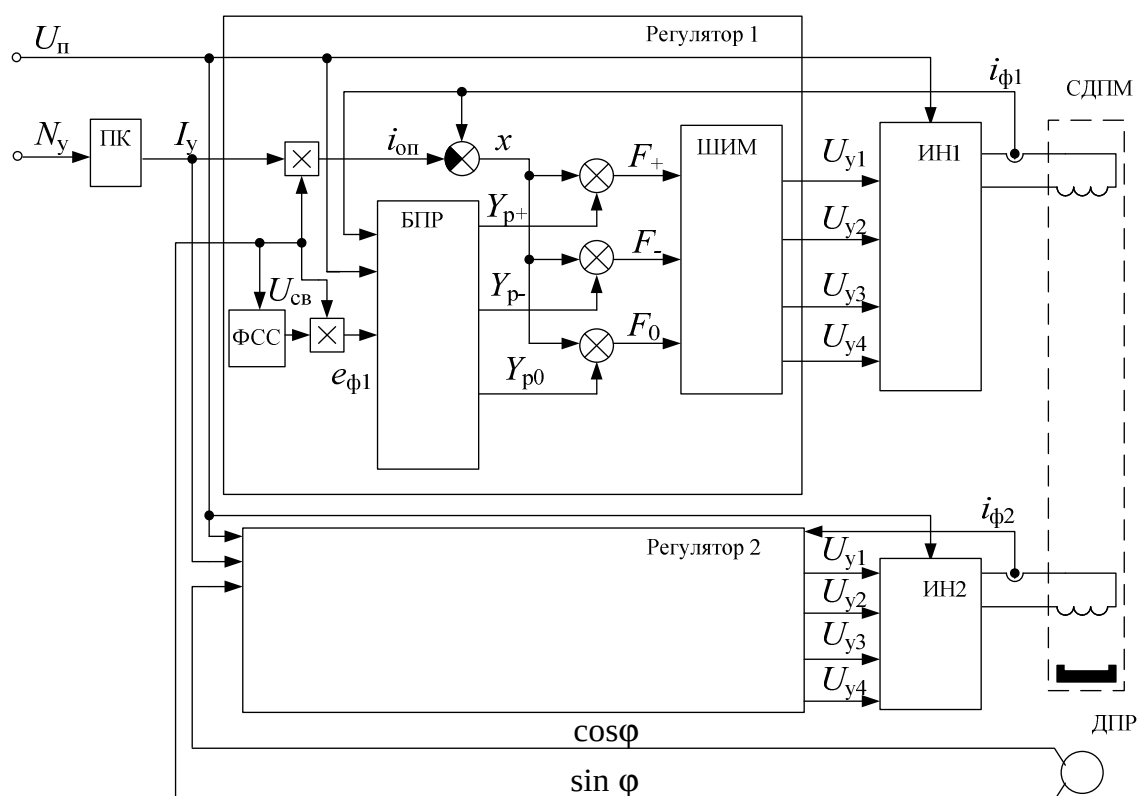


Рис. 7. Структура имитационной модели ЭП ЭМИО с управлением по условию нулевой ошибки (патент РФ № 2457610)

Модель следящего регулятора с управлением по условию нулевой ошибки построена на компонентном и частично функциональном уровне. Модель имитирует работу регулятора, реализующего управление СДПМ, позиционной коммутацией обмоток с импульсной модуляцией напряжения питания и состоит из узлов сложения, сравнения и умножения, а также блока периодических разверток (БПР), формирователя сигнала скорости (ФСС) и ШИМ.

Формирование управляющих сигналов для переключения импульсных элементов инверторов в регуляторе осуществляется узлами сложения в соответствии с выражением (3).

ЭДС вращения обмоток вычисляется узлом умножения в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} e_{\phi 1}(t) &= U_{\text{св}}(t) \cdot \sin \varphi(t); \\ e_{\phi 2}(t) &= U_{\text{св}}(t) \cdot \cos \varphi(t), \end{aligned}$$

где $U_{\text{св}}(t)$ – напряжение, пропорциональное угловой скорости, полученное после преобразования сигнала ДПР.

Отмечено, что для двухсторонней однополярной широтно-импульсной модуляции оптимальным выбором является трехуровневая система регулирования (1, 0, –1), которая придает разработанной модели свойства астатической дискретной системы и оптимизирует управление в моменты переключения силовых ключей инвертора при переходе через нуль опорного сигнала. Поэтому в БПР в соответствии с уравнением:

$$Y_p(t) = \frac{U_{L\phi i}}{L_{\phi i}} T \left(1 - \left(\frac{t}{T} \right) \right)$$

формируется три сигнала развертки: $Y_{p+}(t)$, $Y_{p0}(t)$, $Y_{p-}(t)$, которые необходимы для формирования управляющих сигналов $F_+(t)$, $F_-(t)$, $F_0(t)$ в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} F_+(t) &= x(t) + Y_{p+}(t), \quad Y_{p+}(t) = \frac{U_{\text{н}} - e_{\phi i} - i_{\phi i} \cdot R_{\phi i}}{L_{\phi i}} T \left(1 - \left(\frac{t}{T} \right) \right); \\ F_0(t) &= x(t) + Y_{p0}(t), \quad Y_{p0}(t) = \frac{-e_{\phi i} - i_{\phi i} \cdot R_{\phi i}}{L_{\phi i}} T \left(1 - \left(\frac{t + T/2}{T} \right) \right); \\ F_-(t) &= x(t) + Y_{p-}(t), \quad Y_{p-}(t) = \frac{-U_{\text{н}} - e_{\phi i} - i_{\phi i} \cdot R_{\phi i}}{L_{\phi i}} T \left(1 - \left(\frac{t}{T} \right) \right). \end{aligned}$$

Управляющими сигналами $F_+(t)$, $F_-(t)$, $F_0(t)$ формируется широтно-модулированное напряжение питания обмотки двигателя по следующему алгоритму (рис. 8, 9):

- положительное напряжение питания $U_{\text{н}}$ подключается к входу обмотки двигателя при $F_+(t) > 0$ и положительной полярности опорного сигнала;
- положительное напряжение питания $U_{\text{н}}$ отключается с замыканием накоротко входа обмотки двигателя при $F_0(t) > 0$;
- отрицательное напряжение питания $-U_{\text{н}}$ подключается к входу обмотки двигателя при $F_-(t) > 0$ и отрицательной полярности опорного сигнала;
- отрицательное напряжение питания $-U_{\text{н}}$ отключается с замыканием накоротко входа обмотки двигателя при $\overline{F}_0(t) > 0$.

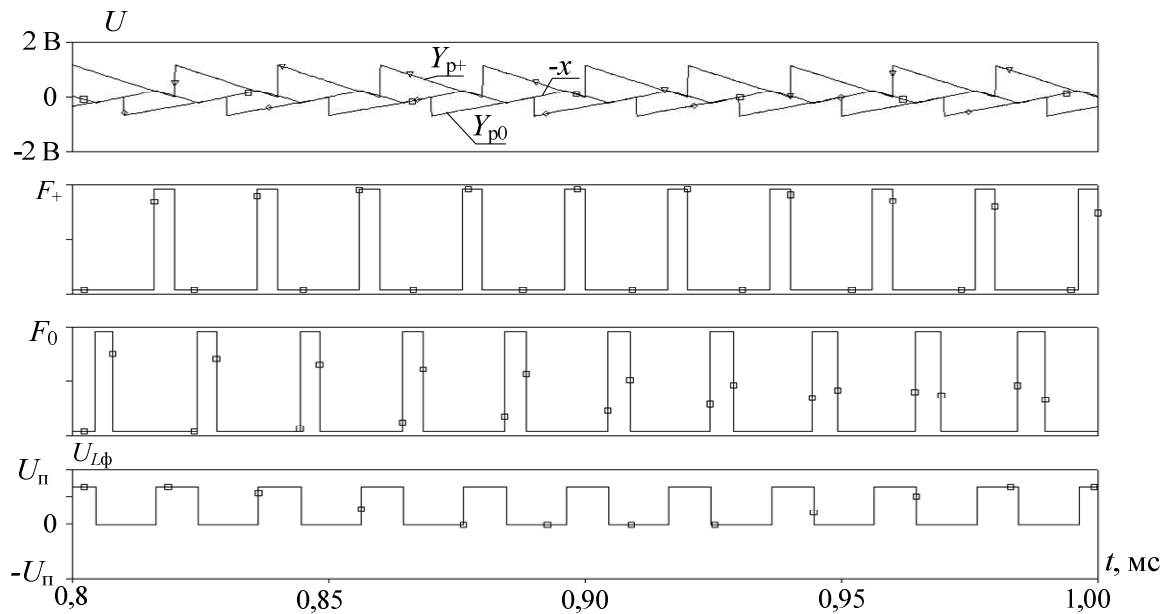


Рис. 8. Диаграммы сигналов $x(t)$, $Y_{p+}(t)$, $Y_{p0}(t)$, $F_+(t)$, $F_0(t)$, $U_{L\phi}(t)$ при однополярной двухсторонней широтно-импульсной модуляции

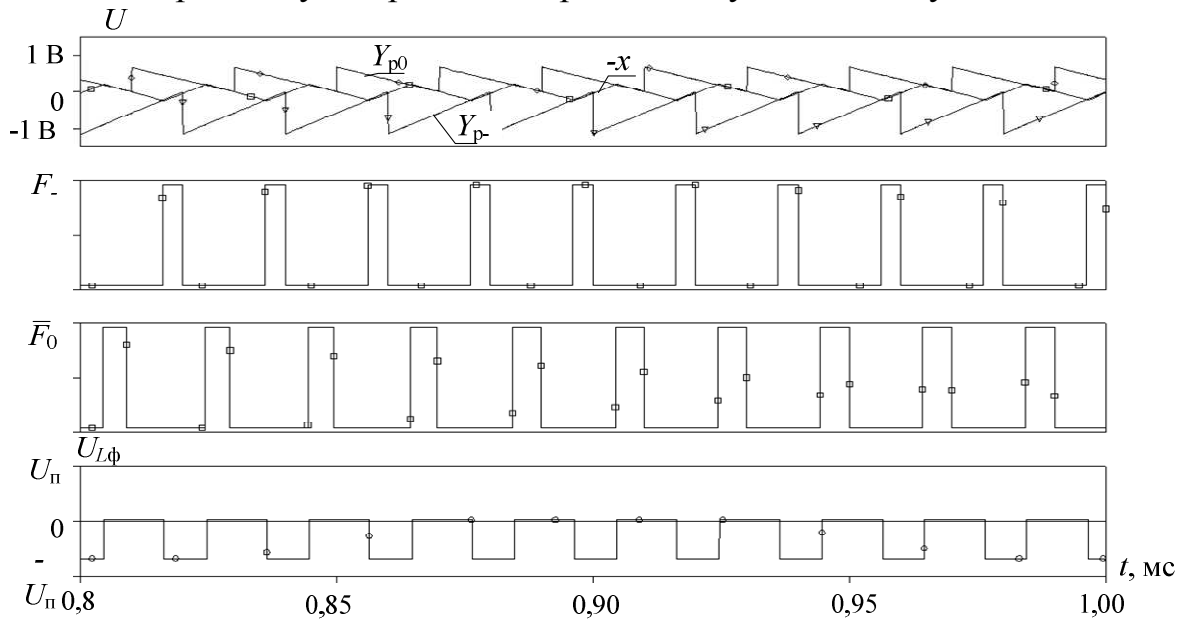


Рис. 9. Диаграммы сигналов $x(t)$, $Y_{p-}(t)$, $Y_{p0}(t)$, $F_-(t)$, $\bar{F}_0(t)$, $U_{L\phi}(t)$ при однополярной двухсторонней широтно-импульсной модуляции

Для сравнения исследуются динамические и статические характеристики имитационной модели ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления силовыми ключами инвертора, и разработанным регулятором с управлением по условию нулевой ошибки, реакция системы на изменение сигнала задания, поведение системы в различных режимах работы.

На рисунке 10 приведена диаграмма переходного процесса электромагнитного момента создаваемого ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления силовыми ключами инвертора (а) и со следящим регулятором с управлением по условию нулевой

ошибки (б) при ступенчатом изменении управляющего воздействия. В первом случае время переходного процесса составило 0,6 мс и присутствует перерегулирование $\Delta M_{эм} = 17\%$, во втором случае время переходного процесса в 10 раз меньше (0,06 мс), а перерегулирование отсутствует. Погрешность реализации электромагнитного момента в установившемся режиме при управлении с прогнозированием уменьшена с 12 % до 3 %, что подтверждает эффективность предложенного метода.

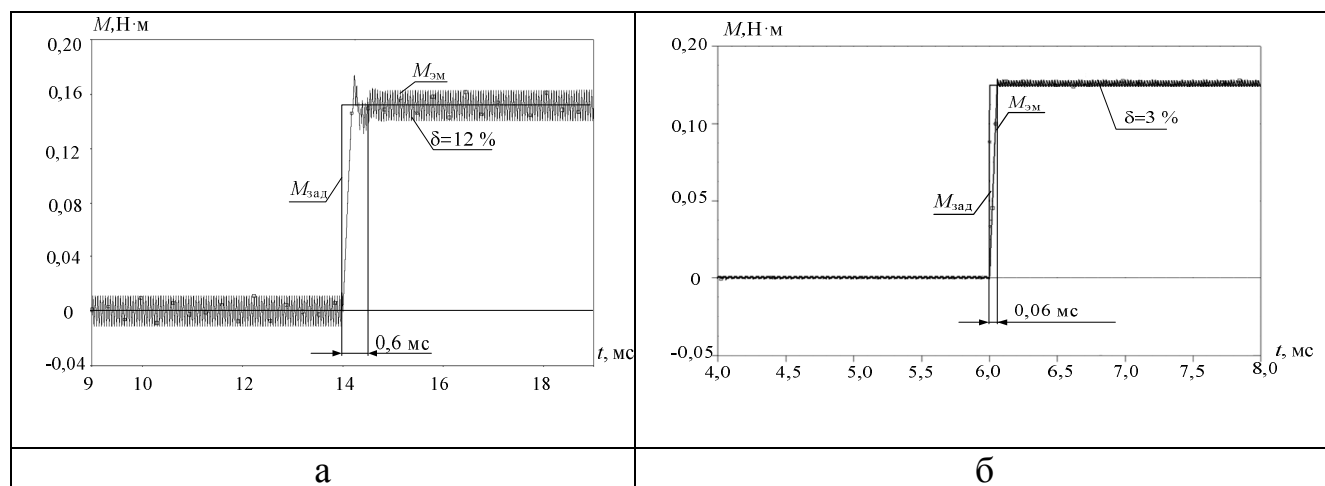


Рис. 10. Переходный процесс электромагнитного создаваемого ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления (а) и со следящим регулятором с управлением по условию нулевой ошибки (б)

Как правило, при работе ЭМИО в составе КА в условиях натурной эксплуатации большую часть времени двигатель работает в режиме стабилизации частоты вращения. Режимы разгона и торможения при максимальном управляющем воздействии применяется один два раза за весь срок активного существования КА.

На рисунке 11 представлены результаты моделирования ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления в режиме реверса и последующей стабилизации.

На рисунке 12 представлены результаты моделирования ЭП ЭМИО со следящим регулятором с управлением по условию нулевой ошибки в режиме реверса и последующей стабилизации.

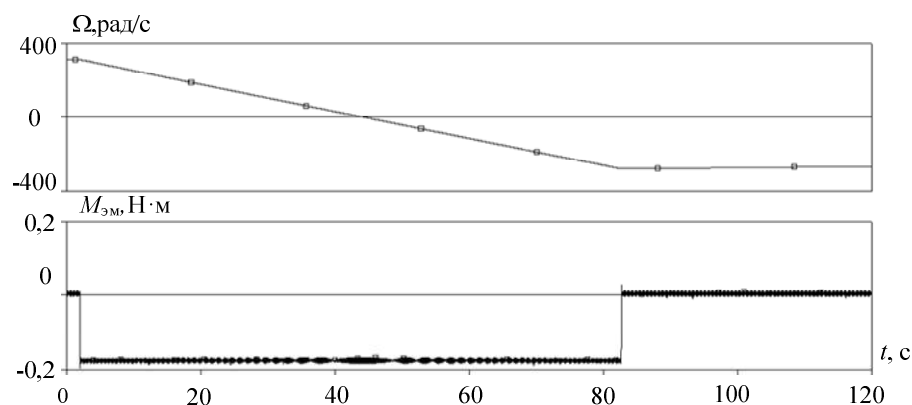


Рис. 11. Диаграммы сигналов $\Omega(t)$, $M_{\text{ЭМ}}(t)$ в режиме реверса и последующей стабилизации ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления

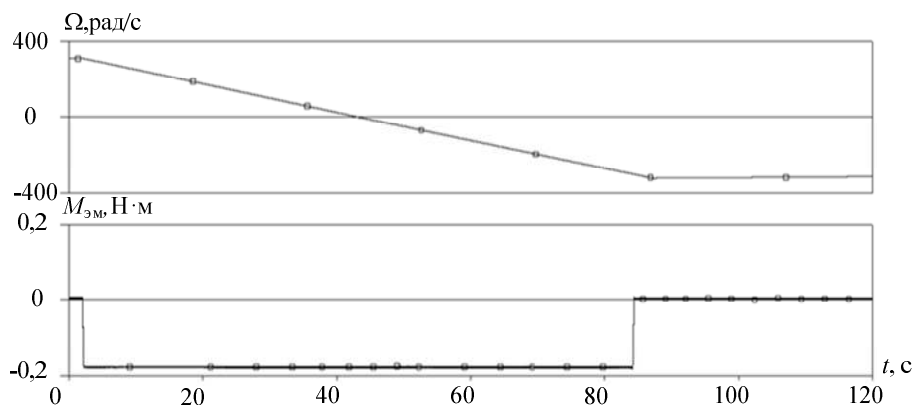


Рис. 12. Диаграммы сигналов $\Omega(t)$, $M_{\text{ЭМ}}(t)$ в режиме реверса и последующей стабилизации ЭП ЭМИО со следящим регулятором с управлением по условию нулевой ошибки

При проведении моделирования для обеих моделей задавались одинаковые управляющие воздействия и начальные условия. Видно, что, как и в случае модели с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления силовыми ключами инвертора, угловая скорость в режимах разгона и торможения модели ЭП ЭМИО со следящим регулятором с управлением по условию нулевой ошибки (рис. 12) изменяется линейно, в режиме стабилизации пульсации по скорости отсутствуют, при этом пульсации электромагнитного момента существенно меньше, особенно в области малых управляющих воздействий (рис. 12).

В условиях натурной эксплуатации большую часть времени двигатель работает в режиме стабилизации частоты вращения. Пульсации электромагнитного момента при работе в области малых управляющих воздействий в ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления силовыми ключами инвертора, сравнимы со средним значением электромагнитного момента. В ЭП ЭМИО со следящим регулятором с управлением по условию нулевой ошибки пульсации электромагнитного

момента меньше в четыре раза, что особенно важно в области малых (менее 10 % от максимального) управляющих воздействий.

Проведена оценка адекватности разработанных имитационных моделей ЭП ЭМИО на базе СДПМ путем сравнения статических и динамических характеристик моделей со статическими и динамическими характеристиками ЭМИО «Агат-15М», разработанного в ОАО «НПЦ «Полус» (рис. 13, 14, 15).

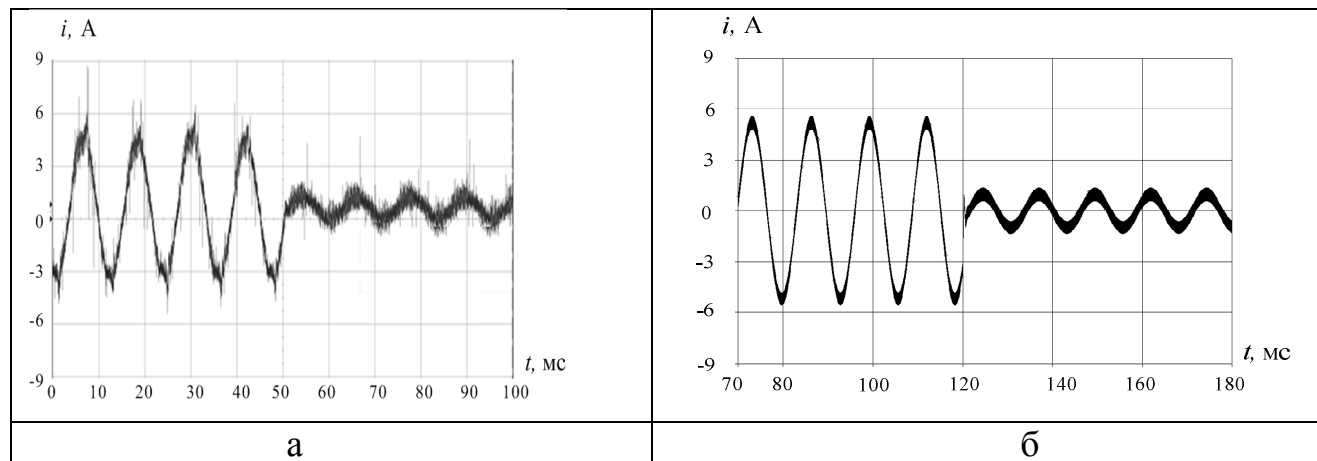
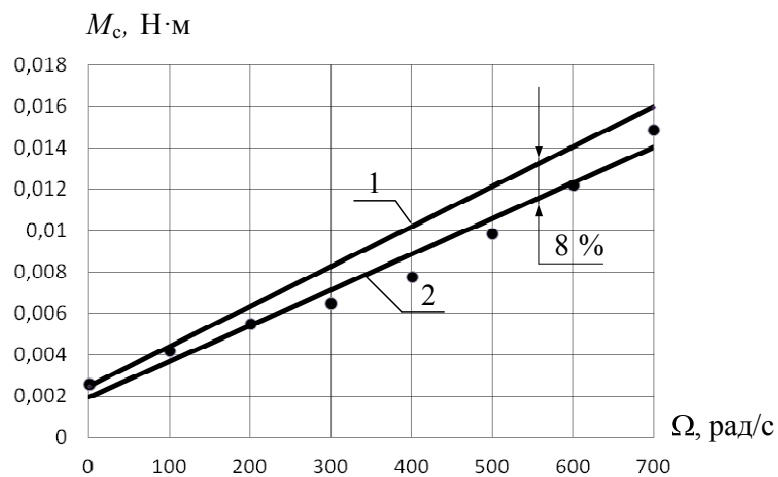


Рис. 13. Диаграмма изменения фазного тока, полученная в результате эксперимента (а) и на имитационной модели (б)



- 1- имитационная модель;
- 2- ЭМИО «Агат-15М».

Рис. 14. Зависимость момента сопротивления от угловой скорости

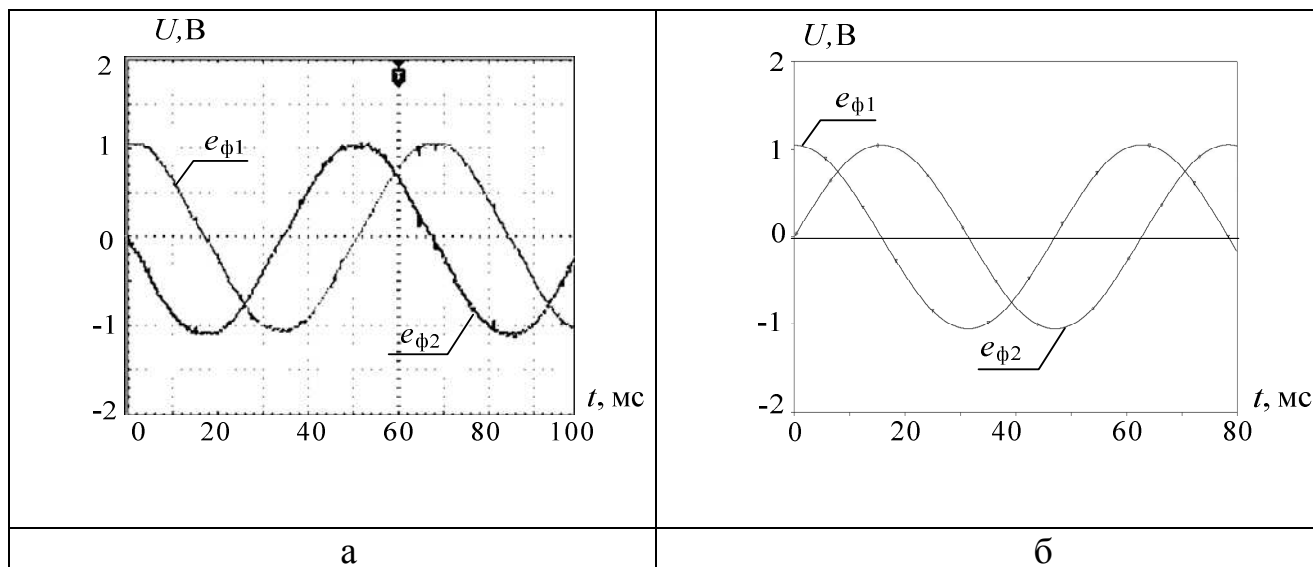


Рис. 15. Диаграмма изменения ЭДС, полученная в результате эксперимента (а) и на имитационной модели (б)

Сравнение результатов, приведенных на рис. 13, 14, 15 показали приемлемую (до 8 %) их сходимость и позволили сделать вывод об адекватности разработанных имитационных моделей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

1. Проведен обзор состояния и перспектив развития бортовых ЭП ЭМИО космических аппаратов. Сделан вывод о том, что основной тенденцией является создание малогабаритных УДМ с высокой частотой вращения, большим значением динамического момента, управляемого с высокой степенью точности для малых космических аппаратов.

2. Разработана имитационная модель ЭП ЭМИО на базе СДПМ, состоящая из структурных звеньев: регулятора, силовой электрической цепи, электромеханических преобразований в двигателе и механической части системы, реализованная на компонентном и частично функциональном уровне с использованием стандартных компонентов, что позволяет исследовать режимы работы любого узла ЭП ЭМИО в реальных электрических и механических координатах, при различных стратегиях управления.

3. Предложен закон управления и алгоритмы структурно-параметрического синтеза регуляторов ЭП ЭМИО, основанные на прогнозировании приращения тока в силовой цепи, позволяющие создавать регуляторы, обеспечивающие высокую точность стабилизации динамического момента ЭМИО.

4. Разработаны блоки модуляции для односторонней и двухсторонней ШИМ обеспечивающие безопасное управление ключевыми элементами реверсивного ЭП в различных режимах работы.

5. Проведено исследование имитационных моделей ЭП ЭМИО с разработанным высокоточным следящим регулятором с управлением по условию нулевой ошибки, и сравнение его с ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ управления силовыми ключами инвертора. Установлено, что в ЭП ЭМИО с частотно-токовым способом управления погрешность реализации электромагнитного момента составляет 12 % и присутствует перерегулирование $\Delta M_{эм}=17\%$. В случае использования следящего регулятора с управлением по условию нулевой ошибки, максимальное отклонение тока в моменты коммутации от заданного опорного не превышает амплитуды пульсирующей составляющей, при этом среднее за период значение сигнала ошибки равно нулю. Разработанный регулятор позволяет формировать ток в фазах двигателя без провалов при переключении обмоток. Время переходного процесса в ЭП ЭМИО со следящим регулятором с управлением по условию нулевой ошибки в 10 раз меньше, чем в ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ. Кроме того, в разработанном регуляторе отсутствует перерегулирование, а погрешность реализации электромагнитного момента составляет 3 %, что в четыре раза меньше, чем в ЭП ЭМИО с регулятором тока, реализующим частотно-токовый способ. Таким образом, поставленная задача: улучшение точностных характеристик ЭП ЭМИО, выполнена.

6. Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанных имитационных моделей. Предложенные законы управления, алгоритмы структурно-параметрического синтеза ЭП ЭМИО и имитационные модели использовались в рамках создания аппаратно-программного моделирующего комплекса прибора «Агат-15М» и при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ОАО «НПЦ «Полус» по программе разработки ЭМИО для систем ориентации и стабилизации КА (приборов типа «Агат»), с улучшенными массогабаритными, динамическими, точностными и ресурсными характеристиками и подтвердили эффективность работы электропривода по быстродействию и пульсациям момента в различных режимах.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Завьялова О.Ю., Казанцев Ю.М. Синтез регулятора электромеханического исполнительного органа // Известия ТПУ. Т.320, № 4, 2012 г. с. 162-166.

2. Завьялова О.Ю., Казанцев Ю.М. Повышение точности управления динамическим моментом двигателя-маховика // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2012 г. Т. 126, № 1, с. 39-44.

Другие научные публикации по теме диссертации:

3. Завьялова О.Ю. Способ управления динамическим моментом маховичного электропривода // XV Труды международной научно-

практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск, 2009 г. с. 418-420.

4. Завьялова О.Ю., Лекарев А.Ф. Разработка модели и синтез регулятора маховичного электромеханического исполнительного органа // Электронные и электромеханические системы и устройства. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов. Томск, 2010 г. С. 389-398.

5. Завьялова О.Ю. Синтез регулятора электромеханического исполнительного органа системы ориентации и стабилизации космического аппарата // Сборник материалов молодежной конференции. Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике. Звездный городок, 2011 г. С. 82-91.

6. Завьялова О.Ю., Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Управление с прогнозированием в вентильном электроприводе электромеханического исполнительного органа // V Юбилейная международная научно техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» имени Г.А. Сипайлова. Томск, 12-14 октября 2011 г. с. 300-304.

7. Завьялова О.Ю., Казанцев Ю.М., Лекарев А.Ф. Разработка имитационной модели электромеханического исполнительного органа системы ориентации и стабилизации космического аппарата // Материалы XV Международной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2011 г. Ч. 1, № 4, с. 173-174.

Патенты и свидетельства о регистрации:

8. Пат. 2457610 Способ управления вращающим моментом вентильного двигателя / О.Ю. Завьялова, А.Ф. Лекарев, Ю.М. Казанцев. Оpubл.: 27.07.2012. Бюл. № 21.

Личный вклад автора:

1. Проведен анализ существующих алгоритмов управления ЭП ЭМИО;
2. Разработана имитационная модель ЭП ЭМИО для исследования его динамических характеристик;
3. Разработан закон управления ЭП ЭМИО с прогнозированием пульсирующей составляющей тока силовой цепи, обеспечивающий повышение точности управления динамическим моментом;
4. Разработаны регуляторы и модуляторы высокоточного ЭП ЭМИО.
5. Исследованы статические и динамические характеристики разработанной имитационной модели ЭП ЭМИО с высокоточным регулятором.