***На правах рукописи***

**ЛОВЛИН Сергей Юрьевич**

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОМПЛЕКСОВ ВЫСОКОТОЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

***Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы***

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ - 2013**

**Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».**

***Научный руководитель:***

**кандидат технических наук, доцент**

***Томасов Валентин Сергеевич***

***Официальные оппоненты:***

**Новиков Владислав Александрович**

**доктор технических наук, профессор, ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова», кафедра робототехники и автоматизации производственных систем, профессор.**

**Семенов Игорь Михайлович**

**кандидат технических наук, профессор, ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», кафедра систем и технологий управления, заведующий кафедрой.**

***Ведущая организация –*** **ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения».**

**Защита состоится «26» апреля 2013 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д** **212.224.07 при Национальном минерально-сырьевом университете «Горный» по адресу: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд.1166.**

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального минерально-сырьевого университета «Горный».**

**Автореферат разослан «25» марта 2013 г.**

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**

**диссертационного совета ГАБОВ В.В.**

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.**

В настоящее время наземные оптико-электронные средства (по традиции их часто называют оптическими телескопами) играют первостепенную роль в обнаружении и контроле космических объектов, особенно на больших удалениях. Несомненными и уникальными достоинствами оптических телескопов являются возможность обнаружения удаленных объектов при солнечном или лазерном подсвете на фоне ночного или сумеречного неба, включая возможность обнаружения в инфракрасном диапазоне длин волн по их собственному тепловому излучению, высокие точности определения угловых координат, возможность получения оптических изображений космических объектов и высокоточных фотометрических измерений их оптического блеска.

Для управления угловым положением оптической оси в пространстве оптический телескоп устанавливается в опорно-поворотное устройство (ОПУ), имеющее, как правило, несколько осей вращения. Разработка таких ОПУ и систем управления ими для задач контроля околоземного космического пространства является одной из самых сложных задач современного прецизионного приборостроения. Это связано с тем, что ОПУ и системы электромеханического управления, решающие задачу совмещения оптической оси телескопа и оптического изображения в его фокальной плоскости, должны обеспечивать уникально высокое качество наведения. Причем такое качество наведения должно обеспечиваться при вращающихся массах от нескольких десятков килограмм до нескольких десятков тонн, при наличии существенно нелинейных моментов трения, в том числе в подшипниковых узлах и кабельном переходе, при наличии переменных (зубцовых) моментов электродвигателя, ветровых и динамических нагрузок, с учетом конечной жесткости конструкции ОПУ и ее резонансных частот.

В этих условиях именно на цифровой следящий электропривод возлагается задача компенсировать все возможные несовершенства конструкции механических узлов телескопа, его кабельного перехода и обеспечить заданную точность при относительно невысоком быстродействии системы, определяемым низкой резонансной частотой осей ОПУ.

Следует отметить, что исследованию таких электроприводов посвящены работы Глазенко Т.А., Шрейнера Р.Т., Козярука А.Е., Зиновьева Г.С., Виноградова А.Б., Тарарыкина С.В., Розанова Ю.К., Кобзева А.В., Соколовского Г.Г., Новикова В.А., Борцова Ю.А. и др. Из проведенного анализа литературных источников можно сделать вывод, что существующие системы прецизионного электропривода во многом отвечают высоким требованиям, предъявляемым к системам такого класса. Тем не менее, появляются новые задачи с более высокими требованиями. Например, сегодня в задачах наведения предельно узких лазерных пучков (при локации навигационных и геодезических космических аппаратов, а также Луны и дальних космических аппаратов) уже необходима абсолютная, по отношению к используемой системе координат, точность наведения не хуже нескольких угловых секунд. Таким образом, развитие смежных областей техники требует постоянного увеличения эффективности прецизионного электропривода путем повышения его точности.

**Цель работы** – повышение точности позиционирования и сопровождения оптическими телескопами космических объектов за счет применения алгоритмов эффективного управления прецизионными электроприводами ОПУ телескопов траекторных измерений (ТТИ).

**Идея работы** заключается в применении алгоритмов управления прецизионными электроприводами ТТИ, компенсирующих нелинейности исполнительной электрической машины и усилительно-преобразовательного устройства (УПУ) с целью повышения точности позиционирования и сопровождения современных оптико-электронных комплексов контроля космического пространства.

**Научная новизна** работы заключается в разработке эффективных алгоритмов управления прецизионными электроприводами ТТИ, позволивших компенсировать нелинейности элементов энергоподсистемы и повысить точность позиционирования и сопровождения космических объектов.

Разработанный алгоритм компенсации влияния нелинейностей электрической машины (зубцовых пульсаций момента и момента высших гармоник потока возбуждения), в отличие от широко распространенных решений на базе таблиц поиска, не требует больших затрат ресурсов управляющего микроконтроллера и рассчитан на компенсацию только этих пульсаций момента. Разработанный алгоритм компенсации влияния нелинейностей УПУ учитывает особенности зоны нечувствительности регулировочной характеристики инвертора. Разработанные аналитические модели электропривода, учитывающие нелинейности УПУ и электрической машины, в отличие от имитационных моделей, которые широко распространены благодаря математическим пакетам моделирования, позволяют впоследствии разрабатывать эффективные алгоритмы управления прецизионным электроприводом, а также проводить достоверную техническую диагностику электрических параметров машины и качества изготовления подвижных частей ОПУ ТТИ. Разработаны алгоритмы идентификации параметров, необходимых для настройки регуляторов тока и момента, особенностью которых является учет нелинейности инвертора при идентификации по переходной характеристике. Разработан алгоритм раздельной идентификации параметров зубцовых пульсаций момента и момента высших гармоник потока возбуждения, необходимых для настройки нового алгоритма компенсации влияния нелинейностей электрической машины. Этот алгоритм учитывает характер и гармонический состав действующих на привод возмущений, что позволяет повысить точность идентификации параметров.

Достижение обозначенной цели требует решения следующих **задач**:

1. Исследование и анализ характерных особенностей исполнительных электромашин современных ОПУ, оказывающих влияние на конечную точность прецизионного электропривода.
2. Исследование и анализ характерных особенностей инверторов напряжения, питающих обмотки исполнительного двигателя, оказывающих влияние на конечную точность прецизионного электропривода.
3. Разработка алгоритмов компенсации влияния нелинейностей вентильного двигателя (ВД) на базе синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ), а также искажений выходного напряжения инвертора, вносимых падением напряжения на силовых ключах инвертора и задержкой на переключение полупроводниковых транзисторов в стойках моста.
4. Разработка математических моделей, позволяющих анализировать влияние всех рассматриваемых нелинейностей, вносимых исполнительной электрической машиной и УПУ, на конечную точность позиционирования прецизионных электроприводов и осуществлять выбор наиболее эффективных алгоритмов управления.
5. Проведение экспериментальных исследований систем прецизионных электроприводов ТТИ на испытательных стендах кафедры ЭТ и ПЭМС НИУ ИТМО, а также при заводских и полигонных испытаниях промышленных образцов оптико-электронных комплексов нового поколения.

**Методы исследований:** для решения поставленных задач использовались методы теории электрических цепей, методы теории электрических машин, методы теории автоматического управления, методы теории идентификации, методы математического моделирования сложных машинно-вентильных систем с использованием пакета Matlab, методы интерактивной отладки алгоритмов систем автоматического регулирования электроприводов с использованием программного комплекса СБПЭТ (система быстрого прототипирования электропривода телескопа) (гос.рег. № 2009611420 от 12.03.2009).

На защиту выносятся следующие новые и содержащие элементы новизны основные **положения**:

1. **Математические модели электропривода, учитывающие нелинейности, вносимые исполнительной электрической машиной и УПУ, позволяющие анализировать их влияние на конечную точность позиционирования прецизионных электроприводов и осуществлять выбор наиболее эффективных алгоритмов управления.**
2. **Алгоритмы компенсации искажений выходного напряжения инвертора, вносимых падением напряжения на силовых ключах инвертора и задержкой на переключение полупроводниковых транзисторов в стойке моста, с анализом их достоинств и недостатков.**
3. **Алгоритм раздельной идентификации и последующей компенсации зубцовых пульсаций и момента высших гармоник потока возбуждения ВД на базе СМПМ.**

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов** диссертационной работы обеспечивается строгостью используемых математических методов, совпадением результатов численных расчетов и моделирования с экспериментальными данными, полученными на стендах кафедры ЭТ и ПЭМС НИУ ИТМО и при проведении предварительных и межведомственных испытаний на заводах изготовителях ОПУ ТТИ (ОАО «Златмаш»; ОАО «106 экспериментальный оптико-механический завод»), а также при проведении полигонных испытаний оптико-электронных комплексов высокоточных наблюдений нового поколения (Алтайский оптико-лазерный центр имени Г.С. Титова, квантово-оптический комплекс в Комсомольске-на-Амуре, космодромы Плецеск и Байконур).

**Практическая значимость** результатов работы заключается в разработке алгоритмов и создании на их основе комплекта программ реального времени, обеспечивающих существенное повышение точности слежения и наведения комплексов высокоточного наблюдения. Повышение эффективности таких уникальных изделий, как ТТИ, достигается только программными средствами, без проведения дорогостоящих работ по физической модификации изделий. В результате обеспечивается существенное сокращение сроков и финансовых затрат на проведение пусконаладочных работ дорогостоящих уникальных изделий. Результаты работы рекомендованы к использованию в учебном процессе при подготовке студентов вуза по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика»

**Связь темы с научно-техническими программами.** Результаты, изложенные в диссертации, получены в ходе выполнения работ по НИР НК-430П ГК №П2479 от 19.11.2009 г. (мероприятие №1.2.2) по направлению «Многофункциональное приборостроение для промышленных систем управления» по проблеме «Разработка систем управления движением прецизионных электроприводов приборных комплексов нового поколения», в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 г», по г/б НИР № 18002 «Развитие методов проектирования систем управления силовых следящих электроприводов наведения квантово-оптических комплексов нового поколения» и ряда х/д НИР №№ 29900, 29917, 29918, 211091, 212187, 28828, 211144, 28852, 211106, проводимых по заказу ОАО Научно производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения".

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы:

1. При разработке и изготовлении цифрового электросилового привода (ЦЭСП) системы наведения ОПУ СМ-649-05 в рамках выполнения хоздоговорных НИР №№ 29900, 29917,29918, 211091, 212187 по заказам ОАО НПК СПП;
2. При разработке и изготовлении ЦЭСП системы наведения ОПУ СМ-799 в рамках выполнения хоздоговорной НИР 28852 по заказу ОАО НПК СПП;
3. При разработке и изготовлении ЦЭСП системы наведения ОПУ СМ-834 в рамках выполнения хоздоговорных НИР 28828 , 211144 по заказам ОАО НПК СПП;
4. При разработке и изготовлении ЦЭСП системы наведения ОПУ АЗТ-28М в рамках выполнения хоздоговорной НИР № 211106 по заказу ОАО НПК СПП;

**Личный вклад автора.** Произведен анализ характерных особенностей исполнительных электромашин современных опорно-поворотных устройств, оказывающих влияние на конечную точность прецизионного электропривода. Произведен анализ характерных особенностей инверторов напряжения, питающих обмотки исполнительного двигателя, оказывающих влияние на конечную точность прецизионного электропривода. Разработаны математические модели, позволяющих анализировать влияние всех рассматриваемых нелинейностей, вносимых исполнительной электрической машиной и УПУ, на конечную точность позиционирования прецизионных электроприводов. Разработаны алгоритмы компенсации влияния нелинейностей ВД на базе СМПМ и искажений выходного напряжения инвертора, вносимых падением напряжения на силовых ключах инвертора и задержкой на переключение полупроводниковых транзисторов в стойке моста. Разработан комплекс эффективных программ повышения точности позиционирования и сопровождения оптическими телескопами космических объектов с возможностью его дальнейшей автоматизации.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых (Санкт-Петербург, 2010); XL Научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2011); VIII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых (Санкт-Петербург, 2011); XLI Научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2012); XIV Конференция молодых ученых "Навигация и управление движением" (Санкт-Петербург, 2012); I Всероссийский конгресс молодых ученых (Санкт-Петербург, 2012); VII Международная конференция по автоматизированному электроприводу (Иваново, 2012).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 работах, в том числе 7 публикаций в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 120 источников. Основная часть работы изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 2 таблицы.

**Во введении** обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы ее цель и задачи исследований, отражены научные результаты и положения, выносимые на защиту, практическая значимость результатов диссертации.

**В первой главе** представлен анализ прецизионных электроприводов, в том числе электроприводов ОПУ современных оптико-электронных комплексов, а также требований, предъявляемых к ним. Рассмотрены нелинейности и внутренние возмущения, существенно влияющие на качественные характеристики прецизионного электропривода, и существующие методики устранения этого влияния.

**Во второй главе** представлен анализ особенностей ВД на базе СМПМ и УПУ, управляющих ими. Приведены математические модели, разработанные автором и позволяющие анализировать влияние всех рассматриваемых нелинейностей, вносимых исполнительной электрической машиной и УПУ, на конечную точность позиционирования прецизионных электроприводов и осуществлять выбор наиболее эффективных алгоритмов управления.

**В третьей главе** предложены алгоритмы идентификации и компенсации влияния нелинейностей ВД на базе СМПМ и искажений выходного напряжения инвертора, вносимых падением напряжения на силовых ключах инвертора и задержкой на переключение полупроводниковых транзисторов в стойке моста. Произведено математическое моделирование их работы в пакете Matlab.

**Четвертая глава** посвящена проведению и анализу экспериментальных исследований систем прецизионных электроприводов ТТИ на испытательных стендах кафедры ЭТ и ПЭМС НИУ ИТМО. Проведено сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных исследований.

**Заключение** содержит основные выводы и результаты диссертационной работы.

**ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**:

1. **Математические модели нелинейностей, вносимых исполнительной электрической машиной и усилительно-преобразовательным устройством, позволяющих анализировать их влияние на конечную точность позиционирования прецизионных электроприводов и осуществлять выбор наиболее эффективных алгоритмов управления.**

Для разработки математических моделей электропривода, учитывающих нелинейности, вносимые исполнительной электрической машиной и УПУ, во второй главе рассматриваются две модели электропривода с вентильным двигателем на базе СМПМ. В качестве базового алгоритма управления силовыми ключами инвертора выбран алгоритм синусоидальной ШИМ с двухсторонним пилообразным опорным напряжением, реализуемый как в аналоговой форме, так и в цифровой с применением микропроцессорной техники. В таком случае управляющее воздействие γ\* для каждой из фаз двигателя A, B и C выглядит следующим образом:

  (1)

где  – обобщенное управляющее воздействие для трехфазной системы, принимающее значения из интервала [-1;1];  - электрический угол поворота двигателя, а относительные длительности открытия верхнего () и нижнего () ключей для любой из стоек инвертора:

  (2)

В обеих моделях электропривод рассмотрен с эквивалентной одномассовой нагрузкой. Воздушный зазор в электрической машине предполагается равномерным, а также не учитываются высшие гармоники потокосцепления возбуждения. Первая модель содержит в себе обобщенную модель ВД на базе СМПМ:

  (3)

где  - момент инерции эквивалентной одномассовой нагрузки;  - момент сопротивления,  – электромагнитная постоянная времени, *сe* – конструктивная постоянная по ЭДС,  – сопротивление фазы двигателя,  – развиваемый двигателем момент,  – угловая скорость двигателя,  – угол поворота двигателя,  – напряжение в звене постоянного тока. Данная модель облегчает синтез алгоритмов управления, но не позволяет анализировать нелинейности, вносимые усилительно-преобразовательным устройством, по причине отсутствия в модели напряжений на выходе инвертора в явном виде.

Для этой цели в работе предложена вторая модель электропривода, соответствующая СМПМ с соединением обмоток статора по схеме «звезда» без нулевого провода:

 (4)

где , ,  – напряжения на выходе инвертора; , ,  – противо-ЭДС в каждой фазе двигателя; , ,  – фазные токи двигателя. Эта модель в отличие от обобщенной позволяет анализировать влияние искажений выходных напряжений инвертора на фазные токи и электромагнитный момент ВД и синтезировать регуляторы фазных токов ВД (рис. 1).

С помощью модели (4) был получен момент  (рис. 1б), позволяющий учитывать в идеальной модели ВД искажения выходного напряжения инвертора, вносимых падением напряжения на силовых ключах инвертора и задержкой на переключение полупроводниковых транзисторов в стойке моста:

 , (5)

причем

где  – относительная задержка, вводимая для безопасного переключения ключей инвертора,  – граничное падение напряжение на силовом ключе, а

 

В первой главе рассмотрены зависимости возмущающего момента  от величины управляющего воздействия  и относительной задержки , проанализирован гармонический состав возмущающего момента . Полученные данные помогают заранее оценить точность замкнутой системы управления при различных скоростях вращения с учетом нелинейностей, вносимых усилительно-преобразовательным устройством, а также правильно рассчитать напряжение источника питания необходимое для достижения требуемых моментов ВД.

Другая нелинейность, не учитываемая в ранее разработанных моделях ВД, – неравномерность электромагнитного момента в зависимости от угла поворота ротора, вызванная неравномерностью воздушного зазора СМПМ. Пульсации электромагнитного момента СМПМ прецизионного электропривода ОПУ ТТИ соизмеримы с пульсациями внешних возмущений (момента трения, момента кабельного перехода, ветрового момента и т.п.) (рис. 2).

Наличие пазов на статоре электрической машины приводит к возникновению зубцового момента:

  (6)

где  – число пазов на статоре,  – число полюсов,  – амплитуда -ой гармоники зубцового момента, зависящая от формы, ширины и глубины пазов, от соотношения числа пазов и числа полюсов.

Наличие высших гармоник потока возбуждения приводит к возникновению момента высших гармоник:

 (7)

где  – амплитуда n-ой гармоники потока возбуждения относительно 1-ой.

В отличие от нелинейностей УПУ, оценить заранее влияние нелинейностей электрической машины затруднительно. Поэтому в первой главе рассматривается только гармонический состав зубцового момента и момента высших гармоник. Эти данные в дальнейшем используются для идентификации и последующей компенсации влияния нелинейностей электрической машины.

1. **Алгоритмы компенсации искажений выходного напряжения инвертора, вносимых падением напряжения на силовых ключах инвертора и задержкой на переключение полупроводниковых транзисторов в стойке моста, с анализом их достоинств и недостатков.**

Решение данной проблемы программным способом можно разделить на два основных метода. Первым является компенсация, основанная на заранее известной модели возмущения и введении соответствующих поправок для устранения его влияния (на рис. 2 блок компенсации нелинейностей УПУ). Второй метод заключается в построения регуляторов тока или момента, которым уже не требуется точное описание возмущения, но необходимы параметры всей системы в целом для обеспечения стабильной и эффективной работы (на рис. 2 блок регулятора тока).

В третьей главе рассмотрен один из возможных способов компенсации, относящихся к первому методу, в соответствии с которым управляющие сигналы , ,  для фаз инвертора принимают вид:

  (8)

При значениях управляющего воздействия γ\* меньше удвоенной относительной задержки  и при малом токе в фазе существуют промежутки времени на периоде коммутации ключей, когда ток не протекает через силовые ключи. В такой ситуации независимо от значения γ\* среднее значение фазного тока остается равным нулю. Это явление получило название «феномена удержания нулевого тока». Оно проявляется при малых значениях , когда управляющее воздействие γ\* принимает значения внутри зоны нечувствительности, как в системах без компенсации, так и в системах с вышеописанной компенсацией, в результате чего форма тока отличается от идеальной (рис. 4).

В работе разработан усовершенствованный алгоритм, который на основании анализа среднего значения фазного тока и управляющего воздействия, позволяет устранить «феномен удержания нулевого тока» с сохранением корректной компенсации искажений выходного напряжения инвертора.

Относительная задержка  складывается из программной и аппаратной задержек. Программная задается самим разработчиком системы управления прецизионным электроприводом, а аппаратная существует в любом интеллектуальном модуле управления силовыми ключами, но величина ее производителями модулей не приводится. В итоге относительная задержка  заранее неизвестна, поэтому возникает задача идентификации этого параметра для успешной компенсации влияния нелинейностей, вносимых УПУ. В третьей главе подробно рассматриваются особенности идентификации данной задержки.

Способы компенсации, относящиеся ко второму методу, лишь ослабляют влияние нелинейностей УПУ, и в то же время позволяют ослаблять влияние и других возмущений. К ним относятся регуляторы момента и тока ВД. Регулятор момента синтезируется на базе обобщенной модели (3), а регулятор тока – на базе модели (4). Следует отметить, что возмущение, вызванное нелинейностью УПУ, в случае использования контура тока значительно ослабляется, т.к. является для него кусочно-постоянным.

Расчет регуляторов контуров тока и момента требует знания параметров объекта управления, поэтому возникает задача их идентификации. В третьей главе рассмотрены особенности идентификации параметров объекта управления при наличии нелинейностей усилительно-преобразовательного устройства. Показано, что предварительное введение алгоритма компенсации существенно упрощает эту процедуру.

В качестве окончательного решения данной задачи предложено объединение контура тока с усовершенствованным алгоритмом компенсации влияния нелинейностей УПУ. Это позволяет сочетать преимущества контура тока и алгоритма компенсации, робастность и возможность ограничения тока в фазах двигателя с полной компенсацией влияния нелинейностей УПУ и упрощением технической диагностики системы (определением параметров объекта управления, возможностью получения верной информации о среднем напряжении в фазах двигателя).

1. **Алгоритм раздельной идентификации и последующей компенсации зубцовых пульсаций и момента высших гармоник потока возбуждения вентильного двигателя на базе синхронной машины с постоянными магнитами.**

Обязательным условием компенсации зубцовых пульсаций и момента высших гармоник является наличие контура тока или контура момента в системе управления прецизионного электропривода (рис. 3), позволяющих идентифицировать и компенсировать влияние нелинейности ВД. Для успешной компенсации должно выполняться следующее равенство:

  (12)

где  – амплитуда токов в фазах двигателя, соответствующая в идеальной модели желаемому моменту,  – компенсирующая добавка к амплитуде задания по току, имеющая вид:

 (13)

Идентификация параметров  и  проводится при замкнутом контуре скорости. Наличие гармонических составляющих в ошибке по скорости на частотах, соответствующих частотам момента гармоник и зубцового момента приведет к погрешности идентификации параметров моделей этих моментов, и соответственно к возникновению таких же ошибок после введения компенсации. Понизить ошибку измерения момента и соответственно погрешность компенсации, можно понизив скорость вращения или увеличив полосу пропускания замкнутой системы. Полоса пропускания ограничена резонансными частотами ОПУ. А низкая скорость вращения ротора приводит к увеличению времени эксперимента. При постоянном задании на контур скорости динамическим моментом можно пренебречь, и тогда:

  (14)

где  – момент трения,  – момент кабельного перехода (принимаем при постоянной скорости вращения линейным),  – момент дисбаланса оптической оси.

Момент, вызванный наличием высших гармоник потока возбуждения, определяется по результатам полученных графиков токов при движении в положительную сторону () и в отрицательную сторону () для  в (1) и графиков токов  и для . Этим данным соответствует уравнение:

 (15)

Параметры  достаточно точно определяются методом наименьших квадратов.

Тогда для определения зубцового момента можно записать следующее уравнение:

  (16)

При принятых допущениях относительно линейности  и при несовпадении периода  с периодом гармоник , параметры  достаточно точно определяются методом наименьших квадратов.

Данный метод компенсации, в отличие от широко используемого табличного метода, позволяет экономить ресурсы микроконтроллера, компенсировать момент высших гармоник с учетом изменения амплитуды токов  в фазах, раздельно определять зубцовый момент и момент, обусловленный высшими гармоническими составляющими потока возбуждения.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, содержится решение задачи повышения точности позиционирования и сопровождения оптическими телескопами космических объектов с применением алгоритмов эффективного управления прецизионными электроприводами опорно-поворотных устройств телескопов траекторных измерений. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Произведен анализ характерных особенностей исполнительных электромашин современных опорно-поворотных устройств, оказывающих влияние на конечную точность прецизионного электропривода.
2. Произведен анализ характерных особенностей инверторов напряжения, питающих обмотки исполнительного двигателя, оказывающих влияние на конечную точность прецизионного электропривода.
3. Разработаны математические модели, позволяющие анализировать влияние всех рассматриваемых нелинейностей, вносимых исполнительной электрической машиной и УПУ, на конечную точность позиционирования прецизионных электроприводов.
4. Разработаны алгоритмы компенсации влияния нелинейностей ВД на базе СМПМ и искажений выходного напряжения инвертора, вносимых падением напряжения на силовых ключах инвертора и задержкой на переключение полупроводниковых транзисторов в стойке моста.
5. Разработан комплекс эффективных программ повышения точности позиционирования и сопровождения оптическими телескопами космических объектов с возможностью его дальнейшей автоматизации.

Результаты применения алгоритмов эффективного управления при разработке прецизионного электропривода ОПУ СМ-799 и ОПУ СМ-834 отображены в таблице 1.

**Основное содержание диссертации опубликовано**

**в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. Арановский С.В., **Ловлин С.Ю.**, Александрова С.А. Метод идентификации электромеханической системы при переменном моменте трения // Информационно-управляющие системы. – 2012. – Вып.1 (56). – С. 8–11.
2. **Ловлин С.Ю.**, Цветкова М.Х., Жданов И.Н. Программируемый формирователь траектории движения следящего электропривода // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – Вып. 2 (72). – С. 113-117.
3. Ильина А.Г., **Ловлин С.Ю.**, Тушев С.А. Синтез ЛКГ-регулятора прецизионного следящего электропривода оси телескопа траекторных измерений // Известия вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – Вып. 6. – С.86-91.
4. Демидова Г.Л., **Ловлин С.Ю.**, Цветкова М.Х. Синтез следящего электропривода азимутальной оси телескопа с эталонной моделью в контуре положения // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 2. – С. 77-81.
5. Томасов В.С., **Ловлин С.Ю.**, Тушев С.А., Смирнов Н.А. Искажение выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя прецизионного электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 84-88.
6. Томасов В.С., **Ловлин С.Ю.**, Егоров А.В. Алгоритмы компенсации пульсаций момента прецизионного электропривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – Вып. 2. – С. 77-83.
7. **Ловлин С.Ю.**, Арановский С.В., Смирнов Н.А., Цветкова М.Х. Сравнение различных подходов к построению линейных систем управления прецизионными электроприводами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – Вып. 3. – С. 32–39.

**в прочих изданиях:**

1. **Ловлин С.Ю.**, Цветкова М.Х.Алгоритм настройки контура тока с учетом нелинейности усилительно-преобразовательной системы // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – С. 213-216.
2. **Ловлин С.Ю.**, Цветкова М.Х. Компенсация ошибки подразбиения датчика угловых перемещений типа Renishaw в прецизионных электроприводах // Альманах научных работ молодых ученых XLI научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – С. 143–148.
3. Томасов В.С., Толмачев В.А., **Ловлин С.Ю.**, Гурьянов А.В., Денисов К.М. Сервоприводы систем наведения высокоточных оптико-механических комплексов // Сервопривод. Доклад научно-практического семинара. – М: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 8-20.
4. **Ловлин С.Ю.**, Цветкова М.Х. Влияние точности установок головок оптического датчика Renishaw на конечную точность позиционирования следящей оси телескопа // Сборник тезизов докладов конгресса молодых ученых. Труды молодых ученых. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – Вып. 2. – С. 277-278.
5. **Ловлин С.Ю.**, Цветкова М.Х.Выбор электродвигателя для системы управления телескопа траекторных измерений, находящегося на подвижном основании // Сборник тезисов докладов I Всероссийского конгресса молодых ученых. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – Вып. 2. – С. 286-287.
6. Салов Д.И., **Ловлин С.Ю.**Следящий электропривод гелиоустановки // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Труды молодых ученых. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – Вып. 2. – С. 281.
7. Тушев С.А., **Ловлин С.Ю.**Информационная подсистема цифрового электросилового привода с компенсацией пульсаций момента вентильного двигателя // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – Вып. 2. – С. 250-251.
8. Цветкова М.Х., **Ловлин С.Ю.**Коэффициент использования источника питания по напряжению при различных способах ШИМ // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – Вып. 2. – С. 239-240.
9. Егоров А.В., **Ловлин С.Ю.**Особенности структур энергоподсистем с большими маховыми массами // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – Вып. 2. – С. 241-242.
10. Цветкова М.Х., **Ловлин С.Ю.**Исследование адаптивных алгоритмов управления следящих электроприводов // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – Вып. 5. – С. 28-29.
11. **Ловлин С.Ю.**, Цветкова М.Х.Планирование траектории следящего электропривода с ограничением скорости и ускорения // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – Вып. 5. – С. 20-21.

Рис.2. Спектральный состав электромагнитного момента СМПМ (1) и внешних возмущений (2) при вращении со скоростью 1град/c азимутальной оси СМ-799 (а) и СМ-834 (б).

б)

а)

Рис. 1. Зависимости относительного фазного тока (а) без учета влияния «мертвого времени» (1) и с учетом влияния «мертвого времени» (2) и относительного возмущающего момента *Mdead* от электрического угла

а)

б)

Инвертор

+

–

*U*DC

N

S

Регулятор тока

Компенсация влияния нелинейностей УПУ

Преобразова-тель задания

*ia*

*ib*

φэл

*ia.зад*

*ib.зад*

*Im*

γ*a*

γ*b*

γ*c*

Δγ*a*

Δγ*b*

Δγ*c*

γ*a*

γ*b*

γ*c*

+

+

+

СМПМ

Компенсация влияния нелинейностей СМПМ

*I\*m*

αдп

+

Регулятор скорости

Регулятор угла

–

(αn – αn-1)/*Td*

Ω*ср*

–

Ω*зад*

α*зад*

*p*αn + θ\*

Рис. 3. Структурная схема системы управления с контуром тока, с усовершенствованным алгоритмом компенсации влияния нелинейностей УПУ и с компенсацией влияния нелинейностей СМПМ.

Таблица 1. Результаты повышения эффективности прецизионных приводов ОПУ ТТИ.

Рис.4. Относительный ток фазы в установившемся режиме: 1) без учета искажения напряжения инвертора, 2) с учетом искажения и 3) с компенсацией

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Требование по точности согласно техническому заданию | СКО ошибки при разных скоростях слежения без алгоритмов эффективного управления  | СКО ошибки при разных скоростях слежения с алгоритмами эффективного управления |
| СМ-799, ось А1 | 10 угл. сек. | 25град/с – 2,7”1град/с – 0,58”5”/с – 0, 13” | 25град/с – 1,19”1град/с – 0,43”5”/с – 0, 13” |
| СМ-799, ось А2 | 10 угл. сек. | 25град/с – 0,88”1град/с – 0,21”5”/с – 0, 13” | 25град/с – 0,6”1град/с – 0,2”5”/с – 0, 13” |
| СМ-834, азимутальная ось | 1 угл. сек. | 8град/с – 0,91”1град/с – 0,7”5”/с – 0,14” | 8град/с – 0,4”1град/с – 0,5”5”/с – 0, 14” |
| СМ-834, угломестная ось | 1 угл. сек. | 8град/с – 1,32”1град/с – 0, 4”5”/с – 0,013” | 8град/с – 0,36”1град/с – 0, 07”5”/с – 0,013” |