

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
**«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ
РОБОТОТЕХНИКИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ»**
(ЦНИИ РТК)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного автономного
научного учреждения «Центральный научно-
исследовательский и опытно-конструкторский
институт робототехники
и технической кибернетики», к.т.н.

_____ А.В. Попов

« 30 » _____ 2021 г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного автономного научного учреждения
«Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики»
на диссертацию Слободзяна Никиты Сергеевича
«Прецизионное управление линейным приводом механизма
с параллельной структурой космического применения»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (в машиностроении)

1 Актуальность темы исследования

Решение проблем повышения точности и надежности бортовых приборов и устройств современных космических аппаратов (КА) является важным научно-техническим направлением. Отвечать таким запросам можно, в том числе, путем создания качественно новых исполнительных механизмов. Поэтому вполне обоснован выбор в диссертационной работе Слободзяна Н.С. в качестве объекта исследования привода механизма с параллельной структурой, отличающегося высокой точностью и нагрузочной способностью. При этом серьезными научными и техническими вызовами являются проблемы обеспечения точности и безотказности работы таких устройств в экстремальных условиях космического пространства.

В диссертации рассмотрены вопросы повышения точностных характеристик линейных приводов механизма с параллельной структурой (МПС) типа «гексапод» и самого МПС космического применения. Решение этих вопросов открывает новые возможности для решения всё более сложных задач КА.

С учетом существенных эксплуатационных ограничений, накладываемых на бортовую аппаратуру КА, связанных с ограниченной номенклатурой коммерчески

доступной элементной базы, отсутствием необходимых прецизионных датчиков робототехнических устройств космического применения, проблема повышения точности приводов и механизмов в условиях этих ограничений является важной научной и практической задачей. Таким образом, тема диссертационной работы «Прецизионное управление линейным приводом механизма с параллельной структурой космического применения» является актуальной.

2 Структура, содержание и оформление диссертации

Диссертационная работа включает введение, основную часть из четырех глав, заключение, список литературы, а также приложение с результатами экспериментальных исследований точности линейного привода. Обоснование актуальности диссертационной работы, постановка задач и целей исследования, оценка практической значимости и научной новизны работы даны автором во введении.

Цель работы — разработка методов, алгоритма, системы управления линейным приводом (ЛП) механизма с параллельной структурой, обеспечивающих высокую точность работы приводов и МПС космического применения на их основе.

В первой главе автором выполнен анализ проблем повышения точности механизмов с параллельной структурой с учетом отечественного и зарубежного опыта специалистов. Рассмотрены перспективы применения МПС в космической технике, в частности для наведения крупногабаритных радиотелескопов и их контррефлекторов.

Автором отмечено практическое отсутствие прецизионных датчиков положения, с помощью которых можно было бы построить замкнутую по выходным координатам систему управления на базе МПС, которая бы отвечала высоким требованиям по точности наведения и ориентации полезной нагрузки. Далее автором выполнен анализ ряда источников погрешностей работы МПС, выявлены основные ошибки: геометрические, температурные, ошибки управления, ошибки, связанные с механическими деформациями. Автор показывает, что линейный привод МПС является одним из основных источников его ошибок. Во второй главе автором предложена и обоснована структурная схема линейного привода МПС с косвенной обратной связью по положению, с учетом отсутствия возможности применения коммерчески доступных прецизионных датчиков линейного положения в МПС космического исполнения.

Автор далее рассмотрел источники ошибок позиционирования штока «разомкнутого» линейного привода, выделил и оценил их вклад в конечную точность ЛП, наметил возможные пути минимизации таких ошибок. В третьей главе автором рассмотрен линейный привод как элемент системы автоматического управления. Предложена математическая модель привода, рассмотрены особенности применения наблюдателя состояния для управления ЛП. Автором предложена и синтезирована система подчиненного регулирования координат МПС с учетом требований к динамике работы гексапода. Разработана система управления МПС в пространстве обобщенных координат, позволяющей осуществлять управление по спланированной траектории движения подвижной платформы с объектом. Для ЛП автором предложен алгоритм прецизионного управления линейным приводом, построенный на основе методов компенсации основных источников ошибок ЛП; разработанные методы обоснованы аналитически и с помощью конечно-элементного моделирования.

В четвертой главе для подтверждения теоретически предложенных методов, алгоритмов и системы управления ЛП, а также системы управления МПС, автором выполнены соответствующие экспериментальные исследования и имитационное моделирование. Для чего разработана компьютерная имитационная модель линейного

привода, с помощью которой далее показана устойчивость системы управления и процесс работы ЛП в режиме слежения. Выполнено имитационное моделирование динамики гексапода, управляемого по предложенному алгоритму планирования траектории в пространстве обобщенных координат. Затем автором выполнены в соответствии со специальными стандартами ГОСТ и проанализированы экспериментальные исследования точности ЛП с системой прецизионного управления на основе предложенных ранее методов и алгоритмов.

В заключении автором подведен итог проделанной работе и представлены основные результаты выполненных исследований и выводы.

В содержательной части диссертации приведено достаточное количество исходных данных, имеются пояснения, рисунки, графики, примеры, подробные расчеты. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

3 Новизна исследования и полученных результатов и рекомендаций, сформулированных в диссертации заключается в том, что автором предложены:

- оценка погрешности линейного привода МПС космического применения, в составе которого отсутствует датчик выходного положения; оценка выполнена автором на основе совокупного анализа теоретических, расчетных и экспериментальных данных для доминирующих источников ошибок такого разомкнутого ЛП, работающего в условиях вакуума и широкого диапазона температур;

- специальные методы и алгоритм управления линейным приводом, позволяющие учесть и компенсировать при работе ЛП основные ошибки — систематическую погрешность шарико-винтовой передачи, тепловые и механические деформации;

- структурная схема линейного привода и его высокоточной системы управления (СУ), обеспечивающие снижение погрешности линейного привода на порядок (до единиц микрометров); при этом предложенная структура ЛП и СУ обеспечивает возможность практической реализации на основе существующих на рынке электрорадиоизделий, датчиков и других элементов космического исполнения;

- система траекторного управления подвижной платформой гексапода, предназначенная для обеспечения возможности контроля и ограничения скоростей, ускорений и рывков при движении объекта управления.

Конкретное личное участие автора в получении результатов диссертации заключается в том, что автором разработаны методы, алгоритмы и системы управления линейным приводом и гексаподом, разработаны конечно-элементные и компьютерные имитационные модели привода, выполнены моделирование и экспериментальные исследования работы линейного привода, разработаны программная и аппаратная составляющие исследовательского комплекса (стенда).

4 Достоверность и обоснованность исследования

При анализе источников погрешностей автором также использовалась информация из достоверных литературных источников. Корректные допущения в приведенных строгих математических выкладках также обеспечивают достоверность результатов работы и обоснованность научных положений.

Автор использовал современное программное обеспечение, сертифицированное испытательное оборудование, а также современные методики сбора, обработки исходной информации, результатов испытаний и компьютерного моделирования.

Подтверждением теоретических результатов служат экспериментальные данные, полученные в процессе исследования линейного привода с использованием

программно-аппаратного комплекса, разработанного автором. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

5 Значимость для науки и практики результатов исследования, рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты, полученные автором, позволяют оценить влияние различных факторов на конечную точность линейного привода. Обоснованы и даны аналитические формулы для расчета тепловых деформаций при неравномерном и равномерном тепловом поле линейного привода, приведены непосредственные рекомендации по установке датчиков температуры, а также определению параметров аналитических выражений для вычисления компенсационных воздействий.

Предложенные автором методы управления позволяют повысить точность ЛП программным способом, без необходимости использования малодоступных датчиков. В процессе исследования предложены схемы линейного привода, его системы управления, СУ гексапода, готовые к практической реализации с учетом особенностей воздействия факторов космического пространства и ограниченной элементной базы.

Проведенные научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач в рассматриваемой области. Высокая точность работы и другие свойства предложенных и исследованных в работе линейного привода, его системы управления, а также МПС типа «гексапод» с системой траекторного управления позволяют рекомендовать данные устройства к использованию в различных областях техники: испытательные стенды, мехатронные исполнительные устройства, системы наведения и стабилизации и др.

6 Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе

Автором было опубликовано 24 печатных работы, включая 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в зарубежных журналах перечня Scopus, 4 свидетельства о государственной регистрации программ, а также статьи из сборников РИНЦ. Таким образом, основные результаты автором апробированы в полной мере и соответствуют содержанию диссертации. Автореферат диссертации в полной мере соответствует содержанию диссертации.

7 Замечания по содержанию и оформлению, общая оценка диссертации

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания.

1. В главе 3 оказано, что позиционирование и наведение крупногабаритной нагрузки целесообразно выполнять по-отдельности и поочередно для каждой координаты вектора $\mathbf{q}$. При этом вектор $\mathbf{q}$ содержит в себе декартовы координаты и Эйлеравы углы. Очевидно, что при близости Эйлеравых углов к карданному замку (т.н. gimball lock) управление по каждой координате отдельно потребует больших относительных перемещений всего механизма, при этом могут быть значительные перерегулирования. При этом ранее из текста диссертации следует, что управление гексаподом на уровне реализации осуществляется в кватернионах. Автору следовало бы более четко разъяснить этот момент применительно к траекторному управлению.

2. При описании процедуры калибровки линейного привода и компенсации систематической погрешности шарико-винтовой передачи автор упоминает применение конкретного алгоритма предварительной фильтрации калибровочных значений. Выбор этого алгоритма автором не обосновывается. Следовало бы оценить влияние различных способов фильтрации на конечную точность привода.

3. В работе указан довольно широкий температурный диапазон работы гексапода и его линейных приводов, однако не даны пояснения, чем обусловлены такие исходные данные и с чем связаны такие температурные перепады при реальной работе МПС в составе космической обсерватории.

4. В главе 4 при анализе устойчивости расширенного фильтра Калмана автор приводит на рис. 4.5 графики изменения значений диагональных элементов апостериорной ковариационной матрицы $P_{k|k}$, однако следовало бы привести на рисунке и единицы измерения значений p_{11} , p_{12} и т.д.

Приведенные замечания не влияют на суть выполненной работы и полученные результаты и могут быть учтены при проведении дальнейших исследований. Отметим, что общая оценка диссертации Слободзяна Н.С. положительная, в работе соблюдается соответствие поставленных целей и полученных результатов.

Заключение

Диссертация выполнена в соответствии с требованиями п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемыми к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, так как является законченной научно-квалификационной работой, выполнена автором самостоятельно, обладает научной новизной и практической значимостью и содержит в себе решение актуальной для перспективных отечественных космических миссий задачи повышения точности управления линейным приводом механизма параллельной структуры.

Автор работы Слободзян Никита Сергеевич достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении).

Диссертация и автореферат Слободзяна Никиты Сергеевича рассмотрены, а отзыв обсужден и одобрен на заседании секции №1 научно-технического совета ЦНИИ РТК от 8 апреля 2021 г., протокол заседания №1.

Заместитель главного конструктора
ЦНИИ РТК, к.т.н.



И.Ю. Даляев

Научный сотрудник



И.В. Шардыко

Ученый секретарь
ЦНИИ РТК, к.т.н.



Б.А. Спасский

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК)

Почтовый адрес: 194064, Санкт-Петербург, Калининский р-н, Тихорецкий пр-кт, д. 21.

Тел.: +7 (812) 552-01-10. E-mail: rtc@rtc.ru. Web-сайт: <https://rtc.ru>.

личное подписание Даляева И.Ю., Шардыко И.В., Спасского Б.А. удостоверяю, начальником отдела кадров Беренкова Р.Р. 30.08.2021

