

На правах рукописи



Слободзян Никита Сергеевич

**ПРЕЦИЗИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ПРИВОДОМ
МЕХАНИЗМА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ
КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

05.11.16 — Информационно-измерительные и управляющие системы
(в машиностроении)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат техн. наук, доцент
Коротков Евгений Борисович

Санкт-Петербург — 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

**НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ**

Коротков Евгений Борисович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Системы приводов, мехатроника и робототехника» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ
ОППОНЕНТЫ**

Хейло Сергей Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
и.о. заведующего кафедрой теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина»

Белоножко Павел Петрович,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)»

**ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ**

ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»

Защита состоится «28» сентября 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.075.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой пр., д. 61, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОНТИ федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук и на сайте института по адресу <http://www.ipme.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.075.02.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.075.02,
кандидат технических наук

Кучмин А.Ю.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные отечественные и иностранные космические аппараты (КА) предназначены для решения широкого круга задач, от обеспечения телерадиовещания и работы глобальных систем спутниковой связи до исследования галактик, черных дыр, реликтового излучения и других объектов Вселенной.

Одной из основных проблем, стоящих перед отечественной космонавтикой, является повышение конкурентоспособности выпускаемых устройств путем снижения себестоимости продукции, одновременно с ростом их точности, надежности и энергоэффективности. В связи с этим, для обеспечения позиционирования по линейным координатам и наведения по угловым координатам научной и технологической аппаратуры космических аппаратов (антенны, телескопы и др.) перспективно применение механизмов с параллельной структурой (МПС), в основе которых лежит замкнутая кинематическая цепь. Такие механизмы обладают рядом важных преимуществ перед механизмами с разомкнутой последовательной кинематической структурой: высокая жесткость, точность и грузоподъемность конструкции.

Линейный привод (ЛП), являясь унифицированным исполнительным модулем МПС, определяет статические и динамические точностные характеристики всего механизма, работоспособность в условиях космической среды, а также надежность системы позиционирования и наведения аппаратуры относительно космического аппарата.

Совокупность современных требований к точности позиционирования и наведения аппаратуры КА в десятки микрометров и десятки угловых секунд соответственно накладывает жесткие требования к погрешностям работы линейных приводов МПС на уровне единиц микрометров при диапазоне перемещения в сотни миллиметров. Наиболее существенными источниками ошибок по своему вкладу в суммарную погрешность работы ЛП являются систематические ошибки механической передачи, тепловое изменение размеров элементов конструкции привода, а также упругие деформации элементов ЛП.

Для достижения наибольшей точности привода и минимизации указанных ошибок необходимо замыкать контур управления обратной связью по выходной координате с помощью датчиков линейного положения. В то же время, экстремальные условия внешней среды, в которых функционирует аппаратура космического аппарата, ограничивают применение существующей компонентной базы, преимущественно датчиков линейного положения. Прежде всего, к компонентам ЛП и МПС (при обеспечении необходимых точностных характеристик) предъявляются жесткие эксплуатационные требования стойкости к ионизирующему излучению, вакууму, широкому диапазону рабочих температур, а также высокой надежности. Кроме того, космический аппарат и его полезная нагрузка должны иметь минимальную массу в целях снижения затрат на выведение полезной нагрузки. Указанные

особенности накладывают ряд ограничений на проектирование и изготовление ЛП и МПС на его основе. Вместе с тем очевидно, что повышение точности современных исполнительных устройств должно опираться не только на технологические возможности производства, но и использовать достижения в области адаптивных, самонастраивающихся систем управления.

В связи с этим, **актуальность** приобретает разработка методов, алгоритма и системы прецизионного управления линейным приводом, обеспечивающих требуемую точность работы линейного привода и механизма с параллельной структурой на его основе с учетом указанных выше ограничений. Актуальность подтверждается выполнением настоящей работы в рамках комплексного проекта (НИОКТР) по созданию высокотехнологичного производства в соответствии с постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 года № 218.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросы анализа и синтеза прецизионных механизмов с параллельной структурой, систем управления МПС рассматривались в работах А. Ш. Колискора, А. Ф. Крайнева, В. А. Глазунова, С. В. Хейло, Л. А. Рыбак, Б. Р. Андриевского, П. П. Белоножко, Ю. Н. Артеменко, Ю. В. Подураева и др. отечественных и иностранных специалистов.

В общем случае существует два пути повышения точности исполнительных механизмов: устранение источников ошибок, возникающих при проектировании, изготовлении и в процессе работы, а также их учет и компенсация в ходе непосредственной эксплуатации. Первый подход, экстенсивный, подразумевает применение специальных мер по ходу проектирования и изготовления механизма, которые позволили бы устранить или минимизировать ошибки. Обеспечение высокой точности исполнительных механизмов на этапе их изготовления связано с конструктивными решениями, характеристиками технологического обрабатывающего оборудования, режимами обработки, свойствами материалов. Так, в рассматриваемом классе линейных приводов основным элементом является линейная механическая передача. Вопросы повышения точности таких механизмов, в том числе космического применения, исследовались А. И. Турпаевым, В. С. Янгуловым, Д. С. Блиновым, В. Н. Ражиковым, А. В. Юсовым, Т. Мішга, М. С. Lin, A. Kamalzadeh и др. Однако, изготовление передаточного механизма линейного привода микрометровой точности сопряжено со значительными технологическими и производственными трудностями на грани предельных возможностей обрабатывающего и измерительного оборудования. Поэтому полностью избавиться от ошибок проектирования и изготовления механической передачи невозможно. Кроме того, точностные характеристики привода зависят и от других факторов нетехнологического характера, проявляющихся в процессе эксплуатации: упругая деформация, температурное изменение размеров и т.п.

Второй подход состоит в разработке и применении современных методов и алгоритмов адаптивного управления исполнительными механизмами и системами на их основе. В

последние годы, начиная с середины XX века, с развитием вычислительной техники и становлением мехатроники, начали развиваться интенсивные методы достижения высокой точности исполнительных механизмов за счёт использования в системе управления априорной, текущей, а также апостериорной информации об объекте. Появились адаптивные системы управления, вносящие коррекцию в траекторию движения механизмов. Наиболее широко такой подход начал применяться в станкостроении для машин с числовым программным управлением (ЧПУ) и был развит такими отечественными и иностранными учеными, как Н. А. Серков, Э. М. Берлинер, Р. Л. Пушков, В. А. Полянский, С. Е. Карпович, M. Pajor, R. Ramesh, J. Kruth, P. Vanherck, H.-W. Huang, S. Ibaraki, T. Yokawa и др.

В настоящее время системы управления с программной коррекцией движения исполнительных мехатронных и робототехнических систем космического применения остаются гораздо менее развитыми, по сравнению с аналогичными типами приводов в других областях техники, например, в станках с ЧПУ. В связи этим, в настоящей работе предлагается разработать прикладные методы управления, основанные на компенсации влияния основных источников погрешности линейного привода МПС космического применения и реализовать их на базе микропроцессорной системы управления ЛП.

Предлагаемая система управления должна обеспечивать позиционирование и наведение аппаратуры КА с высокой точностью. При этом одновременно должны решаться задачи снижения себестоимости конструкции МПС, а также повышения её надежности за счет применения специальных системных решений и алгоритмов управления.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в настоящей работе является линейный привод механизма с параллельной структурой типа «гексапод», предназначенного для работы в условиях космического пространства. Предметом исследований являются методы, алгоритм и система управления линейным приводом, обеспечивающие высокую точность работы привода и гексапода.

Целью работы является разработка методов, алгоритма и системы управления линейным приводом механизма с параллельной структурой космического применения, обеспечивающих высокую точность работы приводов и МПС на их основе с учетом эксплуатационных ограничений на используемую компонентную базу.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**.

1. Анализ основных факторов, влияющих на точность работы гексапода, выявление источников погрешности работы МПС и входящих в их состав линейных приводов, определение наиболее существенных источников и оценка величин таких ошибок.

2. Разработка методов и алгоритма прецизионного управления ЛП, компенсирующих влияние наиболее существенных источников ошибок позиционирования штока привода.

3. Разработка методов и структуры системы управления линейным приводом космического применения, позволяющих обеспечить работу привода в следящем режиме с высокими точностными показателями с учетом эксплуатационных ограничений на используемую компонентную базу.

4. Разработка методов и структуры системы управления гексаподом в пространстве линейных координат приводов, позволяющих планировать траекторию движения платформы механизма с учетом ограничений на динамические возмущения, действующие на объект управления и несущую платформу космического аппарата.

5. Разработка математической и имитационной компьютерной моделей ЛП, позволяющих исследовать разработанную систему управления приводом.

6. Разработка исследовательского программно-аппаратного комплекса для выполнения калибровки ЛП, а также проведения экспериментальных исследований его точностных показателей.

7. Экспериментальная проверка методических, алгоритмических и системных решений по повышению точности работы линейного привода.

Научная новизна.

1. Проведен комплексный анализ основных источников погрешности работы механизмов с параллельной структурой и входящих в их состав линейных приводов космического применения. Выделены наиболее существенные источники погрешности приводов, выполнена оценка величин соответствующих ошибок.

2. Разработан алгоритм прецизионного управления линейным приводом, включающий методы компенсации основных источников погрешности привода: систематической ошибки механической части, температурных ошибок, упругих деформаций элементов привода.

3. Предложена структурная схема системы управления линейным приводом механизма с параллельной структурой, позволяющая: оценивать параметры шагового двигателя, величину вязкого трения привода, а также линейное положение, скорость и нагружающее осевое усилие; осуществлять подчиненное регулирование координат положения, скорости и тока (усилия) линейного привода без применения датчика углового положения; выполнять разработанный алгоритм прецизионного управления ЛП.

4. Разработан алгоритм и предложена структурная схема системы управления механизмом с параллельной структурой типа «гексапод» в пространстве обобщенных координат ЛП, позволяющие: планировать траекторию движения платформы гексапода с учетом заданных ограничений на динамические возмущения, действующие на объект управления и несущую платформу КА; обеспечить высокую статическую и динамическую точности позиционирования и наведения подвижной платформы механизма.

Практическая значимость работы. Предложенные методы, алгоритмы, структурные схемы систем управления обеспечивают высокую точность работы ЛП и МПС космического применения с учетом эксплуатационных ограничений на используемую компонентную базу, в первую очередь, датчиков положения. Разработанная система управления гексаподом в пространстве обобщенных координат реализована под руководством автора в ходе НИОКТР в виде экспериментального образца электронного блока управления гексаподом на основе радиационно-стойкой компонентной базы. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет выполнять калибровку ЛП и автоматизировать формирование таблицы поправок для компенсации систематической ошибки механической части линейного привода, обеспечивает проведение экспериментальных исследований точностных показателей ЛП с применением алгоритма прецизионного управления в различных температурных условиях.

Методы исследования. Использовались методы теоретической и аналитической механики, динамики и кинематики машин, теории автоматического управления, линейной алгебры, вычислительной математики, имитационного моделирования. Для численных расчетов, анализа теоретических и экспериментальных данных использовалась среда MATLAB® Simulink®. Для конечно-элементного моделирования использовались САПР Solidworks® и ANSYS®. Экспериментальные исследования проводились по ГОСТ 27843-2006.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика оценки погрешности линейного привода механизма с параллельной структурой, отличающаяся от известных тем, что включает комплексный аналитический, численный и экспериментальный анализ: геометрических ошибок и деформаций, связанных с механической нагрузкой с учетом кинематической схемы гексапода космического применения; тепловых деформаций с учетом особенностей теплопередачи в условиях космического пространства; ошибок, связанных с работой системы управления без датчиков положения. На основе предложенной методики проанализировано многофакторное влияние указанных ошибок на конечную точность, определены источники наибольших ошибок, осуществлён выбор методов и разработаны алгоритм и система прецизионного управления ЛП.

2. Система прецизионного управления линейным приводом, использующая в отличие от известных решений алгоритм идентификации и компенсации влияния одновременно нескольких источников погрешности: систематической ошибки механической части за счет применения методов интерполяции для априорного формирования таблицы поправок; тепловых деформаций за счет измерения температуры в характерных точках; упругой деформации за счет идентификации осевого усилия с помощью наблюдателя состояния на основе расширенного фильтра Калмана. Эффективность разработанной системы продемонстрирована экспериментально, достигнуто снижение погрешности ЛП до $\pm 2,5$ мкм.

3. Система управления механизмом с параллельной структурой, основным отличием которой от использовавшихся ранее являются применение алгоритма планирования траектории движения гексапода в пространстве координат подвижной платформы с учетом заданных ограничений скорости, ускорения и рывка и последующий переход к управлению в пространстве обобщенных координат линейных приводов за счет решения обратной задачи кинематики. Преимуществом предложенной системы является возможность ее практической реализации в устройствах позиционирования бортовой аппаратуры космического применения, имеющих эксплуатационные ограничения на использование датчиков положения. Методом имитационного моделирования продемонстрированы динамические ошибки на уровне ± 10 угл. секунд по угловым координатам и ± 40 мкм по линейным координатам.

Степень достоверности. Основные научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных положений и методов теоретической и аналитической механики, динамики и кинематики машин, дилатометрии, а также экспериментальных методов исследования. Достоверность научных результатов определяется строгостью используемого в работе математического аппарата, применением современных пакетов конечно-элементного и численного моделирования ANSYS® и MATLAB® Simulink®, подтверждением эффективности в ходе имитационного компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Внедрение результатов работы. Результаты работы были использованы при выполнении научно-исследовательской, опытно-конструкторской и технологической работы «Организация импортозамещающего производства прецизионных мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения бортовой аппаратуры космической и авиационной техники» (далее — НИОКТР). НИОКТР выполнена ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова совместно с АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор от 01.12.2015 № 02.G25.31.0160). Результаты работы внедрены в АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва» и используются при выпуске мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения (системы прецизионного управления ЛП и МПС). Результаты исследований внедрены в учебный процесс в рамках преподаваемых автором в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова учебных курсов.

Апробация результатов работы. За доклад «Особенности управления приводами гексапода космического применения» на 30-й международной конференции «Экстремальная робототехника» в ГНЦ РФ ЦНИИ РТК автор удостоен диплома I степени в номинации «Новые перспективные подходы» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.). Основные результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях: «Решетневские чтения», доклад на тему «Особенности проектирования модуля управления линейного привода гексапода» (СибГАУ, г.

Красноярск, 2016 г.); «Робототехнические системы и комплексы специального назначения», доклад на тему «Особенности разработки системы управления гексаподом космического исполнения» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, 2017 г.); «Решетневские чтения 2017», доклад на тему «Применение пространственных механизмов с параллельной структурой для виброизоляции бортовых приборов» (СибГАУ, г. Красноярск, 2017 г.); XXIII Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация», доклад на тему «Система управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения» (МАИ, г. Евпатория, 2018 г.); 31-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», доклад на тему «Управление линейным приводом механизма с параллельной кинематикой (ГНЦ РФ «ЦНИИ РТК», г. Санкт-Петербург, 2020 г.); XVII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, г. Москва, 2020 г.), доклад на тему «Вопросы повышения точности устройств наведения и ориентации бортовой аппаратуры КА»; The Eleventh Moscow Solar System Symposium (ИКИ РАН, г. Москва, 2020 г.), доклад на тему «High precision and reliable space application mechatronic system»; Международный научный семинар по ТММ им. академика И. И. Артоболевского, доклад по теме диссертации (ИМАШ РАН, 09.02.2021 г.).

Личный вклад автора. Автор под руководством научного руководителя выполнил лично: разработку методов, алгоритмов и структуры систем управления ЛП и гексаподом в пространстве координат ЛП; конечно-элементное и численное моделирование ЛП; разработку программного обеспечения (в среде Keil® uVision на языке Си) и макета электронного модуля системы управления ЛП (в среде Altium® Designer); разработку методики и алгоритмов программной части комплекса калибровки (в среде MATLAB®); подготовку и проведение экспериментальных исследований. Экспериментальный образец системы управления гексаподом разработан и изготовлен под руководством и при личном участии автора в научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические и мехатронные системы», линейный привод и макет привода для экспериментальных исследований разработаны в опытно-конструкторском бюро БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова совместно со специалистами АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва».

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 24 работы, из них пять статей [1-5] в изданиях, входящих в список рекомендованных ВАК, одна [6] — в реферативную базу Scopus, а также одна монография [11]. Получены четыре свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [7–10].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет 165 страниц, включая 8 таблиц, 68 рисунков, список литературы из 153 наименований и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ состояния проблемы повышения точности механизмов с параллельной структурой и методов ее решения. Даны примеры МПС для задач позиционирования объектов в различных областях техники. Обозначены перспективы применения МПС в космической технике в задачах наведения и ориентации прецизионных приборов, а также их стабилизации и виброзащиты. Для задач пространственного наведения и позиционирования объектов особый интерес представляют механизмы типа «гексапод» (рис. 1), обеспечивающие до шести степеней свободы — три вращательных и три поступательных. Положение центра подвижной платформы O' задается в декартовых координатах X , Y и Z в системе $Oxyz$. Угловая ориентация платформы задается углами Эйлера φ , ξ , ψ .

Предельно высокая разрешающая способность радиотелескопов современных космических обсерваторий определяет в том числе высокие требования к точности работы устройства его наведения относительно несущей космической платформы на уровне десятков микрометров по линейным координатам и десятков секунд — по угловым координатам.

Описаны возможные варианты, а также технические проблемы реализации системы измерения положения и ориентации подвижной платформы механизма космического применения: использование сигналов обратной связи от объекта наблюдения, применение звездных датчиков, системы инерциальных датчиков, последовательного соединения линейных и угловых датчиков по типу устройства координатно-измерительных машин, по шести отдельным датчикам линейных перемещений по типу механизма с параллельной структурой. Представлен обзор датчиков линейного положения и технические характеристики для диапазона измерений 200 мм при условии работы первичных датчиков и системы обработки при нормальной температуре с незначительным допустимым диапазоном отклонений. Отмечено, что применение высокоточных датчиков абсолютного положения и угловой ориентации подвижной платформы гексапода космического применения затруднительно в связи с техническими, технологическими, экономическими, эксплуатационными и другими ограничениями. Результаты сравнительного анализа датчиков раскрывают основную проблему прецизионного управления линейными приводами механизмов с параллельной структурой космического применения: при отсутствии

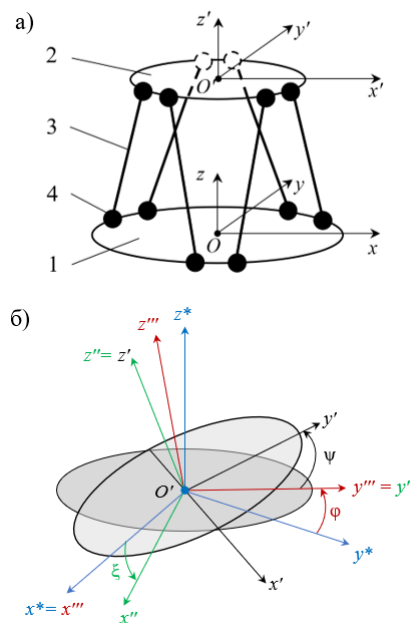


Рис. 1 — Схематичное изображение гексапода (а) и углы Эйлера (б)

возможности использования датчика линейного положения в качестве основного элемента обратной связи необходимо реализовать точное линейное позиционирование штока привода.

Показано, что точность перемещения объекта, размещенного на подвижной платформе гексапода в случае отсутствия обратной связи по координатам $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \varphi, \xi, \psi]$ зависит от многих факторов. Рассмотрены основные источники погрешности МПС. Отмечено, что существенные составляющие ошибок позиционирования и наведения подвижной платформы механизма сосредоточены в основном в его линейных приводах. Гексапод имеет шесть линейных приводов, каждый привод при этом имеет собственный характер геометрических, температурных и других типов ошибок, а при совместной работе формируется сложное нелинейное поле ошибок позиционирования и наведения подвижной платформы МПС. Методы снижения погрешности МПС путем повышения точности работы его линейных приводов, как во многом определяющих статические и динамические точностные характеристики всего механизма, работоспособность в условиях космической среды, а также надежность системы позиционирования и ориентации аппаратуры относительно КА, изучены слабо. Отмечено, что целесообразно пойти по пути увеличения точности работы МПС путем уменьшения погрешностей работы его линейных приводов.

Во второй главе отмечено, что совокупность требований к необходимым диапазонам позиционирования и наведения подвижной платформы гексапода, а также требований к точностям ее поступательного и вращательного движения в десятки микрометров и десятки угловых секунд соответственно определяет точность позиционирования линейных приводов ± 2 микрометра. Рассмотрены возможные варианты построения исполнительной, информационно-измерительной и управляющей частей линейного привода МПС космического применения. Приведено обоснование и описание конструкции линейного привода МПС космического применения с учетом ограничений на используемую компонентную базу ЛП: электродвигатель, редуктор, механическая передача и др. Рассмотрен вариант размещения системы измерения линейного положения в составе конструкции линейного привода. В этом случае ЛП представляет собой законченный узел, имеющий встроенные приводную, информационно-измерительную и управляющую подсистемы. При этом на точность перемещения выходного звена МПС — подвижной платформы с объектом — влияет точность работы линейных приводов. С учетом обозначенных ограничений на применение датчиков линейного положения представлены кинематическая (рис. 2, а) и структурная (рис. 2, б) схемы линейного привода с косвенной обратной связью. Приведено обоснование выбора основных элементов ЛП: шагового электродвигателя, волнового редуктора, шарико-винтовой передачи, датчика углового положения типа вращающегося трансформатора, трехотсчетного датчика концевой (нулевой) положения.

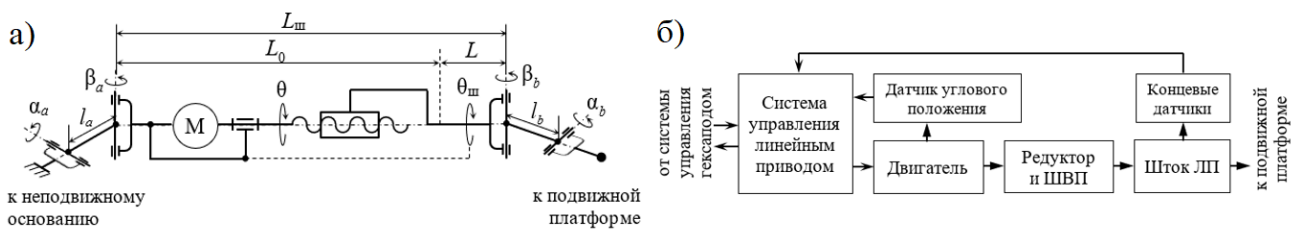


Рис. 2 — Кинематическая и структурная схемы ЛП с косвенной обратной связью

Во второй главе описаны основные источники погрешности работы линейного привода для указанной конструкции: геометрические и температурные ошибки; ошибки, вызванные механическими нагрузками; ошибки управления; прочие ошибки. Выполнен анализ численных значений погрешностей, вносимых элементами конструкции ЛП.

Основным элементом привода является шарико-винтовая передача (ШВП), главной характеристикой которой является зависимость между действительным и заданным осевыми перемещениями гайки ШВП. Зависимость кинематической погрешности винтовой пары от номинального осевого перемещения гайки представлена на рис. 3, а). Кинематическая погрешность шарико-винтовой передачи является систематической, связана с технологическими особенностями ее изготовления и для ЛП с диапазоном перемещений 200 мм может достигать значений 20 мкм. Свою погрешность хода имеет также волновой редуктор, однако производителями волновых редукторов заявляется величина погрешности при номинальной нагрузке редуктора до 2 угловых минут, что при пересчете в линейное положение штока составляет менее 0,2 мкм, поэтому данной величиной можно пренебречь. Еще одним источником ошибок линейного позиционирования штока ЛП являются люфты в таких элементах линейного привода, как редуктор, шарико-винтовая передача и шарниры. Результирующий «мертвый ход» привода носит стохастический характер, предсказать который практически невозможно, поэтому в элементах рассматриваемого линейного привода гексапода выполняется предварительный натяг, обеспечивающий минимальные люфты.

В процессе работы линейного привода за счет механических взаимодействий гибкого колеса и генератора волн редуктора, вала и гайки ШВП, шариков и колец подшипниковых опор, штока линейного привода и направляющей поверхности, осей и внутренних поверхностей скольжения шарниров возникают силы трения качения и скольжения. В конечном итоге эти силы создают дополнительную нагрузку, приведенную к валу электродвигателя. Однако, с учетом того, что электродвигатель замкнут обратной связью по угловому положению и имеет необходимый запас по мощности, действие сил трения не приводит к возникновению значительных дополнительных погрешностей работы линейного привода. Немаловажным фактором, определяющим точность работы линейного привода, является механический износ его элементов, и, в первую очередь, шарико-винтовой передачи.

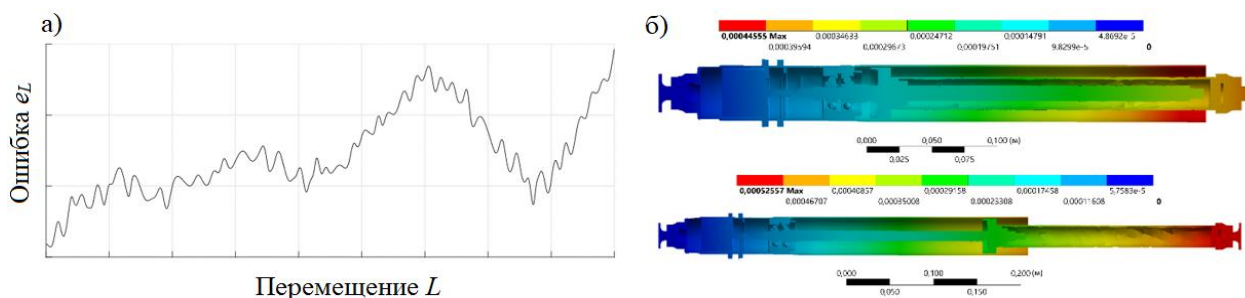


Рис. 3 — Кинематическая погрешность ШВП (а) и результаты конечно-элементного моделирования температурных ошибок линейного привода (б)

Расчётный ресурс по износу равен 1 млн. оборотов. поэтому при условии обеспечения допустимых значений осевой нагрузки, частот вращения, ускорений, условий смазывания, температурных режимов, а также чистоты рабочей зоны усталостное отслаивание материала на поверхностях элементов ШВП наблюдаться не будет. Кроме того, при обеспечении допустимых механических нагрузок на элементы линейного привода пластическими деформациями также можно пренебречь. Далее во второй главе выполнен анализ погрешностей, возникающих при работе привода в широком температурном диапазоне и сопутствующем объёмном и линейное изменении размеров элементов привода. Температурные деформации оценены методом конечно-элементного моделирования ЛП (рис. 3, б) и при работе ЛП в диапазоне от -80°C до $+80^{\circ}\text{C}$ достигают значений в сотни мкм в зависимости от положения штока привода. Также показано, что для МПС наземного применения, работающего в условиях действия сил тяготения, ещё одним существенным источником ошибок является упругая деформация элементов ЛП. В главе рассмотрены также прочие источники ошибок, действующие в ЛП.

Систематизация и выделение наиболее существенных источников погрешности ЛП позволяет наметить пути повышения точности линейных приводов и гексапода.

Отмечено, что для прецизионной работы линейного привода необходимо: обеспечение предварительного натяга шарико-винтовой передачи; обеспечение работы привода в допустимых диапазонах осевой нагрузки, частот вращения, ускорений, условий смазывания, температурных режимов, чистоты рабочей зоны; обеспечение соответствующего качества системы регулирования; соблюдение качественной технологии изготовления и сборки, использовании высококачественных и надежных компонентов, а также выполнение программной компенсации некоторых типов ошибок. Погрешности изготовления элементов и сборки ЛП устраняются после контрольного замера истинного перемещения штока, вычисления ошибки и внесения статической поправки в систему управления.

Установлено, что для программной компенсации других типов ошибок и разработки алгоритма прецизионного управления ЛП требуется выполнить соответствующие теоретические и экспериментальные исследования. Наибольший интерес при этом

представляют следующие три группы: систематические ошибки механической части линейного привода, включающие погрешности редуктора, шарико-винтовой передачи, электромеханической части (обмотки статора) двигателя и датчика; температурные ошибки, вызванные действием факторов окружающей среды, нагревом от трения и джоулева тепла; упругие деформации элементов ЛП под действием статической и динамической нагрузки.

В третьей главе приводится математическая модель линейного привода, построенного на основе гибридного шагового электродвигателя, описываемого системой (1). Здесь: i_d , i_q — токи, неподвижно связанные с ротором в соответствии с преобразованием Парка для электрической машины; u_d , u_q — соответствующие напряжения; R , L — сопротивление и индуктивность обмотки статора;

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{-Ri_d}{L} + p\omega i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-Ri_q - K_m\omega}{L} - p\omega i_d + \frac{u_q}{L} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{K_m i_q - K_v\omega - T_L}{J} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (2)$$

K_m — моментная постоянная двигателя; ω — угловая скорость ротора; θ — угловое положение ротора; p — число зубцов, приходящееся на каждую пару полюсов (или число пар полюсов статора); K_v — коэффициент вязкого трения; T_L — момент нагрузки; J_s — приведенный к валу суммарный момент инерции ротора и элементов привода. Для перехода к координатам привода при управлении задаваемое линейное положение ЛП L_3 преобразуется в задаваемое угловое положение вала шагового двигателя θ_3 по формуле: $\theta_3 = k_p k_{швп} L_3$, где k_p — передаточное число редуктора, $k_{швп}$ — шаг шарико-винтовой передачи линейного привода.

Отмечено, что применяющийся в ЛП датчик углового положения не подходит для замыкания привода в вентильном режиме, поскольку не обеспечивает необходимую точность определения углового положения. В этом случае предлагается применение наблюдателя состояния. Для дискретной модели шагового двигателя ЛП (2) со случайной составляющей эволюции и шумами измерений рассмотрено применение расширенного фильтра Калмана (РФК). Здесь $\mathbf{x}_k$ — значение вектора переменных состояния системы $[i_d \ i_q \ \omega \ \theta]$ в момент времени t_k , $\mathbf{f}(\mathbf{x}_k)$ — векторная функция эволюции системы, $\mathbf{B}_k$ — матрица управления системы; $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ — векторная функция выхода системы; $\mathbf{z}_k$ — вектор измерений истинного вектора состояния $\mathbf{x}_k$, $\mathbf{w}_k$ — вектор, описывающий случайный характер эволюции системы, $\mathbf{v}_k$ — вектор, описывающий шум измерений. Вектора $\mathbf{w}_k$ и $\mathbf{v}_k$ описывают нормальный

случайный процесс с нулевым математическим ожиданием. Показано, что полученный наблюдатель на каждом шаге работы выдает оценку переменных состояния $\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = [\hat{l}_d \ \hat{l}_q \ \hat{\omega} \ \hat{\theta}]^T$, которую можно использовать в системе управления шаговым двигателем и ЛПП.

Поскольку к гексаподу предъявляются требования по точности отработки задаваемых сигналов позиционирования и, одновременно, он должен обеспечивать малую длительность переходных процессов и воздействовать на объект управления и несущую платформу космического аппарата с минимальными динамическими возмущениями, далее в третьей главе рассматривается алгоритм управления исполнительным электродвигателем линейного привода, обеспечивающий контролируемое динамическое воздействие на объект управления.

Показано, что расчет стандартных траекторий типа 4-3-4, 3-5-3, методом сплайн-интерполяции и подобными методами для позиционного режима опирается на следующие граничные условия: заданное положение начальной и конечной точки; нулевые начальная и конечная скорость; нулевые начальное и конечное ускорение; положение, скорость и ускорение меняются непрерывно при переходе между последовательными участками траектории. При этом скорость, ускорение и более высокие производные перемещения привода для указанных траекторий на этапе расчета напрямую задать не получается.

Для обеспечения контроля динамических возмущений предложено использование алгоритма планирования траектории по одной координате вектора $\mathbf{q}$ (рис. 4). В общем случае имеется семь временных интервалов, а общая траектория имеет формулу 3-2-3-1-3-2-3. На интервалах $t_0 - t_1$ и $t_6 - t_7$ в системе действует положительное постоянное значение рывка $+\bar{j}$; на интервалах $t_2 - t_3$ и $t_4 - t_5$ действует значение $-\bar{j}$; на интервалах $t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$ и $t_5 - t_6$ значение рывка равно нулю. Приведены выражения для вычисления временных интервалов с учетом заданных ограничений $\bar{j}$, $\bar{a}$ и $\bar{v}$. В качестве критерия оптимальности принято минимальное время $t_{\bar{x}}$, за которое система совершит перемещение $\bar{x}$. Показано, что позиционирование и наведение крупногабаритной нагрузки целесообразно выполнять поотдельности и поочередно для каждой координаты вектора $\mathbf{q}$. Для реализации предложенного алгоритма рассмотрены возможные варианты реализации системы управления гексаподом и линейным приводом в пространстве декартовых координат и обобщенных координат линейных приводов.

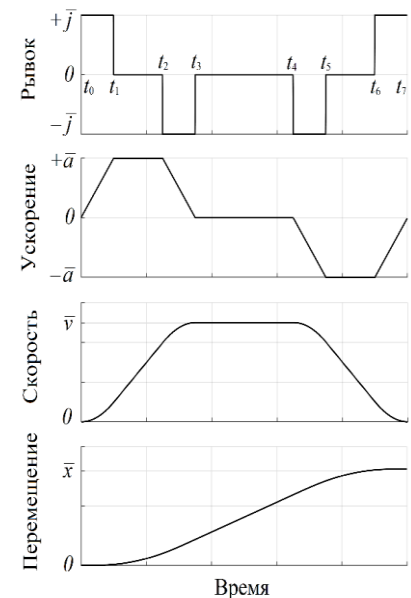


Рис. 4 — Перемещение и его производные при планировании траектории движения

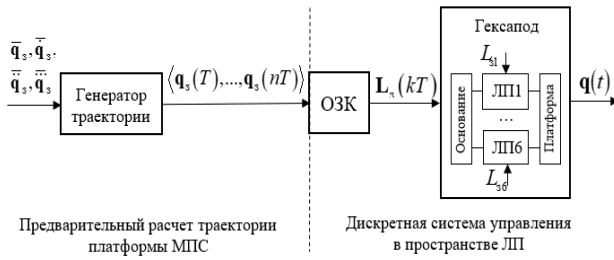


Рис. 5 — Структурная схема системы управления гексаподом в пространстве обобщенных координат

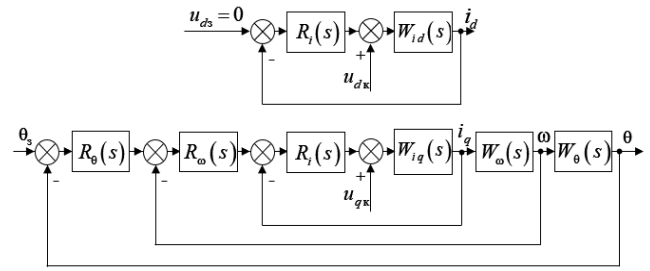


Рис. 6 — Структурная схема системы управления электродвигателем ЛП с подчиненным регулированием координат

Так, реализация дискретной системы управления, работающей в пространстве декартовых координат платформы $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$, требует значительных вычислительных ресурсов, поскольку на каждом элементарном шаге требуется выполнять вычисления матриц Якоби, инерции гексапода, кориолисовых и центробежных усилий и моментов, гравитационных сил, решение прямой задачи кинематики и обратной задачи динамики.

Поскольку рассматриваемый гексапод предназначен для функционирования с небольшими скоростями и ускорениями в условиях отсутствия гравитационных сил, рассмотрена возможность управления МПС в пространстве обобщенных координат или длин приводов (рис. 5). Система управления гексаподом в пространстве обобщенных координат работает следующим образом. На предварительном этапе на генератор траектории подается вектор заданного конечного положения платформы $\bar{\mathbf{q}}_3 = [\bar{X}_3, \bar{Y}_3, \bar{Z}_3, \bar{\varphi}_3, \bar{\xi}_3, \bar{\psi}_3]$. Согласно представленному алгоритму планирования траектории, в соответствии с заданными ограничениями $\bar{\dot{\mathbf{q}}}_3, \bar{\ddot{\mathbf{q}}}_3, \bar{\ddot{\mathbf{q}}}_3$ выполняется вычисление вектора перемещения и угловой ориентации платформы $\mathbf{q}_3(kT) = [x_3(kT), y_3(kT), z_3(kT), \alpha_3(kT), \beta_3(kT), \gamma_3(kT)]$, где $k = \overline{1, n}$ — номер шага дискретной системы управления, T — период дискретизации. Далее полученный набор $\langle \mathbf{q}_3(T), ..., \mathbf{q}_3(nT) \rangle$ путем решения обратной задачи кинематики гексапода преобразуется в набор $\langle \mathbf{L}_3(T), ..., \mathbf{L}_3(nT) \rangle$. Значения $\mathbf{L}_3(kT)$ подаются как задающие сигналы на линейные привода в режиме реального времени с периодом T .

Таким образом, для реализации указанной системы линейный привод должен работать в следящем режиме, воспроизводя заданную траекторию. Необходимую устойчивость и достаточно высокие показатели качества может обеспечить система управления с так называемым подчиненным регулированием координат, позволяющая также устанавливать ограничения на отдельные координаты привода, обеспечивая тем самым устойчивость системы. На рис. 6 показана такая система управления, синтезированная с учетом необходимости компенсации перекрестных связей в контурах шагового двигателя и

реализации наблюдателя состояния. В токовые контура вводятся компенсационные сигналы $u_{qк}$ и $u_{dк}$. Задающим сигналом для независимого контура тока i_d служит нулевое напряжение u_{d3} , а для контура тока i_q — выходной сигнал регулятора скорости.

В третьей главе также предложен метод разомкнутого управления шаговым двигателем при невозможности реализации вентильного режима работы.

Далее в третьей главе рассмотрены методы повышения точности линейного привода путем компенсации основных источников погрешностей ЛП. Приводится метод компенсации кинематической погрешности шарико-винтовой передачи путем предварительного измерения характеристик механической передачи и последующего использования поправочных значений при управлении ЛП. Из рис. 2, а) видно, что зависимость ошибки перемещения штока ЛП от текущего линейного положения является нелинейной. В этом случае наиболее оптимальным вариантом является хранение не полного массива поправок, а некоторого дискретного набора из узловых точек, по которому возможно нахождение промежуточных значений поправок. Рассматриваются различные методы интерполяции поправочных значений: кусочные постоянная, линейная и квадратичная интерполяции; Эрмитова интерполяция; сплайны; а также нейросетевая интерполяция. Показано, что наиболее оптимальным решением по соотношению требований к объему памяти и вычислительным ресурсам является использование кусочно-линейной интерполяции.

Для компенсации теплового расширения линейный привод рассматривается как объект, состоящий из n элементов, каждый из которых имеет номинальную длину в осевом направлении l_i , определенную при некоторой температуре T_0 , а также коэффициент линейного температурного расширения α_i . Общее температурное изменение линейного положения ΔL_T будет описываться выражением:
$$\Delta L_T = \Delta T \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i.$$
 Ходовая гайка ШВП

занимает положение на винте L , которое меняется в зависимости от заданного линейного перемещения штока. Остальные составляющие длины l_i элементов линейного привода для рассматриваемой схемы построения ЛП не изменяются в процессе работы. Показано, что можно вычислить такое линейное положение L , при котором с учетом температурного изменения размеров результирующее линейное положение L_T внешней плоскости шарнира ЛП относительно ее положения при $T_{\text{ЛП}} = T_0$ и $L = 0$ мм будет равно заданному:

$$L = (L_3 - \Delta T \cdot K_{\text{ЛП}}) / (1 + \Delta T \cdot \alpha_{\text{ШВП}}),$$
 где $\alpha_{\text{ШВП}}$ — коэффициент линейного теплового расширения ШВП; $K_{\text{ЛП}} = \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i l_i$ — коэффициент учета линейного теплового изменения

размеров всех элементов линейного привода, за исключением ШВП. Таким образом выполняется учет температурного изменения размеров при управлении линейным приводом.

Далее показано, что постоянные коэффициенты $\alpha_{\text{ШВП}}$ и $K_{\text{ЛП}}$ можно также определить экспериментальным путем, что обеспечит бóльшую точность по сравнению с расчетным способом. Для этого, при известной и постоянной температуре $T_{\text{ЛП}}$ (но отличной от температуры определения номинальных размеров ЛП T_0) определяют величины ошибок ΔL_T в двух крайних положениях $L_0 = 0 \text{ мм}$ и $L_{200} = 200 \text{ мм}$ ($\Delta T = T_{\text{ЛП}} - T_0$): $\Delta L_{T, L_0} = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L_0 + K_{\text{ЛП}})$, $\Delta L_{T, L_{200}} = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L_{200} + K_{\text{ЛП}})$. Выражая $\alpha_{\text{ШВП}}$, получим: $\alpha_{\text{ШВП}} = (\Delta L_{T, L_{200}} - \Delta L_{T, L_0}) / \Delta T (L_{200} - L_0)$. Для экспериментального установления величины $K_{\text{ЛП}}$ при известной и постоянной температуре $T_{\text{ЛП}}$ (но отличной от температуры определения номинальных размеров ЛП T_0) определяют величину ошибки ΔL_T при положении $L = 0 \text{ мм}$. Тогда $\Delta L_T = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L_0 + K_{\text{ЛП}}) = \Delta T \cdot K_{\text{ЛП}}$, откуда получаем: $K_{\text{ЛП}} = \Delta L_T / \Delta T$. Заметим, что при технически достижимой максимальной погрешности измерения температуры $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ погрешность расчёта температурной поправки для привода при $L = 200 \text{ мм}$ составит ориентировочно $\pm 2 \text{ мкм}$. В третьей главе также рассмотрены вопросы неравномерного распределения температурных полей ЛП, разработан и приведен метод такой компенсации, обоснована необходимость измерения температур в четырех характерных точках привода.

Далее приведен метод учета упругой деформацией элементов привода, более актуальный для наземных мехатронных и робототехнических комплексов, работающих в поле действия сил тяжести. Упругую деформацию $\Delta L_{\text{упр}}$ можно оценить, зная жесткость механической передачи привода $C_{\text{ЛП}}$ и усилие нагрузки F_n , прикладываемое к штоку (шток зафиксированным со стороны двигателя): $\Delta L_{\text{упр}} = F_n / C_{\text{ЛП}}$. Жесткость $C_{\text{ЛП}}$ определяется преимущественно жесткостью ШВП, указываемой в документации производителя. Усилие F_n при этом можно определить несколькими способами: с помощью датчика усилия или деформаций, устанавливаемого на штоке; датчика момента на валу ШД; по току потребления электродвигателя, пропорционального моменту нагрузки, а также другими методами. Однако, зачастую установка дополнительных датчиков может быть затруднена. В этом случае в разделе 4 будет показано, что оценить F_n можно с помощью расширенного фильтра Калмана.

В завершении третьей главы приведен алгоритм прецизионного управления линейным приводом (рис. 6), включающий разработанные методы повышения точности. На шаге 1 в соответствии с алгоритмом планирования траектории движения платформы гексапода

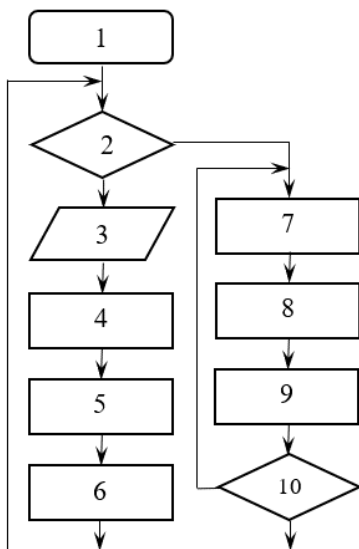


Рис. 6 — Алгоритм
прецизионного
управления ЛП

вычисляется набор векторов $\langle L_3(T), \dots, L_3(nT) \rangle$. Далее на шаге 3 на каждом такте, пока $k \leq n$ (проверка на шаге 2), линейным приводам МПС в режиме реального времени с периодом T передаются задающие воздействия. На шаге 4 система управления линейным приводом получает информацию от датчика(-ов) температуры и в соответствии с методом компенсации температурной деформации вычисляет ΔL_T для заданного положения L_3 . На шаге 5 в соответствии с полученным значением $L_3^* = L_3 + \Delta L_T$ по таблице поиска вычисляется соответствующее угловое положение вала электродвигателя $\theta_3 = f(L_3^*)$. На шаге 6 заданный сигнал θ_3 отрабатывается шаговым электродвигателем. После отработки

всей траектории система переходит на шаг 7 в режим поддержания заданного линейного положения (стабилизации). В этом режиме периодически измеряется температурное поле привода, вычисляется аналогично шагу 4 температурная поправка ΔL_T и далее $L_3^* = L_3 + \Delta L_T$. На шаге 8 для привода, подверженного статической нагрузке и упругим деформациям, дополнительно оценивается поправка $\Delta L_{\text{упр}}$ и далее $L_3^* = L_3 + \Delta L_T + \Delta L_{\text{упр}}$. На шаге 9, аналогично шагу 6, заданный сигнал отрабатывается электродвигателем. На шаге 10 в случае, если сформирована новая траектория, система управления переходит к шагу 2.

В четвертой главе приводятся имитационная компьютерная модель привода и его системы управления с наблюдателем состояния, а также обоснование выбора параметров и данные параметризации модели. Доказывается устойчивость системы управления линейным приводом на основе расширенного фильтра Калмана. Показано, что основным фактором, влияющим на устойчивость системы управления на основе РФК, является ошибка оценивания $e_\theta = \theta - \hat{\theta}$, зависящая от скорости ω . Отмечено, что с ограничением ω с помощью регулятора контура положения обеспечивается устойчивость системы.

Далее в четвертой главе приведены результаты моделирования работы линейного привода (рис. 7): заданные положение и скорости привода, переменные состояния шагового двигателя, а также соответствующие ошибки. Показано, что расширенный фильтр Калмана достаточно точно оценивает переменные состояния, которые определяют качественные показатели работы линейного привода. Далее в главе приводятся результаты моделирования работы алгоритма оценки осевого усилия. Показано, что ошибка оценки усилия невелика и такой метод можно использовать для компенсации упругой деформации линейного привода.

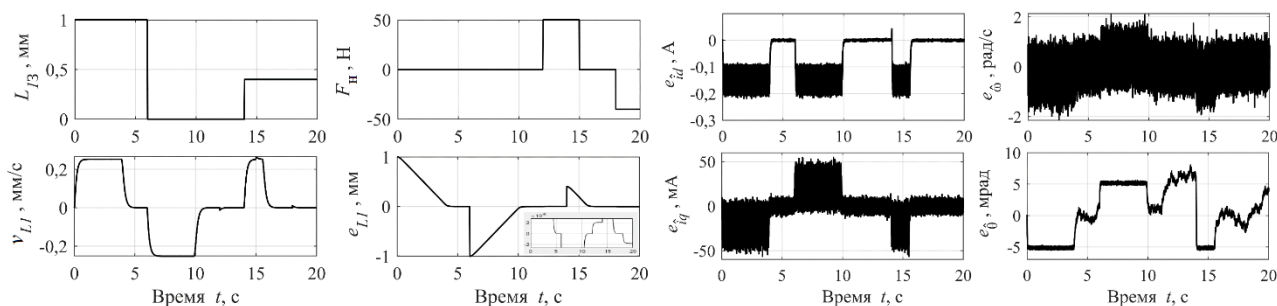


Рис. 7 — Результаты моделирования работы линейного привода

Для анализа качества разработанной системы управления гексаподом (СУГ) в пространстве обобщенных координат ЛП далее в четвертой главе приведены результаты моделирования динамики МПС (рис. 8) при движении платформы по различным координатам. Показано, что предложенная система обеспечивает высокое качество работы механизма с малыми значениями статических и динамических ошибок по всем координатам платформы.

В четвертой главе также приводятся полная функциональная схема системы, реализующей разработанный алгоритм прецизионного управления, описание разработанного и изготовленного под руководством и при непосредственном участии автора электронного блока СУГ. Также приводится описание разработанного автором макета электронного модуля управления линейным приводом и прикладного программного обеспечения для экспериментальных исследований точности ЛП. Приводятся результаты исследований точности макета линейного привода, выполненных в соответствии с ГОСТ 27843-2006.

На рис. 9, а) показаны ошибки ЛП при различных температурных условиях без применения разработанных алгоритмов компенсации систематической погрешности ШВП и температурных деформаций, а на рис. 9, б) — с применением указанных алгоритмов прецизионного управления.

Полученные экспериментальные данные подтверждают работоспособность предложенных методов компенсации систематической ошибки механической передачи, а также температурных деформаций линейного привода.

Применяя данные методы, удастся существенно снизить погрешность работы линейного привода.

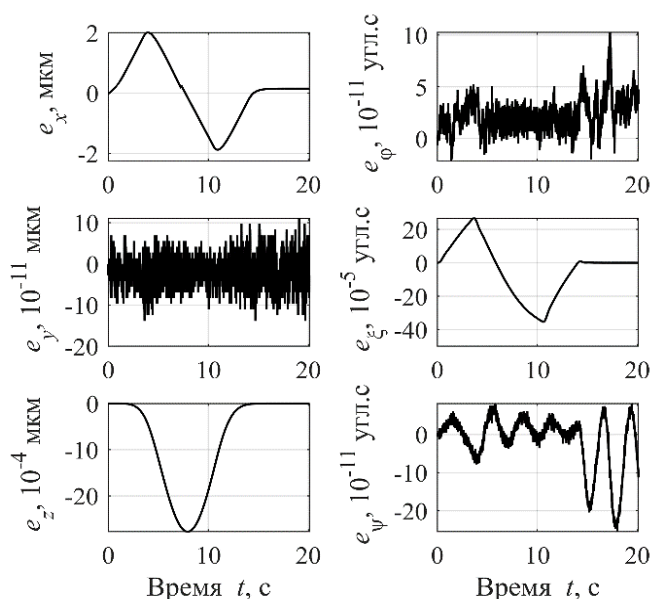


Рис. 8 — Ошибки положения платформы при движении по координате X

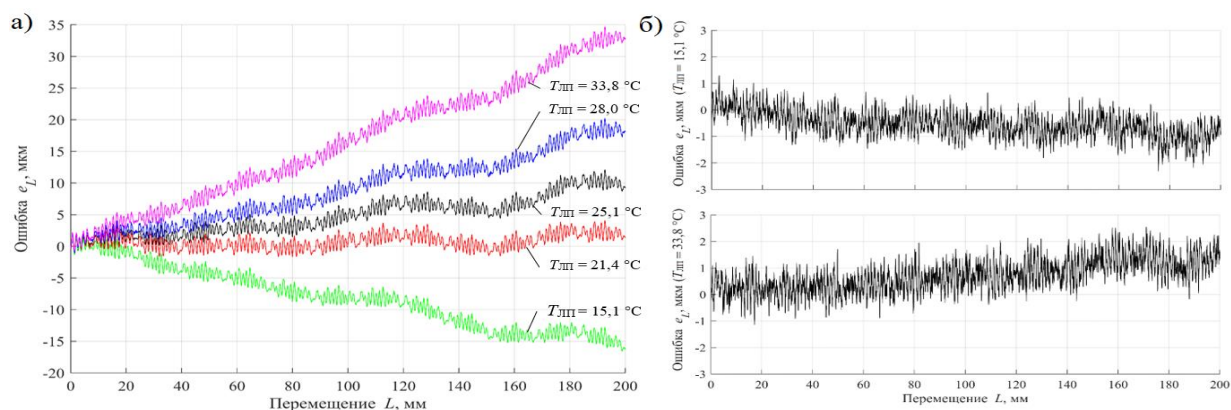


Рис. 9 — Ошибки линейного привода без компенсации (а) и с компенсацией (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследована проблема прецизионного управления линейными приводами механизма с параллельной структурой космического применения типа «гексапод».

Описаны технические проблемы, а также возможные варианты реализации системы измерения линейного положения на основе коммерчески доступных датчиков общепромышленного исполнения. Приведено обоснование и описание конструкции линейного привода гексапода космического применения с учетом ограничений на используемую компонентную базу линейного привода.

Разработан наблюдатель состояния линейного привода, обеспечивающий подчиненное регулирование координат и работу привода в следящем режиме с высокими статическими и динамическими точностными показателями. Разработан метод управления гексаподом в пространстве обобщенных координат линейных приводов с учетом спланированной траектории движения платформы, обеспечивающий выполнение требований к статической и динамической точности гексапода, а также ограничению динамических возмущений на объект управления и несущую платформу КА. Выполнено имитационное моделирование, подтверждающее целесообразность использования предложенного метода управления.

Рассмотрены источники погрешности работы линейного привода, среди которых выделены наиболее существенные. Разработаны методы повышения точности ЛП, компенсирующие влияние указанных источников ошибок. Разработан алгоритм калибровки и прецизионного управления ЛП. Разработан и изготовлен исследовательский программно-аппаратный комплекс, включающий макет модуля управления ЛП, а также специальное программное обеспечение для выполнения калибровки ЛП и проведения исследований.

Результаты выполненных экспериментальных исследований привода подтверждают эффективность предложенных методов повышения точности. Полученный научно-технический задел можно использовать для обеспечения работы МПС с ограничением

динамических возмущений, для повышения точностных характеристик МПС путем повышения точности его приводов, а также для компенсации механических ошибок и температурного расширения конструкции гексапода в целом.

Проведенные исследования и достигнутые результаты являются актуальными для космической техники, станкостроения, медицинской техники, атомной промышленности и других областей и позволяют повысить точность и надежность работы исполнительных мехатронных и робототехнических систем наряду с уменьшением их себестоимости за счет исключения дорогостоящих комплектующих.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в список рекомендованных ВАК:

1. Слободзян Н.С. Позиционное управление линейным приводом мехатронного устройства с параллельной кинематикой // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 9. С. 6-13.

2. Джукич Д.Й., Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В., Слободзян Н.С. Цифровое управление гексаподом на основе обратной модели динамики с реализацией на радиостойком ARM-микроконтроллере // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 103-110.

3. Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С. Система управления механизмом с параллельной кинематикой для перемещения бортовых приборов КЛА на базе современного отечественного радиационно-стойкого микроконтроллера с процессорным ядром Cortex-M4F // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 48-53.

4. Горбунов А. В., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С. Высокоточная система наведения и ориентации космических бортовых приборов на базе гексапода с пространственным датчиком положения // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 42-48.

5. Горбунов А.В., Коротков Е.Б., Леканов А.В., Матвеев С.А., Слободзян Н.С., Яковенко Н.Г. Опыт разработки системы управления механизмами с параллельной структурой типа "гексапод" для позиционирования и наведения крупногабаритных объектов информационных космических платформ // Вопросы р.-электроники. 2018. № 7. С. 111-123.

Публикации в изданиях, входящих в реферативную базу Scopus:

6. Matveev S.A., Korotkov E.B., Slobodzyan N.S., Zhukov Yu.A., Kiselev A.A. Precision Control of the 6-DOF Parallel Kinematic Mechanism of Space Application Based on Compensation of Kinematic and Temperature Errors // Russian Aeronautics. 2020. Vol 63. P. 187-196.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

7. Свидетельство РФ № 2020666080. Программное обеспечение системы управления вентильным приводом с наблюдателем состояния / Слободзян Н.С., Кузнецова З.А., Гончаров В.О., Киселев А.А. Заявка № 2020665368 от 26.11.2020. Оpubл. 04.12.2020.

8. Свидетельство РФ № 2018661587. Программное обеспечение системы управления гексаподом / Жуков Ю.А., Киселев А.А., Надежин М.И., Слободзян Н.С. Заявка № 2018618378 от 06.08.2018. Оpubл. 10.09.2018.

9. Свидетельство РФ № 2018660149. Программное обеспечение стенда для испытаний линейных приводов / Акулов О.И, Целищев И.А., Комаров С.А., Слободзян Н.С. Заявка № 2018618066 от 17.08.2018. Оpubл. 17.08.2018.

10. Свидетельство РФ № 2020663044. Программное обеспечение аппаратного комплекса для калибровки линейных приводов / Слободзян Н.С., Коротков Е.Б. Заявка № 2020618417 от 31.07.2020. Оpubл. 22.10.2020.

Монография:

11. Актуальные проблемы создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования: Монография / [Е. Б. Коротков, Н. С. Слободзян и др.] . — СПб: БГТУ «Военмех», Изд-во «Инфо-Да», 2020. — 92 с. — Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 59.

Прочие публикации:

12. Жуков Ю.А., Лычагин Ю.В., Слободзян Н.С. Решение задач кинематики гексапода в реальном времени // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. 2017. С. 87-91.

13. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С., Яковенко Н.Г. Оценка решения задач кинематики в системе управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения на базе гексапода // Оборонная техника. 2017. № 9. С. 29-37.

14. Алексеев А.А., Горбунов А.В., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Линейный привод гексапода с функцией активного виброгашения // Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». 2018. №50. С. 196-200.

15. Горбунов А. В., Коротков Е. Б., Леканов А. В., Рудыка С. А., Слободзян Н. С. Применение пространственных механизмов с параллельной структурой для наведения, стабилизации и виброизоляции бортовых приборов // Решетн. чтения. 2017. № 21. С. 117-118.

16. Разработка типоразмерного ряда прецизионных мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения бортовой аппаратуры космической и авиационной техники [Текст]: отчеты о НИОКТР по этапам 1-6 / рук. Матвеев С.А.; исполн.: Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. [и др.]. — СПб., БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2016-2018 гг.

17. Коротков Е. Б., Матвеев С. А., Слободзян Н. С., Слободзян А. Е. Система управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения // В книге: Системный анализ, управление и навигация 2018. С. 89-91.

18. Zhukov Y., Korotkov E., Slobodzyan N., Kireev O.L. High accuracy control system of mechanism with parallel kinematic // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова. 2017. № 4 (44). С. 448-454.
19. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Управление высокоточной системой позиционирования и наведения космического применения на базе гексапода с "пространственным датчиком положения" // Экстр. робототехника. 2017. Т. 1. № 1. С. 256-265.
20. Zhukov Yu.A., Korotkov E.B., Larionova K.A., Slobodzian N.S. Control of space application hexapod with interferometric three-axis reference sensor // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2018. No. 11. P. 69-75.
21. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В., Слободзян Н.С. Оценка чувствительности прецизионного гексапода к параметрам конструкции, технологическим и измерительным погрешностям // Материалы 10-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. 2017. С. 35-37.
22. Zhukov Yu., Slobodzyan N. Simulation of hexapod with a vector-controlled hybrid stepper motor // В сборнике: Automated Systems and Technologies AST2017. Proceedings of the Internat. Symposium. 2017. С. 35-42.
23. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Управление в реальном времени механизмом с параллельной кинематикой космического применения на базе гексапода // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2018. Т. 18. № 4. С. 53-57.
24. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Режимы работы шаговых приводов прецизионной системы позиционирования и наведения космического применения на базе гексапода // Вестник Кыргызско-Российского Славянского ун-та. 2018. Т. 18. № 4. С. 18-21.
25. Матвеев С.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Прецизионное управление линейными приводами механизмов с параллельной кинематикой // Труды II НТК "Перспективные разработки ракетно-космической техники". 2019. С. 196-201.
26. Слободзян Н.С. Оценка точности разомкнутого линейного привода, достижимой методом калибровки и компенсации линейного теплового расширения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 54-61.
27. Slobodzyan N.S. Methods of improving hexapod' linear actuators accuracy in space application // Extreme Robotics. 2019. Т. 1. № 1. С. 373-381.
28. Матвеев С.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С., Жуков Ю.А., Киселев А.А. Прецизионное управление шестистепенным механизмом с параллельной кинематикой космического применения на основе компенсации кинематических и температурных ошибок // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 12-20.