

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

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)

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург — 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЗМОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ И МЕТОДОВ ЕЕ РЕШЕНИЯ	15
1.1 Механизмы с параллельной структурой	15
1.2 Гексапод космического применения	20
1.3 Информационное обеспечение системы управления гексапода	22
1.4 Факторы, влияющие на точность работы гексапода	26
1.5 Выводы по разделу	30
2 ЛИНЕЙНЫЙ ПРИВОД МЕХАНИЗМА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ.....	31
2.1 Исполнительная часть линейного привода.....	31
2.2 Информационно-управляющая часть линейного привода.....	39
2.3 Кинематическая схема линейного привода	43
2.4 Источники погрешности линейного привода.....	46
2.5 Выводы по разделу	56
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМА ПРЕЦИЗИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ПРИВОДОМ	57
3.1 Математическая модель линейного привода.....	57
3.2 Наблюдатель состояния	60
3.3 Планирование траектории движения	64
3.4 Синтез системы управления линейным приводом	74
3.5 Режим разомкнутого управления шаговым двигателем	80
3.6 Методы повышения точности линейного привода	84
3.7 Алгоритм прецизионного управления линейным приводом	98
3.8 Выводы по разделу	100

4	ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	102
4.1	Имитационная компьютерная модель	102
4.2	Оценка устойчивости системы управления	108
4.3	Моделирование работы линейного привода в режиме слежения	116
4.4	Моделирование динамики гексапода	118
4.5	Разработка системы прецизионного управления приводом	122
4.6	Экспериментальные исследования точности линейного привода	126
4.7	Выводы по разделу	135
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	138
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	140
	Свидетельства о регистрации программного обеспечения	155
	Нормативные ссылки	156
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	157

ВВЕДЕНИЕ

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 [1–3].

Одной из основных проблем, стоящей перед отечественной космонавтикой, является повышение конкурентоспособности выпускаемых устройств и аппаратов 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 [4–6].

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 [7]. При этом под погрешностью работы привода подразумевается отклонение положения его рабочего органа (штока) от заданного управляющей программой.

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 предъявляются жесткие эксплуатационные требования стойкости к ионизирующему излучению, вакууму, широкому диапазону рабочих температур (при обеспечении необходимых точностных характеристик), а также 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 учитывать 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 на применяемую компонентную базу. Актуальность подтверждается выполнением 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. Miura, 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 управления исполнительными механизмами и системами на их основе. В последние годы, начиная с середины 20 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, А. Г. Кольцов, М. Pajor, R. Ramesh, J.-P. Kruth, P. Vanherck, S. M. Wu, 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 числовым программным управлением.

В связи этим, в настоящей работе предлагается разработать прикладные методы управления, основанные на компенсации влияния основных источников погрешности линейного привода механизма с параллельной структурой космического применения и реализовать их на базе микропроцессорной системы управления ЛП.

Предлагаемая система управления должна осуществлять позиционирование и наведение аппаратуры КА с высокой требуемой точностью. При этом одновременно решаются 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 механизмов с параллельной структурой и входящих в их состав линейных приводов, определение наиболее существенных источников ошибок и оценка величин таких ошибок.

2. Разработка методов и алгоритма прецизионного управления линейным приводом, 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 линейного привода, 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. 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 линейного привода 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. При проведении исследований использовались методы теоретической и аналитической механики, динамики и кинематики машин, теории автоматического управления, линейной алгебры, вычислительной математики, компьютерного имитационного моделирования.

Для численного решения дифференциальных уравнений, анализа теоретических и экспериментальных данных, построения зависимостей 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 нагрузки 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,

теории автоматического управления, 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®. Разработанные методы управления и повышения точности линейного привода проверены 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 линейными приводами, система управления гексаподом в пространстве обобщенных координат ЛП).

Автор получил поддержку и стал победителем конкурса коммерчески ориентированных научно-технических инициатив молодых исследователей «УМНИК» с проектом электронного модуля, реализующего разработанные алгоритмы прецизионного бездатчикового управления приводом.

Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс в рамках преподаваемых автором в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова курсов: «Электронные устройства мехатронных и робототехнических систем» (принципы построения системы и электронного модуля управления шаговым двигателем); «Микропроцессорная техника в

мехатронике и робототехнике» (принципы реализации алгоритмов управления приводом, компенсирующих нелинейную ошибку механической передачи); «Программное обеспечение мехатронных и робототехнических систем» (принципы реализации алгоритмов управления с ограничением по скорости, ускорению и рывку).

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 теории механизмов и машин 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 электронного блока системы управления гексаподом разработан и изготовлен под руководством и при личном участии автора в научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические и мехатронные системы» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова совместно со специалистами АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва». 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 [7, 10, 11, 22, 23, 26–28, 34–36, 46, 56, 57, 82, 85, 105, 114, 120–123, 141, 143], из них пять статей [10, 34, 57, 105, 123] — в изданиях, входящих в список рекомендованных ВАК, одна [142] — в реферативную базу Scopus, а также одна монография [46]. По результатам диссертационной работы получены четыре свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [144–147].

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.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЗМОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ И МЕТОДОВ ЕЕ РЕШЕНИЯ

1.1 Механизмы с параллельной структурой

Исполнительные робототехнические механизмы по кинематической компоновке делятся на механизмы с последовательным, параллельным и смешанным соединением звеньев.

В последовательных механизмах кинематическая цепь разомкнута, а каждое имеющееся звено несет вес последующей части, в том числе и вес полезной нагрузки (обрабатывающего инструмента, объекта наведения и т.п.), за счет чего на звенья действуют большие изгибающие моменты. Для поддержания точности в таких механизмах необходимо увеличивать жесткость конструкции, либо вводить дополнительные элементы разгрузки, что неизменно увеличивает массу и габаритные размеры таких механизмов.

Напротив, в механизмах с параллельной структурой (МПС) нагрузка распределяется между всеми звеньями, поэтому к достоинствам МПС относят высокую жесткость, точность и грузоподъемность конструкции. Однако МПС имеют и такие относительные недостатки, как ограниченная рабочая зона, а также сложность, и в общем случае сингулярность (неоднозначность) аналитических решений задач кинематики и динамики при синтезе законов управления [7]. Существующие варианты МПС имеют различное количество степеней свободы подвижной платформы. Для задач пространственного наведения и позиционирования объектов особый интерес представляют механизмы типа «гексапод», обеспечивающие шесть степеней свободы — три вращательных и три поступательных.

Первым предложенным механизмом такого типа стала платформа В. Гью для испытаний колесно-ступичного узла автомобилей под различными углами к поверхности [8]. Затем Д. Стюарт описал механизм тренажера для подготовки летчиков [9]. Позднее такой механизм, называемый также платформой Гью-Стюарта, исследовался многими другими авторами.

Гексапод (см. рисунок 1.1, а) состоит из неподвижного основания, подвижной платформы и соединяющих их «ног» — линейных приводов. Последние крепятся к платформам с помощью шарниров.

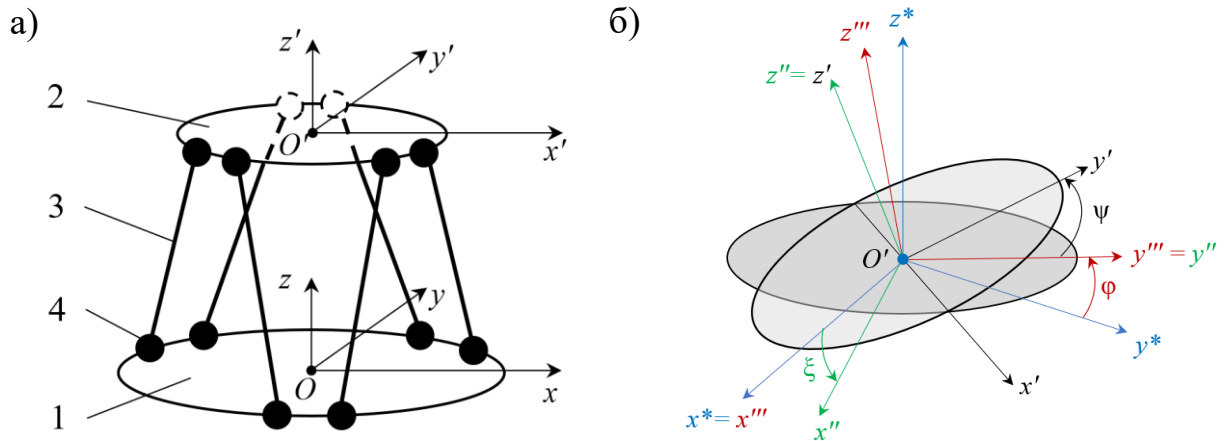


Рисунок 1.1 — Схематичное изображение гексапода (а) и углы Эйлера (б)

На рисунке 1.1, а) обозначены: 1 — неподвижное основание; 2 — подвижная платформа; 3 — линейный привод; 4 — шарнир; $Oxyz$ — система координат, связанная с центром неподвижного основания; $O'x'y'z'$ — система координат, связанная с подвижной платформой.

Гексапод обеспечивает перемещение объекта, расположенного на его подвижной платформе, относительно основания по шести степеням свободы путем изменения линейных размеров приводов.

Положение центра подвижной платформы O' задается в декартовых координатах X , Y и Z в системе $Oxyz$.

Для задания угловой ориентации платформы в настоящей работе будем использовать систему углов Эйлера φ , ξ , ψ , показанную на рисунке 1.1, б). Последовательность поворотов определим следующим образом:

- поворот на угол φ вокруг оси x^* и переход к промежуточной системе координат $O'x'''y'''z'''$;
- поворот на угол ξ вокруг оси y''' и переход к промежуточной системе координат $O'x''y''z''$;

- поворот на угол ψ вокруг оси z'' и переход к системе координат подвижной платформы с объектом $O'x'y'z'$.

Отметим, что в зависимости от постановки задач угловой ориентации и назначения объекта в ряде случаев могут использоваться другие системы углов Эйлера, в том числе повороты относительно соответствующих осей в абсолютной системе координат $O'x^*y^*z^*$.

Таким образом, линейное положение и угловая ориентация платформы задаются вектором $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \phi, \xi, \psi]^T$. Управление гексаподом при этом сводится к формированию вектора длин шести приводов $\mathbf{L} = [L_1, \dots, L_6]^T$.

В общем случае при управлении гексаподом решаются две задачи кинематики [7, 10, 11]:

- обратная задача кинематики — определение длин ног $\mathbf{L}$ по заданному положению и ориентации подвижной платформы $\mathbf{q}$;
- прямая задача кинематики — определение положения и ориентации платформы $\mathbf{q}$ по заданным длинам ног $\mathbf{L}$.

Для связи неподвижной и подвижной систем координат платформ гексапода применяется преобразование в однородных координатах $\mathbf{r} = \mathbf{T}_h \mathbf{r}'$, где $\mathbf{r} = [X, Y, Z, 1]^T$ — вектор координат некоторой точки в системе координат $Oxyz$, $\mathbf{r}'$ — вектор координат той же точки относительно подвижной системы координат $O'x'y'z'$.

Матрица $\mathbf{T}_h$ определяется через вектор координат начала подвижной системы $O'x'y'z'$ относительно неподвижной $Oxyz$: $\mathbf{p} = [X, Y, Z]^T$ и матрицу поворота платформы $\mathbf{R}_p$: $\mathbf{T}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Матрица поворота при использовании углов Эйлера (рисунок 1.1, б) определяется следующим выражением:

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} \cos \xi \cos \psi & -\cos \xi \sin \psi & \sin \xi \\ \cos \varphi \sin \psi + \cos \psi \sin \xi \sin \varphi & \cos \psi \cos \varphi - \sin \xi \sin \psi \sin \varphi & -\cos \xi \sin \varphi \\ \sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \sin \xi & \cos \psi \sin \varphi + \cos \varphi \sin \xi \sin \psi & \cos \xi \cos \varphi \end{bmatrix}.$$

Вычисляя из приведенных выше уравнений матрицу преобразования $\mathbf{T}_h$ для заданного вектора $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \varphi, \xi, \psi]^T$, по координатам точек крепления шарниров линейных приводов к неподвижному основанию и подвижной платформе, можно найти длину i -го привода гексапода: $L_i = \|\mathbf{r}_{A_i} - \mathbf{T}_h \mathbf{r}'_{B_i}\|$, где $\mathbf{r}_{A_i}$ — вектор однородных координат шарнира основания A_i в системе $Oxyz$, $\mathbf{r}'_{B_i}$ — вектор однородных координат шарнира платформы B_i в системе $O'x'y'z'$.

Таким образом выполняется решение обратной задачи кинематики для каждого привода гексапода. Прямая задача кинематики гексапода, как показано во многих работах [12 и др.], единственного аналитического решения не имеет. Для платформы Гью-Стюарта существует до 40 возможных решений, причем в некоторых случаях такое количество решений соответствует количеству конфигураций, в которые может быть собран механизм с данным набором длин приводов.

В связи с этим для гексапода прямая задача кинематики преимущественно решается численным методом. При этом зачастую для устранения сингулярностей на этапе численных расчетов осуществляется переход от углов Эйлера к кватернионам [7].

В зависимости от варианта построения кинематической схемы гексапода могут применяться шарниры и приводы с разным числом степеней свободы.

Кроме структуры, показанной на рисунке 1.1, разработаны и другие кинематические схемы механизмов с параллельной структурой, например, гибридная компоновка [13].

Она включает координатный стол плоского xu -перемещения и закрепленные на нем три линейных привода, которые осуществляют угловое наведение по двум осям и линейное перемещение вдоль оси Oz , а на

подвижном основании закрепляется устройство углового наведения вдоль оси Oz . В задачах, где позиционирование платформы требуется осуществлять по меньшему числу координат, применяют механизмы типа «трипод», а также различные модификации одноподвижных и др. механизмов [14 и др.].

На сегодняшний день в России и за рубежом наибольшее применение получили МПС типа рассмотренного выше гексапода, поскольку такие механизмы имеют универсальную модульную конструкцию и обеспечивают позиционирование и наведение платформы по шести координатам.

Гексаподы используются для решения задач позиционирования объектов в различных областях [15–20]: стенды для испытаний элементов машин и механизмов (рисунок 1.2, а), прецизионные контрольно-измерительные машины (рисунок 1.2, б), роботы-станки и манипуляторы различного назначения (рисунок 1.2, в – 1.2, д), а также системы позиционирования и наведения бортовых приборов, находящихся на нестабилизированном основании (рисунок 1.2, е).

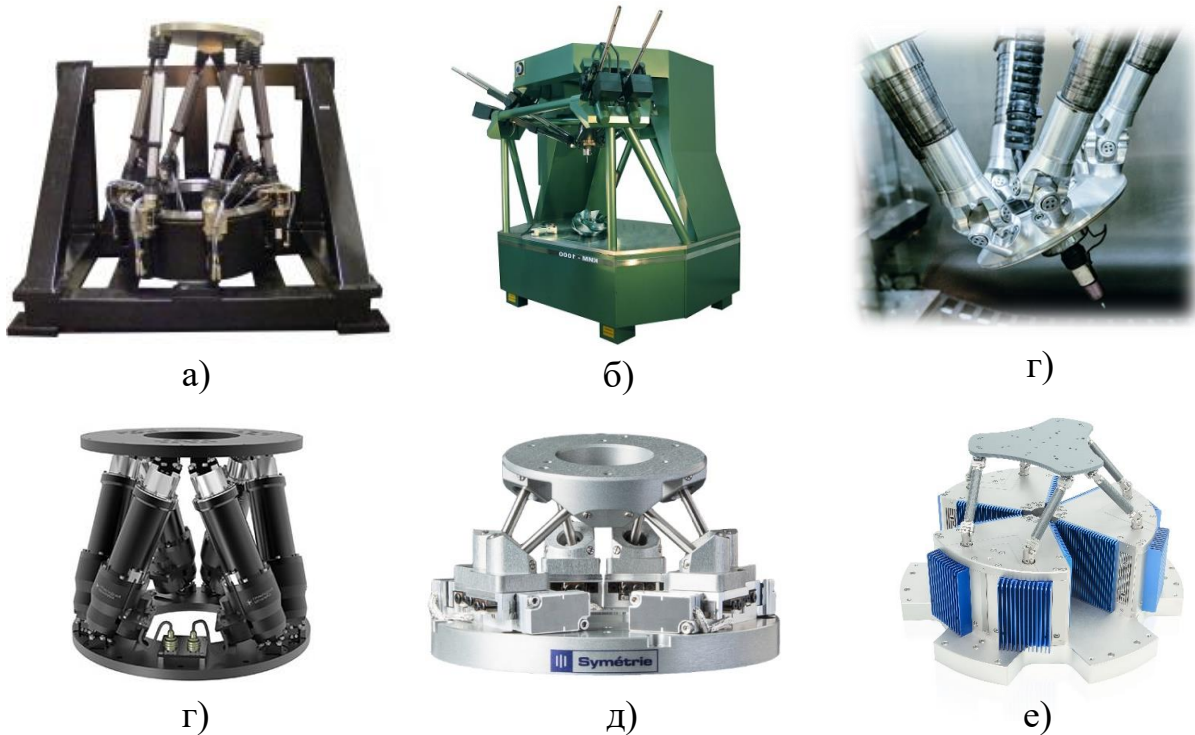


Рисунок 1.2 — Механизмы с параллельной структурой

1.2 Гексапод космического применения

Перспективным является применение МПС в космической технике в задачах позиционирования и наведения прецизионных приборов, а также их стабилизации и виброзащиты [4, 21–23]. За счет модульной конструкции, основанной на унифицированных исполнительных компонентах — линейных приводах — такие механизмы проще в разработке и эксплуатации.

Так, создаваемая в настоящее время космическая обсерватория «Миллиметрон» имеет двухзеркальный криогенный телескоп с раскрываемым на орбите главным параболическим зеркалом. Рабочие диапазоны длин волн телескопа составляют 0,07—10 мм, что определяет высокие требования к точности телескопа и устройства его наведения относительно несущей космической платформы. Отечественными разработчиками рассматривается также возможность создания многосекционного манипулятора для обеспечения задач обсерватории «Миллиметрон» [6, 24].

Кроме того, в строящемся космическом телескопе имени Джеймса Уэбба (*James Webb Space Telescope, JWST*) требуется обеспечить высокоточное многостепенное управление сегментами главного зеркала телескопа с целью получения его необходимой кривизны [3].

Благодаря своей параллельной, и, по сути, резервированной структуре, МПС обладают высокой надежностью, что актуально для исполнительных систем космического применения. Однако, в открытом космосе механизмы и приборы КА работают под действием таких неблагоприятных факторов, как широкий диапазон температур, глубокий вакуум, ионизирующее излучение, вибрационные, линейные и ударные нагрузки при запуске на орбиту [25].

Поэтому применение упомянутых выше гексаподов общепромышленного назначения (см. рисунок 1.2) для указанных задач космических приборов не представляется возможным ввиду жестких условий эксплуатации аппаратуры, работающей на борту КА.

Имеются образцы гексаподов, лишь частично удовлетворяющие перечисленным специальным требованиям условий эксплуатации. Так, на

рисунке 1.3 показан гексапод иностранной фирмы *Symetrie*, предназначенный для функционирования в условиях вакуума и разработанный из материалов с малыми коэффициентами температурного расширения [18].

Такие МПС, однако, не подходят для работы в условиях космоса ввиду использования компонентной базы общепромышленного назначения, не обладающей радиационной стойкостью и не отвечающей ряду других специальных требований.



Рисунок 1.3 —
Гексапод ф. *Symetrie*

Отечественные разработки гексаподов непосредственно космического применения также отсутствуют, однако имеются механизмы, предназначенные для работы в условиях термоядерного реактора при наличии радиации, нейтронного потока, высоких температур и сильных электромагнитных полей [20].

Таким образом, известные разработки специальных механизмов с параллельной структурой типа «гексапод», «трипод» и др. не в полной мере применимы для эксплуатации в жестких условиях открытого космоса. В связи с чем, актуальной является задача разработки механизма с параллельной структурой космического применения.

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова рамках НИОКТР [26] выполнена разработка типоразмерного ряда прецизионных мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения бортовой аппаратуры космической и авиационной техники на базе механизмов с параллельной структурой. Ряд оригинальных устройств, в частности, линейные приводы, система управления ЛП и гексаподом разработаны при непосредственном участии автора настоящей диссертации.

Теория позиционного, траекторного и контурного управления механизмами с параллельной структурой (в соответствии с определениями государственного стандарта [148]) на сегодняшний день описана достаточно

полно многими отечественными и зарубежными авторами, в том числе по результатам выполнения указанной НИОКТР [7, 27–30 и др.].

Основной задачей разработанного в рамках НИОКТР гексапода является отработка заданного положения и угловой ориентации подвижной платформы относительно основания с высокой точностью: ± 10 мкм и ± 30 угл. сек соответственно при функционировании механизма в особых условиях окружающей среды. Гексапод должен обеспечивать: диапазоны линейных перемещений ± 100 мм вдоль осей Ox , Oy ; ± 25 мм вдоль оси Oz ; диапазоны угловых перемещений $\pm 7^\circ$ по координатам φ , ξ , ψ . Режим работы гексапода — позиционный, при котором определяются начальная и конечная позиции подвижной платформы без задания промежуточных точек.

Рассматривается возможность обеспечения функционирования гексапода в широком температурном диапазоне от минус 80 до плюс 80 °С.

1.3 Информационное обеспечение системы управления гексапода

Основным принципом построения качественной системы позиционирования и наведения объекта является управление с обратной связью по его положению. Для рассматриваемых механизмов типа «гексапод» — это три угловых и три линейных координаты.

В системах наведения радиоантенн, оптических устройств и других приборов наблюдения используется принцип сопровождения объекта, при котором происходит автоматическая подстройка положения и угловой ориентации устройства по принимаемой информации, например, по мощности радиосигнала, или по оптическому изображению.

Однако, этот способ не подходит для наблюдения за такими сложными объектами, как звезды, черные дыры, галактики и др. [31], поскольку уровни сигналов слежения могут находиться на границе чувствительности приборов.

Поэтому задача позиционирования и наведения устройства наблюдения сводится к задаче позиционирования и наведения подвижной платформы гексапода в пространстве координат, связанных с основанием. Рассмотрим

возможные варианты построения системы измерения пространственного положения подвижной платформы.

Для углового наведения космических аппаратов используется принцип визирования точечных источников типа звезд и других излучающих объектов с помощью звездных датчиков (см. рисунок 1.4). Параметры наведения вычисляются путем сравнения изображения наблюдаемого участка звездного неба с хранящимся в памяти звездным каталогом.

Несмотря на высокую точность определения углового наведения порядка единиц и долей угловых секунд [32], применение таких датчиков для измерения линейных перемещений в диапазонах подвижной платформы рассматриваемого МПС не представляется принципиально возможным. Кроме того, габариты такого датчика могут превосходить габариты объекта наведения, размещаемого платформе МПС.

Для измерения перемещений платформы возможно использование комбинированной пространственной системы инерциальных датчиков — гироскопов и акселерометров. Однако, даже современные микроэлектро-механические измерительные системы не способны обеспечить управление подвижной платформой с высокой точностью и подвержены значительным временным и температурным дрейфам показаний [33].

Возможно построение измерительной системы гексапода в виде последовательного соединения линейных и угловых датчиков по типу устройства координатно-измерительных машин с последовательной кинематикой (см. рисунок 1.5). Однако, за счёт последовательной конструкции, такие машины



Рисунок 1.4 —
Звездный датчик
ASTRO-APS
ф. Jena-Optronik



Рисунок 1.5 —
Координатно-
измерительная
машина
с последовательной
кинематикой ф.
Nikon Metrology NV

накапливают значительные ошибки, в несколько раз превышающие требования по точности позиционирования и наведения подвижной платформы гексапода. Кроме того, кинематическая схема последовательного механизма, позволяющего измерить любую комбинацию шести угловых и линейных координат подвижной платформы, получится нежесткой и достаточно громоздкой.

Альтернативным является вариант построения измерительной системы гексапода по отдельным датчикам линейных перемещений, устанавливаемым между основанием и платформой. В этом случае создается т.н. «пространственный датчик положения», возможные варианты реализации которого описаны в работах [34–36].

При этом измерительные датчики могут быть либо жестко связаны с исполнительным механизмом системы (встроены в линейные приводы), либо располагаться коллинеарно продольным осям ЛП, либо крепиться на платформе гексапода произвольно. В случае разделения силовой и измерительной подсистем МПС точность измерения положения платформы повышается. При этом количество таких линейных датчиков должно быть равно числу степеней свободы подвижной платформы.

На основании сигналов датчиков определяется положение платформы, а далее путем решения обратной задачи кинематики МПС производится расчет фактических длин ног гексапода и введение этих данных в систему управления механизма как сигналов обратной связи.

В качестве линейных датчиков положения в такой системе могут использоваться первичные датчики различного принципа действия.

Точностным требованиям для построения пространственных измерительных систем гексаподов рассматриваемого класса в наибольшей степени удовлетворяют интерференционные датчики перемещения [37, 38 и др.], а также шкальные оптические датчики, которые имеют околонулевое тепловое расширение измерительной шкалы [39], либо дополнены системой компенсации температурных деформаций. Такие датчики позволяют измерить

положение с точностью в доли микрометров, но имеют сложную структуру с дорогостоящими комплектующими и специализированной оптико-электронной системой обработки информации.

Потенциометрические датчики обеспечивают простой съем информации системой управления ЛП (обычно используется аналого-цифровое преобразование), но имеют и существенный недостаток — низкие точность и надежность. Индуктивные и емкостные датчики наряду с высокой надежностью, а также стойкостью к внешним факторам [40] не способны обеспечить требуемую высокую точность измерений.

Задача выбора датчиков системы информационного обеспечения МПС усложняется, как уже было сказано ранее, экстремальными условиями внешней среды, в которых функционирует аппаратура космического аппарата.

Жесткие эксплуатационные требования по стойкости к ионизирующему излучению, работе в условиях вакуума, необходимости сохранять работоспособность в широком диапазоне температур, а также по надежности и долговечности накладывают ряд ограничений на использование компонентной базы общепромышленного исполнения. К ограничениям в выборе элементов добавляются также требования по ограничению массы полезной нагрузки КА в целях снижения затрат на выведение на орбиту.

Указанные выше типы датчиков необходимой точности для оснащения МПС космического применения на мировом уровне изготавливаются в единичных экземплярах и имеют высокую цену. На российском рынке такие изделия практически недоступны, а отечественные разработки в этом направлении отсутствуют. Таким образом, разработка и применение измерительной системы на базе перечисленных типов датчиков не представляется целесообразным, и даже возможным. Кроме того, точность перемещения объекта, размещенного на подвижной платформе гексапода, зависит от погрешностей изготовления механизма и требует правильного учета всех кинематических параметров, вводимых в систему управления механизмом для решения прямой и обратной задач кинематики и динамики.

Так для точного определения положения и ориентации платформы гексапода недостаточно измерения только шести линейных перемещений штоков ЛП, поскольку линейные привода, сама подвижная платформа, а также основание гексапода могут быть подвержены значительным температурным и механическим деформациям. Деформации элементов конструкции гексапода влекут за собой смещение точек крепления всех шарниров, включая точные шарниры измерительной системы. Это приводит к появлению дополнительных ошибок, которые должны учитываться при создании прецизионных систем позиционирования и наведения на базе МПС.

В связи с этим, рассмотрим основные факторы, влияющие на точность работы механизма с параллельной структурой типа «гексапод», предназначенного для функционирования в экстремальных условиях космического пространства.

1.4 Факторы, влияющие на точность работы гексапода

Исполнительные механизмы с последовательной и параллельной структурой могут иметь один из двух вариантов системы управления: с обратной связью (ОС) по положению объекта и без ОС.

Основным требованием к МПС является высокая точность позиционирования и наведения подвижной платформы, или максимальное отклонение между истинными (измеренными) и реальными (отработанными) значениями шести координат, составляющих вектор $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \varphi, \xi, \psi]$.

При управлении с обратной связью на точность позиционирования и наведения подвижной платформы МПС влияют погрешность используемой измерительной системы и конечная чувствительность системы приводов механизма к сигналам управления. В этом случае при проектировании измерительные и исполнительные элементы механизма подбирают таким образом, чтобы заданная точность позиционирования и наведения платформы обеспечивалась в процессе работы по сигналам обратной связи.

Как было показано выше, построение гексапода космического применения с системой измерения положения и угловой ориентации подвижной платформы $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \varphi, \xi, \psi]$ сопряжено со значительными техническими, технологическими и экономическими трудностями.

Поэтому, несмотря на очевидные преимущества использования такой системы измерения, рассмотрим факторы, влияющие на точность позиционирования и наведения подвижной платформы механизма с параллельной структурой типа «гексапод» без обратной связи.

При управлении многостепенным механизмом в квазистатичном режиме можно выделить [41–46 и др.] следующие составляющие суммарной ошибки позиционирования и наведения выходного звена МПС (подвижной платформы с объектом): ошибки геометрические и температурные; ошибки, вызванные механическими нагрузками; ошибки управления; прочие ошибки.

Под квазистатичным режимом здесь будем иметь ввиду такой режим отработки механизмом единичных задающих сигналов, при котором переходные процессы, сопровождающие отработку нового положения, к началу следующего задающего сигнала полностью заканчиваются.

Под **геометрическими** подразумеваются ошибки взаимного расположения узлов механизма и их относительного движения, вызванные погрешностями изготовления и сборки шарниров, основания и платформы гексапода, а также в большей степени погрешностями линейного позиционирования приводов.

В общем случае у МПС типа «гексапод» существует 42 источника геометрических ошибок (6 линейных перемещений приводов + 6×2 шарнира $\times 3$ координаты у каждого шарнира в декартовой системе координат) [47].

Температурные ошибки позиционирования и наведения подвижной платформы гексапода возникают вследствие температурного расширения, сжатия и деформации его элементов (шарниров, основания, платформы и линейных приводов) из-за действия таких источников тепла, как: окружающая

среда; двигатели линейных приводов; трение в шарнирах, подшипниках и механических передачах; нагрев объекта, расположенного на подвижной платформе. Существенное влияние изменение температур оказывает на линейное удлинение исполнительных элементов МПС — линейных приводов.

К ошибкам, вызванным **механическими нагрузками**, относят деформацию конструкции механизма под действием статической нагрузки в гравитационном поле для устройств наземного применения, а также сил инерции при движении элементов механизма с ускорением. Механическим деформациям прежде всего подвержены наименее жесткие элементы гексапода — шарниры и механические передачи приводов.

Ошибки **управления** возникают при выполнении измерений датчиками или при оценке положения в бездатчиковой системе, при пересчете измеренных или оцененных величин устройством управления, при формировании устройством сигналов управления, при передаче сигналов, при решении прямой и обратной задач кинематики гексапода из-за расхождения геометрических параметров модели гексапода и его реальной конструкции (эту ошибку также можно отнести к геометрическим ошибкам). Существенное значение имеют также ошибки, возникающие при управлении линейным приводами как динамическими объектами.

К **прочим** можно отнести ошибки, связанные с нестабильностью геометрических размеров конструкционных материалов гексапода; ошибки, вызванные изменением сил трения; а также ошибки, вызванные внешними механическими возмущениями (вибрациями и т.п.).

Для повышения точности механизмов может применяться либо устранение источников ошибок, либо компенсация их влияния. Первый подход подразумевает принятие специальных мер по ходу проектирования и изготовления механизма, которые позволили бы полностью устранить или минимизировать ошибки. К таким методам относится применение высококачественных механических передач, материалов с малыми коэффициентами теплового расширения и т.п. Недостатком данного подхода

является существенное удорожание МПС, а также технические и технологические ограничения, устанавливающие предельную точность.

Согласно второму подходу, в настоящее время разработаны различные методы компенсации наиболее существенных ошибок, возникающих в механизмах с параллельной структурой [44–47].

Так, для повышения точности работы механизма и устранения геометрических ошибок, связанных непосредственно с конструкцией гексапода, выполняют калибровку МПС: измеряют с помощью внешних инструментов или находят с помощью численной оптимизации координаты и угловую ориентацию шарниров и других элементов реального механизма и затем вносят полученные величины в виде параметров математической модели конструкции механизма, заложенной в алгоритме управления [48–50].

Здесь следует отметить, что за счет параллельной структуры механизма, процедура такой калибровки нетривиальна, и зачастую сложно обеспечить снижение ошибок одновременно по всем степеням свободы механизма из-за наличия внутренней взаимосвязи координат [51].

Температурные ошибки в МПС могут быть уменьшены путем принудительного охлаждения соответствующих элементов механизма [52], либо путем термостабилизации конструкций перед началом работы МПС [53].

Для рассматриваемого гексапода космического применения такой метод не подходит, поскольку температурные условия работы механизма существенно зависят от окружающей среды.

На практике при управлении механизмами в станкостроении применяется также метод внесения поправок, рассчитываемых из тепловой модели механизма с учетом измеряемых температур в некоторых заранее определенных характерных точках механизма.

Однако, нелинейный и нестационарный характер тепловых процессов в гексапode за счет пространственно распределённой параллельной структуры описывается достаточно сложно [54–55].

1.5 Выводы по разделу

1. Предельно высокая разрешающая способность радиотелескопов современных космических обсерваторий определяет жесткие требования к точности работы телескопа и устройства его наведения относительно несущей космической платформы на уровне десятков микрометров по линейным координатам и десятков секунд по угловым координатам.

2. Применение высокоточных датчиков абсолютного положения и угловой ориентации подвижной платформы гексапода космического применения затруднительно в связи с техническими, технологическими, экономическими и эксплуатационными ограничениями.

3. 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. Основными составляющими погрешности работы МПС являются ошибки геометрические, температурные, ошибки управления, ошибки вызванные механическими нагрузками.

4. Среди рассмотренных источников погрешности существенные составляющие ошибок позиционирования и наведения подвижной платформы механизма сосредоточены в основном в его линейных приводах.

5. 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.

6. Целесообразно пойти по пути увеличения точности работы механизма с параллельной структурой путем уменьшения погрешностей работы его линейных приводов, устраняя влияние связанных с ЛП источников ошибок.

2 ЛИНЕЙНЫЙ ПРИВОД МЕХАНИЗМА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

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 при диапазоне перемещения до 200 мм [56–58].

Существуют различные кинематические схемы и конструктивные решения по компоновке прецизионных линейных приводов микрометровой точности [59, 60 и др.]. Рассмотрим возможные варианты построения исполнительной и информационно-измерительной частей ЛП гексапода.

2.1 Исполнительная часть линейного привода

В общем случае в зависимости от вида энергии, создающей усилие, возможно построение линейного привода на основе пневматических, гидравлических и электрических исполнительных устройств.

Гидравлический привод может обеспечить точность до десятых долей миллиметра, имеет возможность фиксации в любом промежуточном положении рабочего органа. Пневматический привод обладает низкой точностью, а в промежуточных положениях точность фиксации рабочего органа осуществляется достаточно сложно [61].

Поскольку гексапод предназначен для функционирования в условиях вакуума и подвержен значительному перепаду температур и действию ионизирующего излучения, построение прецизионного ЛП для такого МПС на основе гидро- и пневмодвигателей принципиально невозможно.

В современном прецизионном исполнительном оборудовании широкое распространение получили пьезодвигатели — устройства, в которых механическое перемещение достигается за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта.

По своему устройству и техническим характеристикам существует несколько различных типов пьезоэлектрических двигателей. Пьезоэлектрические двигатели специального исполнения производятся отечественной компанией АО «НИИ «Элпа» (см. рисунок 2.1), а также рядом иностранных фирм (*Faulhaber*, *Physikinstrumente* и др.)



Рисунок 2.1 — Линейный пьезодвигатель ППУ-1 ф. АО «НИИ «Элпа»

Достоинствами пьезодвигателей являются малая дискретность позиционирования (единицы нанометров), высокое толкающее и удерживающее усилие, сравнительно большой КПД [62].

К недостаткам таких двигателей можно отнести необходимость применения специальных способов управления высокочастотным и высоковольтным источником питания, нестабильность параметров материалов во времени и при изменении температуры окружающей среды [63], а также быстрый износ деталей, контактирующих в процессе движения.

Возможен также вариант построения линейного привода на основе электромагнитного двигателя, у которого статор разомкнут и имеет развёрнутую обмотку, создающую магнитное поле, а подвижный элемент взаимодействует с ним и обеспечивает линейное перемещение подвижной части двигателя. Наиболее распространены линейные асинхронные, синхронные, магнитострикционные электродвигатели.

Последний тип привода является короткоходовыми (доли и единицы миллиметров). Асинхронный ЛП обычно применяется в высоконагруженных приложениях (конвейеры, траволаторы). В позиционных системах применяются синхронные машины с постоянными магнитами, в частности, линейный шаговый двигатель (ЛШД), показанный на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 — Линейный шаговый двигатель RCS4 ф. IAI America

Отклонение положения от желаемого при позиционном управлении ЛШД без обратной связи по положению составляет до 50 мкм. Ошибка позиционирования в таких системах может быть уменьшена путем программной компенсации [64], однако на настоящий момент на мировом рынке отсутствуют линейные шаговые двигатели, которые рассчитаны на работу в условиях космического пространства.

Кроме того, электрические машины типа ЛШД имеют более высокие массогабаритные показатели по сравнению с комбинированными линейными приводами, состоящими из двигателя углового перемещения и механической передачи для преобразования вращательного движения вала электродвигателя в поступательное движение штока линейного привода [65].

Линейные привода последнего типа могут быть построены на различных механических передачах. Червячная, кривошипно-шатунная, кулисная, эксцентриковая, кулачковая, план-шайбовая передачи, а также шотландский механизм ввиду очевидных причин неприменимы для указанных целей.

Одним из самых простых механизмов для преобразования вращательного движения в поступательное является реечная передача (кремальера). Несмотря на высокий КПД до 98%, у реечной передачи отсутствует выигрыш в силе и в ряде случаев необходим дополнительный редуктор. Кроме того, имеются конструктивные сложности по обеспечению необходимой дискретности перемещения, а также технологические сложности в получении заданной точности позиционирования.

Тросовая, ременная и зубчатоременная передачи при относительно малых габаритных размерах обеспечивают высокую нагрузочную

способность, плавность работы, сравнительно большие передаточные числа, высокий КПД. Недостатком таких передач является невозможность стабильного получения заданной точности позиционирования ввиду малой жесткости конструкции, а также старение элементов в процессе эксплуатации.

Наибольшее же распространение в приводах линейного перемещения станков, контрольно-измерительных машин, мехатронных и робототехнических систем, в том числе космического применения, получили передачи типа «винт-гайка» [66]. Такие передачи делятся на передачи скольжения и передачи качения. Работа передач скольжения основывается на трении, поэтому такие механизмы имеют большую площадь контакта и как следствие — высокую жесткость и грузоподъемность. Но при этом у них очень низкий КПД, на уровне 0,1-0,4 по сравнению с 0,8-0,95 у передач качения.

Передачи качения имеют возможность устранения люфтов в механизме за счет создания предварительного натяга, слабую зависимость силы трения от скорости и небольшое трение покоя, малую изнашиваемость, а значит и повышенный ресурс. Все эти факторы являются их преимуществом. К недостаткам передач качения относят отсутствие самоторможения (в отличие от передач скольжения), высокую сложность и стоимость изготовления. Передачи качения делятся на шариковинтовые и роликовинтовые.

Шариковинтовые передачи (ШВП, см. рисунок 2.3) обладают высоким КПД и позволяют достичь достаточно высоких скоростей работы, однако жесткость и грузоподъемность ШВП по сравнению с передачей скольжения намного ниже за счет меньшей площади контакта шариков с беговой дорожкой по сравнению с трапецеидальной резьбой передачи скольжения.



Рисунок 2.3 — Шариковинтовая передача ф. ООО «Уралремдеталь»

На протяжении последних лет всё большее применение находят роликовинтовые передачи (РВП), которые постепенно вытесняют ШВП из различных отраслей. Среди роликовинтовых передач различают два типа: рециркуляционные и планетарные передачи.

Роликовинтовые передачи имеют большую грузоподъемность за счет увеличенного числа точек контакта и общей площади контакта относительно ШВП. РВП также обладают устойчивостью к ударным нагрузкам и сохраняют работоспособность в отсутствие смазки, меньше подвержены износу [67].

Резьбовые детали РВП по сравнению с ШВП можно изготовить с меньшим шагом резьбы, что позволяет получить требуемую дискретность перемещения гайки и работать с большими частотами вращения винта без установки промежуточного редуктора.

Существует большое число конструктивных разновидностей этих передач, наиболее распространены планетарные РВП с длинными и короткими роликами, а также с рециркуляцией роликов.

Однако, преимущества РВП накладываются на ряд технологических ограничений. В России только на предприятии ПАО «АВТОВАЗ» освоено серийное изготовление РВП, однако в 2011 г. в связи с переходом на другой тип сварочных роботов, которые являлись основным потребителем РВП, произошел спад производства роликовинтовых передач [68].

В нашей стране постепенно осваивается изготовление РВП в условиях единичного производства [69] (см. рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 — Планетарная роликовинтовая передача производства АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева»

Отдельно стоит отметить, что на мировом уровне производство точных РВП освоили такие зарубежные фирмы как *SKF*, *Rollvis*, *NOOK*, и др., а соответствующие передачи используются в составе технологического оборудования, авиационной и ракетно-космической техники, робототехнических систем, испытательных стендов и т.д.

Кинематическая точность и КПД шариковинтовых передач и РВП одного класса примерно одинаковы, но стоимость и трудоемкость изготовления РВП значительно выше [67–70]. Поэтому в условиях отечественного рынка в конструкции линейного привода целесообразно использовать отработанное технологическое решение — ШВП.

Для обеспечения высокой дискретности (малых шагов) линейного перемещения применяется в том числе технология совмещения привода с ШВП и пьезоэлектрического двигателя — т.н. гибридный линейный привод [71]. Однако такой привод подразумевает использование прецизионных датчиков линейного перемещения, является менее надежным и имеет ограниченный частотный диапазон управления.

Рассмотрим возможные варианты приводных электродвигателей, предназначенных для углового позиционирования ведущей части ШВП.

В космической технике используются электрические двигатели постоянного или переменного тока [72]. В настоящее время коллекторные двигатели постоянного тока (ДПТ) вытесняются машинами переменного тока, поскольку последние имеют большие сроки службы и надёжность за счёт отсутствия скользящих электрических контактов [73].

Среди машин переменного тока в исполнительных приводах мехатронных и робототехнических устройств наибольшее распространение получили специальные синхронные электродвигатели, имеющие по сравнению с другими электродвигателями лучшие показатели удельной мощности, коэффициента полезного действия, а также надежности.

К таким машинам относится синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), имеющий синусоидальное распределение противо-ЭДС.

На базе СДПМ обычно строится вентильный привод — система электропривода, состоящая из двигателя, усилителя и устройств управления, обеспечивающего коммутацию фазных обмоток электродвигателя в зависимости от текущего углового положения его ротора. Механическая и регулировочная характеристики привода в этом случае линейны и идентичны характеристикам ДПТ [74]. Производством таких машин занимается ряд отечественных (ООО «*KUBO Technologies*», ОАО «Машиноаппарат») и иностранных компаний (*Maxon Motor* и др.)

Разновидностью синхронного двигателя является шаговый двигатель (ШД) — машина с дискретным угловым перемещением ротора, осуществляемым за счет попеременной подачи импульсов на фазные обмотки. Шаговый двигатель является более предпочтительным для устройств позиционирования в случае движения с небольшой скоростью.

Распространены шаговые двигатели с размером шага $1,8^\circ$ (200 шагов на оборот вала). Зачастую применяется т.н. микрошаговое управление, при котором каждый целый шаг дробится на 4, 8, 16, 32 и более микрошагов, и осуществляется квазинепрерывное угловое позиционирование вала шагового двигателя. Наиболее часто применяемый тип ШД — гибридный двигатель — имеет ярко выраженную полюсную фиксацию момента на роторе при отсутствии импульсов управления.

Достоинством ШД является возможность работы без датчика углового положения (при номинальных режимах работы и отсутствии перегрузок по моменту, влекущих пропуск шагов), стабильность характеристик, наличие остаточного тормозящего момента при отключении питания, [75]. Так, даже при выходе из строя датчика углового положения, управление шаговым двигателем может осуществляться без обратной связи с точностью в пределах дискретности одного шага двигателя.

На рынке представлена номенклатура шаговых двигателей космического применения как отечественного, так и иностранного производства, поэтому наиболее оптимальным на сегодняшний день в

качестве электродвигателя линейного привода гексапода космического применения является выбор шагового двигателя. К мировым лидерам по разработке ШД космического применения для различных исполнительных механизмов можно отнести компании *Phytron*, *Sagem*, *FAULHABER*.

Среди отечественных производителей выделяются АО «Корпорация «ВНИИЭМ», АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва» (см. рисунок 2.5) и другие.

При непосредственном соединении приводного двигателя и линейной механической передачи развиваемое приводом усилие будет недостаточным, поэтому в составе линейного привода также применяется промежуточный редуктор вращательного типа.

Среди всего разнообразия редукторов машино- и приборостроительного применения для применения в линейном приводе наиболее подходящими являются планетарный и волновой редукторы.

Достоинствами планетарного редуктора являются возможность получения больших передаточных отношений в условиях ограниченных габаритов, а также высокие динамические характеристики.

Однако, волновой редуктор имеет большую кинематическую точность и плавность хода. С учетом того, что линейный привод имеет малую скорость, применение волнового редуктора является оптимальным. Имеется ряд иностранных и отечественных производителей волновых редукторов (см. рисунок 2.6), в том числе предназначенных для применения в жестких условиях космического пространства.



Рисунок 2.5 — Шаговый двигатель космического применения производства АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва»



Рисунок 2.6— Волновой редуктор ф. «Сервосила»

2.2 Информационно-управляющая часть линейного привода

Применение современных датчиков линейного положения различного типа позволяет достигать высоких точностей позиционирования. При этом основным требованием к датчику линейного положения является минимальная абсолютная погрешность измерения.

При проектировании исполнительных приводов обычно закладывают величину собственной ошибки измерения датчика не более 50% величины допустимой ошибки позиционирования, т.е. для линейного привода необходимо, чтобы величина погрешности датчика была не более ± 1 мкм. Необходимый диапазон измеряемых датчиком перемещений равен требуемому рабочему ходу линейного привода и составляет 200 мм.

В зависимости от типа первичного датчика, обработка и выделение полезной составляющей сигнала может быть реализована как достаточно просто (фильтры на пассивных элементах, операционные усилители, аналого-цифровые преобразователи), так и с применением специальных высокочастотных схем выборки и преобразования, оптических модуляторов, эталонных мер и др. специальных сложных и дорогостоящих устройств.

Как и в случае с системой измерения положения и угловой ориентации подвижной платформы, экстремальные условия внешней среды, в которых функционирует аппаратура космического аппарата, накладывают ряд ограничений и на используемую компонентную базу линейного привода. К информационно-измерительной системе ЛП предъявляются жесткие эксплуатационные требования стойкости к ионизирующему излучению, возможности работы в вакууме и при широком диапазоне температур (± 80 °C), стойкость к электромагнитным возмущениям и жестким механическим возмущениям при выводе полезной нагрузки.

Первичный датчик и его система обработки также должны иметь минимальные массу и габаритные размеры в целях снижения общей массы КА с нагрузкой, а стоимость такой измерительной системы не должна быть запредельно высокой.

В соответствии с вышеизложенными требованиями выполнен анализ наиболее доступных к применению датчиков линейного перемещения [76–81].

В сравнительной таблице 2.1 приведены их характеристики. Типовая абсолютная погрешность измерения датчиков приведена для диапазона измерений 200 мм при условии работы первичных датчиков и системы обработки при нормальной температуре (20 °С) с незначительным допустимым диапазоном отклонений.

Таблица 2.1 — Характеристики наиболее распространенных типов датчиков линейного перемещения

Тип датчика линейного положения	Типовая абсолютная погрешность, мкм	Диапазон измеряемых перемещений, мм	Простая схема измерений	Наличие стойких к ионизирующему излучению решений	Нечувствительность к электромагнитным возмущениям	Нечувствительность к механическим возмущениям	Небольшие габариты	Низкая стоимость
вихретоковый	± 100	< 10						
емкостной	± 10	< 10	+	+			+	+
индуктивный	± 30	> 200	+	+	+	+	+	+
интерферометрический	$\pm 0,2$	> 200			+			
магниторезистивный	± 400	> 200						+
магнитострикционный	± 20	> 200			+			
оптический	$\pm 0,6$	> 200			+			
потенциометрический	± 500	> 200	+	+	+		+	+
тензометрический	± 400	> 200	+	+	+		+	+
ультразвуковой	± 1600	> 200			+	+		
на основе эффекта Холла	± 20	> 200				+	+	

Из таблицы 2.1 видно, что требуемую абсолютную погрешность измерения обеспечивают интерферометрический и оптический датчики, однако на сегодняшний день коммерчески доступные решения космического применения для отечественной техники отсутствуют.

Результаты сравнительного анализа датчиков раскрывают основную проблему прецизионного управления линейными приводами механизмов с параллельной структурой космического применения: при отсутствии возможности использования датчика линейного положения в качестве

основного элемента обратной связи необходимо реализовать точное линейное позиционирование штока привода.

В связи с этим, рассмотрим возможную реализацию линейного привода с косвенной обратной связью по положению (см. рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 — Структурная схема линейного привода с косвенной обратной связью по положению

Согласно рисунку 2.7, исполнительная часть линейного привода включает в себя двигатель, редуктор, шарико-винтовую передачу, а также шток, закрепляемый на подвижном элементе ШВП.

Информационно-измерительную часть ЛП составляет датчик углового положения (ДУП) вала двигателя, а также концевые датчики линейного положения штока ЛП. Таким образом, в рассматриваемом ЛП используются косвенный датчик измерения линейного положения.

Применяемый ДУП обеспечивает местную обратную связь, формируя информацию об угловом положении вала двигателя θ в пределах одного оборота, которая путем пересчета преобразуется в линейное положение штока L . Теоретическая функция связи величин θ и L (при зафиксированной от проворота ходовой гайке ШВП) выглядит следующим образом:

$$L(\theta) = \frac{k_{\text{ШВП}}(2\pi n + \theta)}{k_p}, \quad (2.1)$$

где $k_{\text{ШВП}}$ — шаг шарико-винтовой передачи линейного привода, мм/рад; n — количество оборотов вала двигателя, k_p — передаточное число редуктора.

Количество оборотов вала n , а с ним и абсолютное линейное положение L штока определяются системой управления ЛП после подачи питания и выполнения «обнуления» — позиционирования в нулевом положении по сигналам концевых датчиков линейного привода.

Следует отметить, что применение шагового двигателя в качестве приводного позволяет обеспечить угловое перемещение θ не только с дискретностью шага ШД, но и с меньшей дискретностью, например, путем управления с дроблением шага или построения вентильного привода [82, 83].

Как и в случае датчиков линейного положения (см. таблицу 2.1), в качестве ДУП возможно использовать датчики различного типа. Однако, наибольшее применение в приводах, работающих в экстремальных условиях, получили индуктивные датчики углового положения, которые преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в ЭДС индукции.

К таким датчикам относится вращающийся трансформатор, предназначенный для преобразования угла поворота в два электрических сигнала, амплитуда которых является, соответственно, функцией синуса и косинуса угла. Совместная обработка двух сигналов позволяет получить абсолютное значение угла поворота.

Синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ) бывают как одноотсчётными, так и двухотсчётными. Наличие у СКВТ двух отсчетов повышает точность определения углового положения.

СКВТ широко используются в авиакосмической [84], оборонной и нефтехимической отраслях за счет своей надежности и устойчивости к электромагнитным помехам, механическому воздействию и ионизирующему излучению. Доступны вращающиеся трансформаторы космического применения отечественного и иностранного производства (АО «Корпорация «ВНИИЭМ», *Zettlex LLC* и др).

В качестве концевых датчиков возможно использование индуктивных датчиков, либо специализированных оптопар.

При этом для повышения точности определения нулевого положения в рассматриваемой схеме целесообразно использовать схему комбинирования трех отдельных датчиков. Один из них (грубый) располагается в начале хода подвижной части ШВП и определяет нулевое положение с точностью порядка десятых долей миллиметра. При срабатывании грубого датчика еще один промежуточный датчик фиксирует нулевое угловое положение выходного вала редуктора, и далее третий точный датчик фиксирует угловое положение вала двигателя. Комплексируя сигналы указанных датчиков, можно достичь точности определения нулевого положения в пределах 0,1-0,2 мкм.

Отметим важное преимущество описанной системы управления. При использовании в ЛП только датчика линейного положения при выходе последнего из строя такой привод теряет работоспособность.

Использование же косвенной обратной связи и комбинированной схемы датчика нулевого положения привода в целом повышает надежность работы ЛП и дает возможность обеспечить длительный срок активного существования гексапода, поскольку:

- датчик углового положения на основе СКВТ имеет большую надежность за счет более простой конструкции;
- даже при выходе из строя ДУП, как было отмечено выше, шаговый двигатель сможет обеспечить точное разомкнутое позиционирование с ошибкой в пределах одного шага.

2.3 Кинематическая схема линейного привода

Для прецизионного управления платформой по шести степеням свободы наиболее часто применяются либо кинематическая схема привода со сферическим шарниром платформы, двухосным шарниром основания и одной линейной степенью свободы, либо схема с двухосными шарнирами в платформе и основании, линейной степенью свободы и возможностью углового проворота подвижной части привода относительно

неподвижной [85]. В рассматриваемом механизме применяется вторая схема с двухосными шарнирами в платформе и основании, поскольку в такой конструкции проще обеспечивается требуемая точность шарниров и исключается дополнительная погрешность, связанная с механизмами ограничения углового проворота.

Кинематическая схема такого линейного привода показана на рисунке 2.8 и соответствует структурной схеме, приведенной на рисунке 2.7.

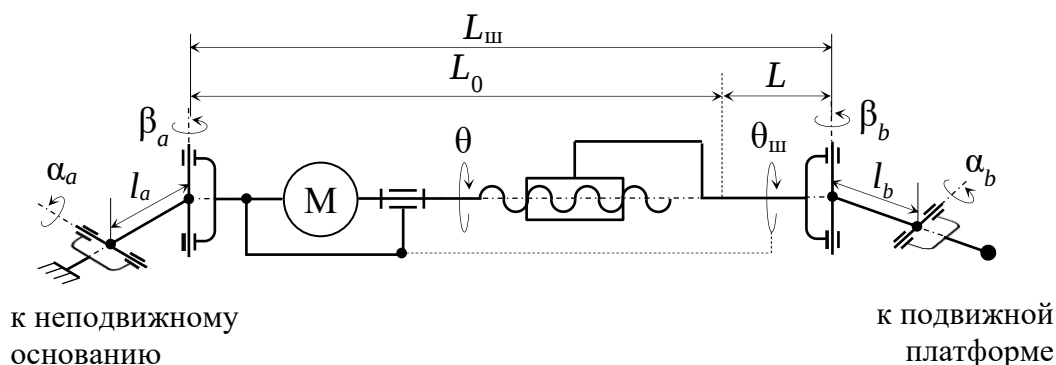


Рисунок 2.8 — Кинематическая схема линейного привода гексапода

Привод представляет собой законченный электромеханический узел, имеющий встроенные приводную, информационно-измерительную и управляющую подсистемы (на рисунке не показаны), и имеет шесть степеней свободы: угловые перемещения α_a, β_a двухосного шарнира, закрепляемого на основании гексапода; α_b, β_b — соответствующие перемещения шарнира, закрепляемого на подвижной платформе; абсолютное линейное положение $L_{\text{ш}}$ штока ЛП; угловое перемещение $\theta_{\text{ш}}$ штока относительно корпуса привода. На рисунке 2.8 также обозначены расстояния между двумя пространственно разнесенными осями шарниров l_a и l_b , а также угол поворота вала двигателя относительно его корпуса θ .

Для удобства далее будем использовать относительное линейное положение L ЛП, определяемое как удлинение привода относительно некоторого нулевого положения L_0 (см. рисунок 2.8).

Рассматриваемая конструкция линейного привода предусматривает возможность поворота на угол $\theta_{ш}$ штока относительно корпуса привода, что позволяет упростить конструкцию ног механизма и, таким образом, повысить надежность системы. Однако, для точного управления требуется решение расширенной обратной задачи кинематики — вычисление угловых перемещений $\Theta = [\theta_1, \dots, \theta_6]^T$ по заданному вектору $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \phi, \xi, \psi]$ с учетом поворота двухосных шарниров и осевого проворота $\theta_{ш}$ каждого линейного привода. Решение такой задачи приводится в работах [85 и др], поэтому далее при рассмотрении процессов управления линейным приводом будем считать, что система управления гексаподом формирует задающие сигналы $\mathbf{L} = [L_1, \dots, L_6]^T$ с учетом указанного поворота $\theta_{ш}$, а привод должен отработать заданное положение в соответствии с выражением (2.1).

На рисунке 2.9 показан разработанный в рамках НИОКТР линейный привод. Кинематическая схема привода соответствует представленной выше схеме на рисунке 2.8.



Рисунок 2.9 — Линейный привод гексапода

Для решения задач механического и теплового анализа для линейного привода будем использовать общепринятый численный метод — метод конечных элементов. Для этого разработана конечно-элементная модель в САПР ANSYS ®. Для каждого конструктивного элемента линейного привода в соответствии с конструкторской документацией заданы соответствующие характеристики: плотность материала, механические характеристики, теплопроводность, коэффициент линейного температурного расширения и др.

Определим линейное положение привода L как положение относительно начальной (нулевой) позиции гайки, т.е. при полностью задвинутом штоке линейного привода.

На рисунках 2.10 и 2.11 показаны трехмерные конечно-элементные модели линейного привода (некоторые конструктивные элементы не показаны) со сформированной расчётной сеткой для двух крайних линейных положений $L = 0$ мм и $L = 200$ мм.

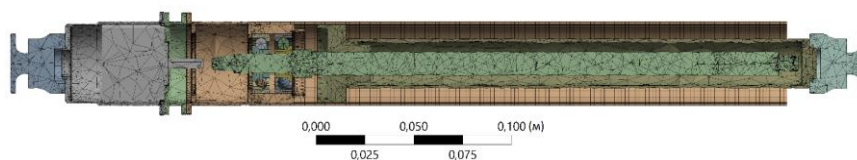


Рисунок 2.10 — Конечно-элементная модель линейного привода ($L = 0$ мм)

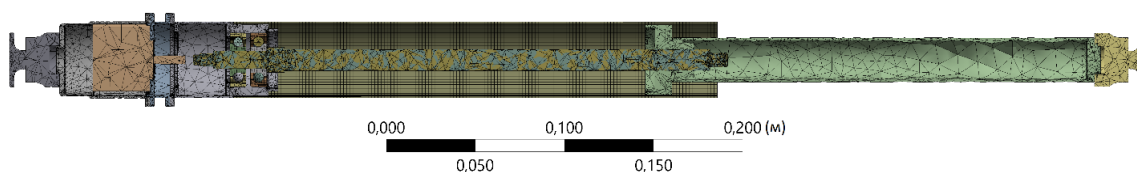


Рисунок 2.11 — Конечно-элементная модель линейного привода ($L = 200$ мм)

Далее рассмотрим основные факторы, влияющие на ошибки работы линейного привода рассматриваемой конструкции, не имеющего обратной связи по положению, и выполним оценку достижимой точности линейного позиционирования штока привода.

2.4 Источники погрешности линейного привода

В подразделе 1.4 классифицированы ошибки, возникающие при работе механизмов с параллельной структурой. Аналогичным образом опишем основные составляющие суммарной погрешности позиционирования штока линейного привода МПС, разбив их на следующие группы: геометрические ошибки; температурные ошибки; ошибки, вызванные механическими нагрузками; ошибки управления; прочие ошибки.

2.4.1 Геометрические ошибки

Изготовление элементов линейного привода, а также сборка ЛП связаны с неизбежным отклонением размеров деталей и сборочных единиц от номинальных значений. Для устранения влияния таких погрешностей на конечную точность ЛП после выполнения его сборки выполняют измерение

осевого размера в характерных точках и в дальнейшем учитывают необходимые статические поправки при управлении ЛП (L_0 на рисунке 2.8).

Основным элементом линейного привода является шарико-винтовая передача, главной характеристикой которой является зависимость между действительным и номинальным осевыми перемещениями гайки ШВП.

Типовая зависимость кинематической погрешности винтовой пары от номинального осевого перемещения гайки и ее численные параметры приводится в справочной литературе производителей ШВП [86 и др.]. Кинематическая погрешность шарико-винтовой передачи e_L является систематической и связана с технологическими особенностями ее изготовления, в первую очередь с точностью угла подъема резьбы.

Для рассматриваемого линейного привода вид характеристики ШВП $e_L = f(L)$ представлен на рисунке 2.12.

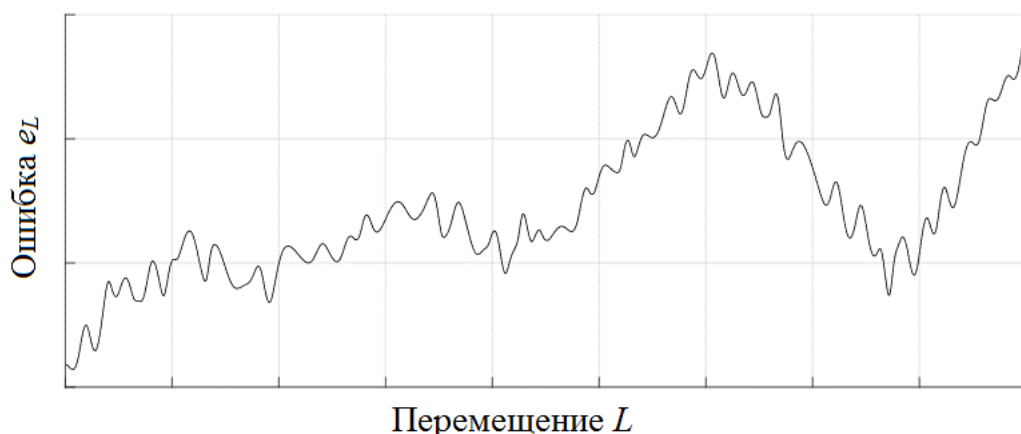


Рисунок 2.12 — Типовая зависимость кинематической погрешности винтовой пары от номинального осевого перемещения гайки

По точностным параметрам ШВП разделяют на позиционные и транспортные. Первые имеют значительно меньшие значения погрешности на большом перемещении и поэтому наиболее часто применяются в прецизионных конструкциях. Согласно отечественному [149] и иностранным [150–152] стандартам, установлено несколько классов точности ШВП, из которых самые точные передачи на заданной для линейного привода длине

хода гайки 200 мм могут иметь типовое значение кинематической погрешности от 6 мкм. Доступные на отечественном рынке ШВП, в том числе космического исполнения, обладают еще более худшими характеристиками [87]. При этом изготовление передач высокого класса точности сопряжено со значительными технологическими трудностями, а их применение значительно удорожает конечную конструкцию привода.

Для систем линейного позиционирования важное значение имеет изменение ориентации системы направляющих во время перемещения.

Точность угла подъема резьбы в ШВП равна точности позиционирования центра вала в ней (см. рисунок 2.13), т.е. изменение ориентации в двух плоскостях (при наклоне и крене) во время перемещения влияет на точность линейного позиционирования.

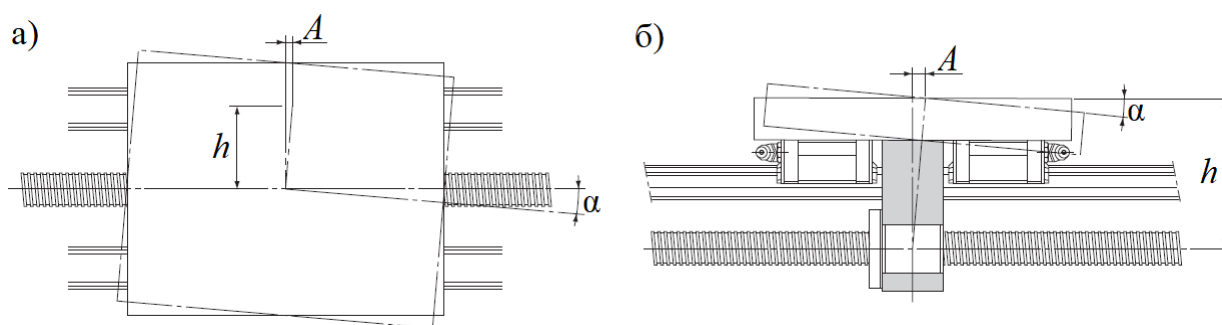


Рисунок 2.13 — Изменение ориентации шарико-винтовой передачи

Важнейшим параметром в изменении ориентации, влияющем на точность позиционирования, является угол наклона, если изменение имеет место по центру шарико-винтовой передачи и в вертикальной плоскости (рисунок 2.13, а), и угол крена – если изменение происходит горизонтально (рисунок 2.13, б). Точность определяется отдельно для наклона и крена выражением $A = h \cdot \sin(\alpha)$, где h — расстояние от оси ШВП до оси измерения, α — угол наклона или крена соответственно.

Рассматриваемый линейный привод имеет жесткие направляющие, обеспечивающие минимальные наклон и крен ШВП, поэтому указанное изменение ориентации и связанная с ним ошибка будут незначительными.

Собственную погрешность хода (углового перемещения) имеет также волновой редуктор. Производителями волновых редукторов заявляется величина погрешности при номинальной нагрузке редуктора до 2 угловых минут [88], 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, шариковая винтовая передача и шарниры. В станкостроении вносят программные поправки на величину люфта [89], однако в многостепенных механизмах с параллельной структурой типа «гексапод» при одновременной работе шести линейных приводов с люфтами в элементах наблюдается так называемая интерференция, или взаимонагружение линейных приводов.

Результирующий «мертвый ход» каждого привода в этом случае носит стохастический характер, предсказать который практически невозможно, поэтому в элементах рассматриваемого линейного привода гексапода выполняется предварительный натяг, обеспечивающий отсутствие люфтов и в то же время не создающий значительных фрикционных нагрузок.

Производителями волновых редукторов заявляется величина люфта при номинальной нагрузке редуктора в 1 угловую минуту [88], что при пересчете в линейное положение штока составляет около 0,1 мкм, поэтому данной величиной также можно пренебречь.

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 практически не приводит к возникновению дополнительных погрешностей работы линейного привода.

Немаловажным фактором, определяющим точность работы линейного привода, является механический износ его элементов, и, в первую очередь, шарико-винтовой передачи. Расчётный ресурс по износу ШВП равняется статистически определённом количеству оборотов, которое может выполнить ШВП до появления первых признаков усталости материала в виде отслаивания на поверхностях качения элементов передачи. Согласно стандартам, которыми руководствуются производители ШВП, расчётный ресурс по износу равен одному миллиону оборотов [90].

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.

2.4.2 Температурные ошибки

Существенным источником погрешности работы линейного привода является объемное и линейное изменение размеров его элементов при работе в широком температурном диапазоне. При этом к источникам температурных возмущений линейного привода можно отнести окружающую среду, трение в элементах механизма при их относительном движении, а также джоулево тепло в обмотках двигателя.

Оценим температурные деформации ЛП, поставив задачу конечно-элементного моделирования следующим образом: шарнир (слева на рисунках 2.10 и 2.11) жестко закреплен по своей внешней плоской поверхности; теплообмен с окружающей средой отсутствует (случай укрытия ЛП и гексапода экранно-вакуумной теплоизоляцией — ЭВТИ); для всех элементов привода задана одинаковая и постоянная температура $T_{\text{ЛП}}$; первоначальные

размеры элементов ЛП заданы при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$; заданное линейное положение L постоянно; отслеживается температурное изменение линейного положения ΔL_T внешней плоскости правого шарнира (см. рисунок 2.14) вдоль оси ЛП относительно её положения при $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

На рисунке 2.14 показаны результаты конечно-элементного моделирования для различных температур и заданных положений штока. В таблице 2.2 приведены численные результаты моделирования.

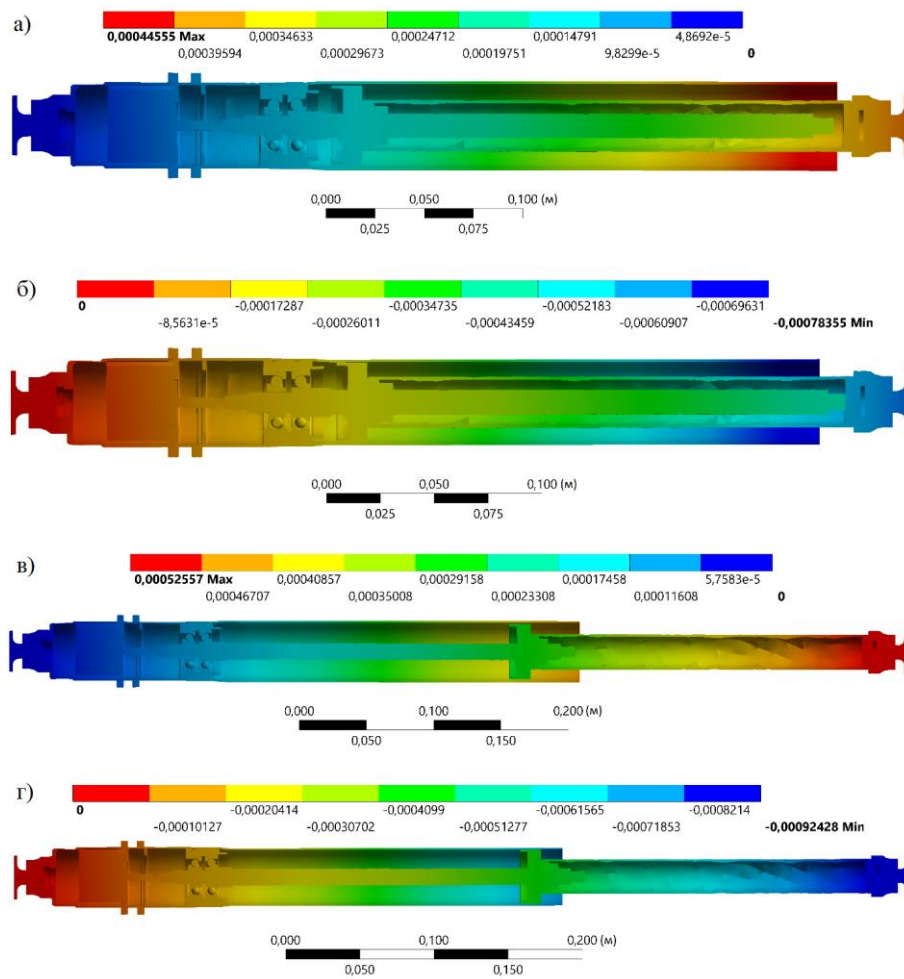


Рисунок 2.14 — Результаты конечно-элементного моделирования ЛП

Таблица 2.2 — Результаты конечно-элементного моделирования ЛП

№ п/п	№ рисунка	Температура ЛП $T_{\text{ЛП}}$	Заданное положение L	Температурная деформация ΔL_T
1	2.14, а)	+ 80 °C	0 мм	389 мкм
2	2.14, б)	– 80 °C	0 мм	– 683 мкм
3	2.14, в)	+ 80 °C	200 мм	526 мкм
4	2.14, г)	– 80 °C	200 мм	– 923 мкм

2.4.3 Ошибки, вызванные механическими нагрузками

При работе гексапода в линейных приводах возникают осевые (продольные) механические нагрузки. Их источниками являются силы инерции при торможении или ускорении подвижных элементов приводов, силы тяжести, а также передающиеся от соседних приводов усилия при т.н. интерференции ЛП. Эти силы с учетом конечной осевой жесткости линейных механизмов приводят к упругой деформации и возникновению погрешности линейного положения. Для рассматриваемого МПС космического применения за счет невысоких рабочих скоростей и ускорений, действием сил инерции можно пренебречь. Усилия со стороны соседних приводов за счет взаимной интерференции также будут незначительными. Однако силы тяжести, действующие в гексапode наземного применения, в разомкнутых приводах могут привести к существенным ошибкам.

2.4.4 Ошибки системы управления

На конечную точность линейного привода существенное влияние оказывают ошибки, вносимые его системой управления (СУЛП).

В первую очередь, это ошибка датчика углового положения. Для датчиков типа одноотсчётного вращающегося трансформатора на один оборот можно получить до 16 разрядов [91], однако типовая ошибка составляет $1/2^{12}$ оборота. При использовании наблюдателя состояния (см. подраздел 3.2) ошибка оценки линейного положения будет выше, но не превысит $e_{\text{упр.д.}} = 0,1 \text{ мкм}$. К ошибкам системы управления относятся также статическая и динамическая ошибки работы регулятора СУЛП. Далее рассмотрим процесс синтеза регуляторов, минимизирующих такие ошибки.

Еще одной составляющей является ошибка углового позиционирования вала электродвигателя вследствие неравномерного распределения обмоток двигателя и датчика углового положения, величина которой оценивается на уровне 20 угловых минут [92], т.е. $e_{\text{упр.обм.}} \approx 0,04 \text{ мкм}$.

Существенной составляющей ошибки системы управления является ошибка датчика нулевого положения (ДНП), которая может составлять десятые доли миллиметра при учете только сигналов ДНП. Однако, при комплексировании сигналов ДНП и датчика углового положения, ошибка определения нулевого положения определится величиной $e_{\text{упр.д.}}$.

2.4.5 Прочие ошибки

К прочим можно отнести ошибки, вызванные температурными, временными и деградационными (под действием радиации) изменениями параметров электрорадиоизделий (ЭРИ) измерительной части системы управления линейным приводом.

Также могут проявляться ошибки, вызванные временной нестабильностью геометрических форм и размеров деталей линейного привода за счет изменения фазового и структурного состояния материала и релаксацией остаточных внутренних напряжений, возникающих в деталях в процессе различных технологических операций горячей и холодной обработки, при механосборочных операциях и в процессе длительного хранения, за счет микроползучести под действием внешних нагрузок [93, 94].

Линейный привод и его система управления построены на базе материалов и электрорадиоизделий прецизионного космического исполнения, изготовлены с соблюдением необходимых технологических требований, поэтому влиянием указанных эффектов в пределах срока активного существования изделия можно пренебречь.

2.4.6 Оценка максимального значения ошибок

Информация по результатам анализа литературы [84–94 и др.] сведена в таблицу 2.3, где представлены составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода, оценка их максимальных значений, а также возможные методы их уменьшения.

Таблица 2.3 — Составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода

Составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода	Оценка макс. значения	Возможный метод уменьшения ошибки
<i>Геометрические ошибки</i>		
Погрешности изготовления элементов и сборки ЛП	сотни мкм	Программная компенсация
Кинематическая погрешность редуктора и ШВП	десятки мкм	
Люфты в элементах линейного привода	десятки мкм	Предварительный натяг
Погрешности, возникающие из-за действия сил трения качения и скольжения	единицы мкм	Управление с обратной связью по угловому положению вала электродвигателя
Механический износ и пластические деформации элементов линейного привода	сотни мкм	Обеспечение работы привода в допустимых диапазонах осевой нагрузки, частот вращения, ускорений, условий смазывания, температурных режимов, а также чистоты рабочей зоны
<i>Температурные ошибки</i>		
Температурное изменение размеров элементов ЛП под действием факторов окружающей среды	сотни мкм	Программная компенсация
Температурное изменение размеров элементов ЛП при нагреве от трения	единицы мкм	
Температурное изменение размеров элементов ЛП при нагреве от электродвигателя	единицы мкм	
Погрешности определения нулевого положения штока линейного привода при изменении температуры	десятки мкм	

Составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода	Оценка макс. значения	Возможный метод уменьшения ошибки
Ошибки, вызванные механическими нагрузками		
Упругая деформация элементов ЛПП под действием сил инерции при их торможении или ускорении	десятки мкм	Ограничение динамики работы ЛПП на программном уровне.
Упругая деформация элементов ЛПП под действием статической нагрузки	десятки мкм	Программная компенсация
Взаимонагружающие усилия (интерференция линейных приводов)	единицы мкм	
Ошибки управления		
Погрешности работы регулятора положения системы управления	доли мкм	Повышение качества работы регулятора на программном уровне
Погрешности обработки сигналов датчиков нулевого положения штока ЛПП и углового положения вала электродвигателя	доли мкм	Повышение точности работы аппаратной части системы управления
Прочие ошибки		
Временная нестабильность геометрических размеров элементов линейного привода	десятки мкм	Соблюдение технологии изготовления элементов
Погрешности работы электродвигателя из-за неравномерного расположения обмоток статора	единицы мкм	Программная компенсация
Погрешности работы датчика углового положения из-за неравномерного расположения обмоток статора	единицы мкм	
Временная и температурная нестабильность параметров аппаратной части системы управления	единицы мкм	Использование высококачественных и надежных компонентов

2.5 Выводы по разделу

1. Систематизация и выделение наиболее существенных источников погрешности ЛП позволяют наметить пути повышения точности линейных приводов и гексапода на их основе.

2. 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 качественной настройки регуляторов системы управления; соблюдение качественной технологии изготовления и сборки, использование высококачественных и надежных компонентов, а также выполнение программной компенсации некоторых типов ошибок.

3. Погрешности изготовления элементов и сборки линейного привода устраняются после контрольного замера истинного перемещения штока, вычисления ошибки и внесения статической поправки в систему управления.

4. Для программной компенсации других типов ошибок и разработки алгоритма прецизионного управления линейным приводом требуется выполнить теоретические и экспериментальные исследования. Наибольший интерес при этом представляют следующие три группы ошибок:

- 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.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМА ПРЕЦИЗИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ПРИВОДОМ

3.1 Математическая модель линейного привода

Математическая модель ЛП строится на основе модели шагового двигателя с учетом нагрузки, действующей на механическую систему привода. Будем считать линейный привод одномассовой механической системой, поскольку механическая передача имеет высокую жесткость, а рабочие ускорения и скорости ЛП достаточно малы.

Математическая модель двухфазного гибридного шагового двигателя описывается в пространстве состояний следующим образом [95, 96]:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{u_a - Ri_a + K_m \omega \sin(p\theta)}{L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{u_b - Ri_b - K_m \omega \cos(p\theta)}{L} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{K_m (-i_a \sin(p\theta) + i_b \cos(p\theta)) - T_s}{J_s} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3.1)$$

Здесь i_a, i_b, u_a, u_b — токи и напряжения в соответствующих обмотках статора; R, L — сопротивление и индуктивность обмотки статора; K_m — моментная постоянная двигателя; ω, θ — угловые скорость и положение ротора; p — число зубцов, приходящееся на каждую пару полюсов (или число пар полюсов статора); T_s — суммарный момент на валу двигателя; J_s — приведенный к валу суммарный момент инерции ротора и элементов привода.

Момент T_s складывается из нескольких составляющих: фиксирующий момент шагового двигателя T_d ; момент нагрузки T_{LP} , возникающий при управлении подвижной платформой гексапода с закрепленным на ней объектом наведения; а также приведенный к валу двигателя момент трения T_{Fr} в механических узлах привода:

$$T_s = T_d + T_{LP} + T_{Fr}. \quad (3.2)$$

Фиксирующий момент — это момент, создаваемый постоянными магнитами гибридного шагового двигателя. Аналитически он выражается следующим образом [97]:

$$T_d = T_{dA} \sin(2p\theta), \quad (3.3)$$

где T_{dA} — амплитудное значение момента при отсутствии тока в обмотках.

Величина момента нагрузки T_{LP} зависит от инерционных параметров нагрузки, текущей конфигурации механизма с параллельной структурой, а также от направления и величины вектора ускорения объекта управления. Аналитически данную величину выразить сложно, поэтому вычисление T_{LP} может быть выполнено только системой управления гексаподом на основе указанных исходных данных.

Трение в линейном приводе, содержащем редуктор и шарико-винтовую передачу, имеет существенно нелинейный характер. Существует несколько моделей трения, математически описывающих указанные эффекты. Достаточно полной является модель, описывающая трение линейного перемещения как функцию относительной скорости и представляющая сумму компонент трения Кулона, Штрибека и вязкого [98]:

$$F_{Fr} = \sqrt{2e}(F_B - F_C) e^{-|v/v_s|^\alpha} \cdot \frac{v}{v_s} + F_C \cdot \text{th}\left(\frac{v}{v_C}\right) + \sigma v, \quad (3.4)$$

где: v — скорость между двумя поверхностями в контакте, F_B — сила трения отрыва; F_C — сила Кулонова трения; v_C — порог скорости Кулона; v_s — порог скорости Штрибека; α — коэффициент формы Штрибека; σ — коэффициент вязкого трения.

Для удобства работы с моделью привода избавимся от некоторых нелинейных функций синуса и косинуса и перейдем от связанных со статором фазных токов i_a, i_b и напряжений u_a, u_b к неподвижно связанным с ротором величинам i_d, i_q, u_d, u_q , для чего воспользуемся преобразованием Парка [99]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Тогда модель двигателя будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{-Ri_d}{L} + p\omega i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-Ri_q - K_m\omega}{L} - p\omega i_d + \frac{u_q}{L} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{K_m i_q - T_s}{J_s} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3.6)$$

Выражение (3.6) позволяет представить шаговый двигатель как машину постоянного тока, у которой ток i_q управляет вращающим моментом, а ток i_d — потокосцеплением ротора. Для повышения энергоэффективности привода обычно стремятся поддерживать $i_d = 0$.

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:

$$\theta_3 = k_p k_{\text{ШВП}} L_3,$$

где k_p — передаточное число редуктора, $k_{\text{ШВП}}$ — шаг шарико-винтовой передачи линейного привода.

Как видно из выражений (3.5), для перехода к dq -представлению электродвигателя и прямому управлению моментом, необходимо точно знать θ — текущее угловое положение ротора относительно статора.

Для современного исполнительного электропривода широкого класса мехатронных систем вентильный режим является наиболее актуальным, поскольку обеспечивает хорошие регулировочные характеристики. Однако, для его реализации необходимо обеспечение синхронно-синфазного движения

векторов полей статора и ротора с поддержанием их взаимной ортогональности [100].

В этом случае для типового шагового двигателя с 50 парами полюсов (200 шагов на один оборот вала) необходимо обеспечивать высокую дискретность измерения углового положения ротора (вектора магнитного поля ротора) — около $1/2^{16}$ оборота вала. Также должна быть обеспечена высокая частота измерения углового положения и формирования ортогонального вектора магнитного поля статора.

Таким образом, имеющийся датчик углового положения не подходит для замыкания привода в вентильном режиме, поскольку не обеспечивает необходимую точность определения углового положения (см. подраздел 2.4).

В этом случае возможно применение наблюдателя состояния, выполняющего оценку θ . Датчик углового положения при этом обеспечивает контроль пропуска шагов и служит для диагностики работы привода.

3.2 Наблюдатель состояния

В общем смысле задача оценки переменных состояния электродвигателя может рассматриваться как задача синтеза наблюдателя для нелинейной системы (3.6). В современном электроприводе применяется несколько типов наблюдателей состояния, основными из которых являются измеряющие наблюдатели, наблюдатели на основе моделей электромагнитных процессов двигателя, наблюдатели Люенбергера и на основе фильтра Калмана [101].

Измеряющие наблюдатели строятся либо по принципу высокочастотной инъекции тестирующих сигналов и определения по реакции на такой сигнал реального положения ротора, либо используют внутренние сигналы регулирования для оценки состояния. Первый способ технически сложно реализуем и имеет высокий уровень шума, а второй способ неработоспособен на низких скоростях.

Наблюдатели на основе моделей электромагнитных процессов строятся с учетом точных значений параметров двигателя. Однако, в реальной электромеханической системе всегда присутствуют шумы измерений и случайные внутренние процессы, что может приводить к значительным ошибкам оценки при использовании данного метода. Тот же недостаток имеет наблюдатель Люенбергера.

Достоинством наблюдателя на основе фильтра Калмана является его способность оценивать переменные состояния системы при наличии случайных процессов ее эволюции и шумов измерений [102].

Недостатком фильтра Калмана по сравнению с другими типами наблюдателей является необходимость выполнения объемных вычислений, однако современные микропроцессорные системы управления обладают необходимой производительностью.

Рассмотрим *расширенный* фильтра Калмана (РФК), предназначенный для оценки состояния нелинейных систем. Алгоритм работы РФК позволяет восстанавливать неизвестные параметры (переменные состояния), минимизируя при этом влияние помех измерения известных величин.

Нелинейную систему (3.6) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (3.7)$$

где $\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ \omega \ \theta]^T$ — вектор переменных состояния системы,

$\mathbf{u} = [u_d \ u_q]^T$ — вектор управления системы,

$\mathbf{y} = [i_d \ i_q]^T$ — вектор выходов системы,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ — матрица управления системы,}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{-Ri_d}{L} + p\omega i_q \\ \frac{-Ri_q - K_m\omega}{L} - p\omega i_d \\ \frac{K_m i_q - T_s}{J_s} \\ \omega \end{bmatrix} \text{ — векторная функция состояния системы,}$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = [i_d \ i_q]^T \text{ — векторная функция выхода системы,}$$

$$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{y}, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m, n=4, m=2.$$

Опишем нелинейную систему (3.6) в дискретизированном по времени виде с учетом случайного характера векторов состояния и измерений реального привода. Состояние системы в момент такта k получается из истинного состояния в момент такта $k-1$ в соответствии с выражением:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases}. \quad (3.8)$$

Здесь $\mathbf{x}_k$ — значение вектора $\mathbf{x}(t)$ в момент времени t_k , $\mathbf{y}_k$ — измерение 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.

Для получения оценок вектора состояния процесса по серии зашумленных измерений алгоритм работы РФК разбивается на два этапа.

Далее под записью $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ будем понимать оценку истинного вектора $\mathbf{x}$ в момент k с учетом измерений с момента начала работы и по момент $k-1$ включительно.

На первом этапе на основе состояния системы и измеренной в момент $k-1$ информации выполняется оценка (экстраполяция) вектора состояния для момента k с помощью нелинейного уравнения $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}) + \mathbf{B}\mathbf{u}_k$.

Далее вычисляется ковариационная матрица ошибок для экстраполированного вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$: $\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{A}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_k$, где $\mathbf{A}_{k-1} = \left(\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) / \partial \mathbf{x}_{k-1} \right) \Big|_{\mathbf{x}_{k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}}$, $\mathbf{Q}_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — ковариационная матрица случайного эволюционного процесса $\mathbf{w}_k$, на диагонали которой располагаются дисперсии компонент вектора состояния, а внедиагональные элементы — ковариации между соответствующими компонентами.

На втором этапе выполняется коррекция экстраполированного значения $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ на основе дополнения соответствующими текущими измерениями: $\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{y}}_k$, где $\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ — отклонение полученного на шаге k наблюдения от наблюдения, ожидаемого при произведенной экстраполяции; $\mathbf{H}_k = \left(\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}_{k-1}) / \partial \mathbf{x}_{k-1} \right) \Big|_{\mathbf{x}_{k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}}$ — линеаризованная матрица чувствительности; $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \left[\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \right]^{-1}$ — корректирующая матрица обратной связи, или матрица коэффициентов усиления; $\mathbf{R}_k \in \mathbb{R}^{m \times m}$ — ковариационная матрица случайного процесса измерений $\mathbf{v}_k$, на диагонали которой располагаются дисперсии компонент вектора измерений, а внедиагональные элементы — ковариации между компонентами.

Далее уточняется ковариационная матрица ошибок: $\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1}$, где $\mathbf{I}$ — единичная матрица $n \times n$.

Таким образом, полученный наблюдатель на каждом шаге работы выполняет оценку переменных состояния $\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = [\hat{i}_d \ \hat{i}_q \ \hat{\omega} \ \hat{\theta}]^T$, которые можно использовать в системе управления шаговым двигателем и линейным приводом на его основе.

3.3 Планирование траектории движения

К рассматриваемому МПС предъявляются жесткие требования по точности обработки задаваемых сигналов позиционирования.

Вместе с тем, он должен обеспечивать малую длительность переходных процессов и воздействовать на объект управления и несущую платформу космического аппарата с минимальными динамическими возмущениями. Ограничение моментов и усилий, воздействующих на нагрузку со стороны МПС, обуславливается как стремлением уменьшить потребляемую мощность, так и обезопасить чувствительную полезную нагрузку и космический аппарат от нежелательных возмущений выше допустимых.

Так, космическая обсерватория «Миллиметр» имеет двухзеркальный криогенный телескоп с раскрываемым на орбите главным параболическим зеркалом диаметром 10 м, а рабочие диапазоны длин волн телескопа составляют 0,07-10 мм. Эти характеристики определяет высокие требования к точности телескопа и устройства его наведения относительно несущей космической платформы [2].

Вместе с тем, наведение такой крупногабаритной конструкции относительно сравнимой по массе космической платформы должно выполняться в особых динамических режимах с учетом больших моментов инерции телескопа, низких частот собственных колебаний его конструкции, а также жестких требований к точности наведения [103, 104].

При этом управление исполнительными механизмами типа «гексапод», совершающими пространственное перемещение, может выполняться в контурном, траекторном и позиционном режиме. При контурном управлении обеспечивается перемещение объекта с заданной скоростью по непрерывному строго заданному пути. Траекторное управление обеспечивает перемещение объекта в пространстве от начальной к конечной точке с обязательным прохождением заданных промежуточных узловых точек. При позиционном управлении объект совершает перемещение от начальной к конечной точке по произвольной траектории. Для траекторного и позиционного управления путь

объекта при перемещении между строго заданными узловыми (или начальными и конечными) точками определяется с помощью различных методов интерполирования траектории [105].

При решении космической обсерваторией «Миллиметр» таких глобальных научных задач, как изучение чёрных дыр, кротовых нор и реликтового излучения, основным режимом работы является наведение телескопа на источник излучения и периодическая коррекция его положения и угловой ориентации, что исключает необходимость работы механизма в контурном и траекторном режиме. В то же время, как было отмечено выше, при управлении крупногабаритной чувствительной нагрузкой необходимо ограничивать развиваемые ускорения, скорости и другие динамические параметры движения. Такая задача может быть решена применением специальных алгоритмов планирования траектории в позиционном режиме (далее — планирование траектории).

Важным преимуществом управления с планированием траектории является предсказуемое поведение по сравнению с системой, замкнутой обратной связью, и отрабатывающей ступенчатые входные сигналы. Такой эффект достигается тем, что петля обратной связи всегда вносит в систему запаздывание, что зачастую приводит к длительным переходным процессам. Наряду с этим, ограниченность полосы пропускания петли обратной связи, имеющей диссипативный характер, значительно влияет на энергоэффективность системы.

Планирование же траектории с контролируемыми величинами производных от перемещения различного порядка, позволяет уменьшить ошибку системы и ее энергию на высоких частотах [106].

Для многостепенных механизмов задача планирования траектории может решаться как со стороны высокоуровневой системы управления, реализующей движение объекта в пространстве [106–108 и др.], так и со стороны отдельных приводов, составляющих мехатронное устройство.

Преимуществом второго подхода является возможность контролировать развиваемые каждым приводом скорость, ускорение, а также производные ускорения. В реальных исполнительных системах всегда есть не только проектировочные ограничения по динамическим воздействиям на нагрузку, но и физические ограничения привода — максимальная скорость электродвигателя, ограниченная мощность источника питания, ограниченная скорость передачи этой мощности от усилителя к двигателю и др.

Однако, пересчет ограничений, накладываемых на кинематические и динамические параметры движения объекта, установленного на подвижной платформе гексапода, к соответствующим ограничениям параметров движения штока линейного привода с учетом конструкции механизма с параллельной структурой трудно реализуем из-за сложного характера пространственного движения платформы [109].

При этом планирование траектории в координатах подвижной платформы позволяет обеспечить контролируемые динамические возмущения на объекте наведения и несущей космической платформе.

Планирование движения объекта в позиционном режиме обычно реализуется путем разбиения траектории на участки и интерполяции таких участков с помощью полиномов. Часто применяется интерполяция т.н. полиномом 4-3-4, когда первый участок траектории задается полиномом четвертой степени, второй участок — третьей степени и последний участок — снова полиномом четвертой степени [108].

В ряде случаев применяется интерполяция полиномом 3-5-3, а также интерполяция специальными функциями — сплайнами, имеющими обычно порядок не выше третьего.

Расчет траекторий 4-3-4, 3-5-3, сплайн-интерполяции и подобных 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. Скорость, ускорение и более высокие производные перемещения привода для указанных траекторий на этапе расчета задаются косвенно и в ряде случаев для этого требуется итерационно решать систему уравнений, описывающих движение объекта.

На практике более простым и удобным является подход с прямым определением ограничений на производные перемещения. Рассмотрим на примере пространственной координаты x движения платформы алгоритм планирования траектории, предложенный в работе [106].

На рисунке 3.1 представлены графики первой производной ускорения (рывка), ускорения, скорости и перемещения для общего случая, когда имеются ограничения $\bar{j}$, $\bar{a}$ и $\bar{v}$ соответственно при перемещении на расстояние $\bar{x}$. Указанные предельно допустимые значения могут быть заданы как исходя из физических ограничений элементов системы — двигателя, усилителя мощности, источника питания — так и исходя из максимально допустимых динамических воздействий нагрузки.

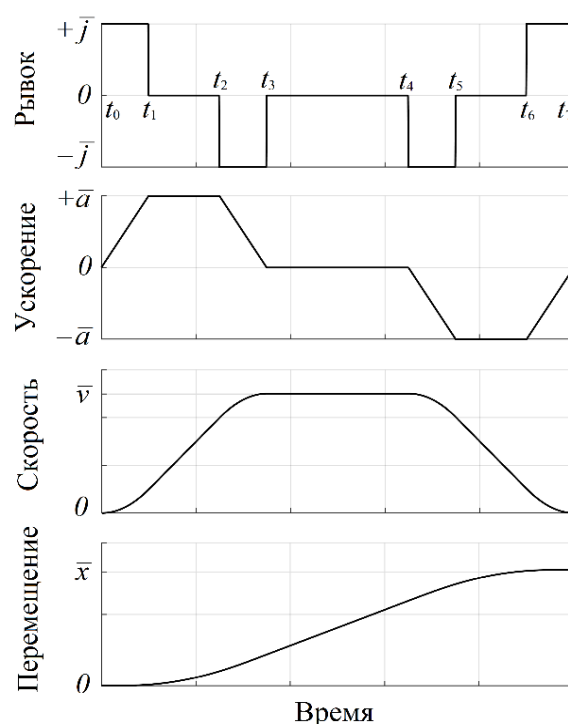


Рисунок 3.1 —Рывок, ускорение, скорость и перемещение при планировании траектории

Как видно из рисунка 3.1, 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 отрицательное значение $-\bar{j}$; на интервалах $t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$ и $t_5 - t_6$ значение рывка равно нулю.

Для упрощения алгоритма управления приводом интервалы $t_0 - t_1$, $t_2 - t_3$, $t_4 - t_5$ и $t_6 - t_7$ принимаются равными. То же принимается в отношении интервалов $t_1 - t_2$ и $t_5 - t_6$.

Обозначим длительность интервала $t_0 - t_1$ (с постоянным значением рывка) как $t_{\bar{j}}$, интервала $t_1 - t_2$ (с постоянным значением ускорения) как $t_{\bar{a}}$, интервала $t_3 - t_4$ (с постоянным значением скорости) как $t_{\bar{v}}$. Поскольку $a(t) = dv(t)/dt = d^2x(t)/dt^2$, для каждого из указанных интервалов можно вычислить значения $a(t)$, $v(t)$ и $x(t)$ по следующим формулам:

$$\begin{aligned} a(t) &= j_0 t + a_0, \\ v(t) &= 1/2 j_0 t^2 + a_0 t + v_0, \\ x(t) &= 1/6 j_0 t^3 + 1/2 a_0 t^2 + v_0 t + x_0, \end{aligned} \quad (3.9)$$

где j_0 , a_0 , v_0 , x_0 — начальные (для данного временного интервала) значения рывка, ускорения, скорости и положения соответственно.

При действии ограничений $\bar{j}$, $\bar{a}$ и $\bar{v}$ в качестве критерия оптимальности примем минимальное время $t_{\bar{x}}$, за которое система совершит перемещение $\bar{x}$. В этом случае алгоритм планирования траектории при движении по координате $x(t)$ выглядит следующим образом.

1. На первом этапе полагаем, что перемещение $\bar{x}$ система способна выполнить за минимально возможное время, т.е. без действия ограничений $\bar{a}$ и $\bar{v}$. Принимаем $t_{\bar{a}} = t_{\bar{v}} = 0$ и рассчитываем $t_{\bar{j}} = \sqrt[3]{\bar{x}/(2\bar{j})}$.

2. Рассчитываем максимальную развиваемую скорость $v_{\max} = \bar{j}t_{\bar{j}}^2$. В случае, если $v_{\max} > \bar{v}$, корректируем время действия рывка: $t_{\bar{j}} = \sqrt{\bar{v}/\bar{j}}$.

3. Рассчитываем максимальное развиваемое ускорение $a_{\max} = \bar{j}t_{\bar{j}}$. В случае, если $a_{\max} > \bar{a}$, корректируем время действия рывка: $t_{\bar{j}} = \bar{a}/\bar{j}$.

4. Рассчитываем $t_{\bar{a}} = -1,5t_{\bar{j}} + 1/2\sqrt{t_{\bar{j}}^2 + 4\bar{x}/(\bar{j}t_{\bar{j}})}$.

5. Рассчитываем максимальную развиваемую скорость $v_{\max} = \bar{j}t_{\bar{j}}^2 + \bar{j}t_{\bar{j}}t_{\bar{a}}$.

В случае, если $v_{\max} > \bar{v}$, корректируем $t_{\bar{a}} = \bar{v}/\bar{a} - t_{\bar{j}}$.

6. Рассчитываем $t_{\bar{v}} = (\bar{x} - 2\bar{j}t_{\bar{j}}^3 - 3\bar{j}t_{\bar{j}}^2t_{\bar{a}} - \bar{j}t_{\bar{j}}t_{\bar{a}}^2)/\bar{v}$.

В результате, используя вычисленные параметры $t_{\bar{j}}$, $t_{\bar{a}}$, $t_{\bar{v}}$, с учетом заданного значения $\bar{j}$ на основе (1) можем вычислить $a(t)$, $v(t)$ и $x(t)$ для первого интервала $t_0 - t_1$. Затем, подставляя для каждого из последующих интервалов соответствующие начальные условия j_0 , a_0 , v_0 , x_0 , являющиеся конечными значениями предыдущего интервала вычисляем $j(t)$, $a(t)$, $v(t)$ и $x(t)$ для всего участка $t_0 - t_7$. В общем случае вид графиков функций будет соответствовать представленному на рисунке 3.1.

В случае, если линейное перемещение платформы и соответствующее ему поступательное движение вдоль некоторой оси (см. $O'x'$, $O'y'$, $O'z'$ на рисунке 1.1) будет совершаться одновременно с угловым перемещением вокруг той же оси, моменты инерции, приведенные соответственно к неподвижным осям Ox , Oy , Oz , будут изменяться. На несущую космическую платформу, таким образом, будут воздействовать трудно контролируемые динамические возмущения. Поэтому позиционирование и наведение крупногабаритной нагрузки целесообразно выполнять по-отдельности и поочередно для каждой координаты вектора $\mathbf{q}$.

На рисунке 3.2, а) показана траектория движения платформы по координате x , задаваемая в соответствии с описанным выше алгоритмом с ограничениями $\bar{j}$, $\bar{a}$ и $\bar{v}$, на рисунке 3.2, б) — соответствующие ей траектории движения шести линейных приводов $L_1(t) \dots L_6(t)$, полученные путем решения обратной задачи кинематики гексапода.

На рисунке 3.3 приведены траектория $L_1(t)$ (а) и её производные 1-5 порядка (б). Из рисунка видно, что даже для простой траектории платформы,

имеющей 3-ю производную, движение привода будет иметь производную до 6 порядка включительно.

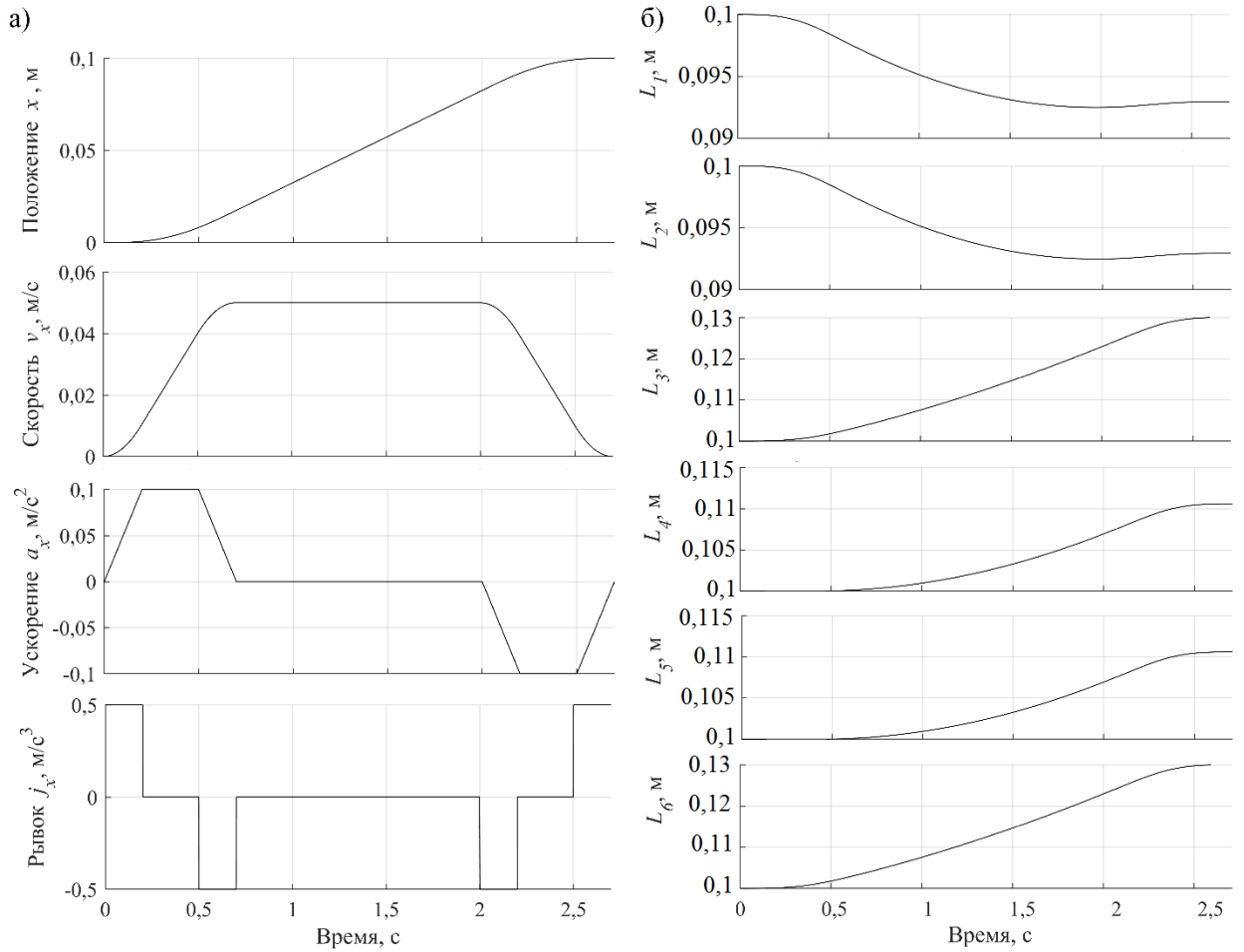


Рисунок 3.2 — Траектории движения платформы и линейных приводов

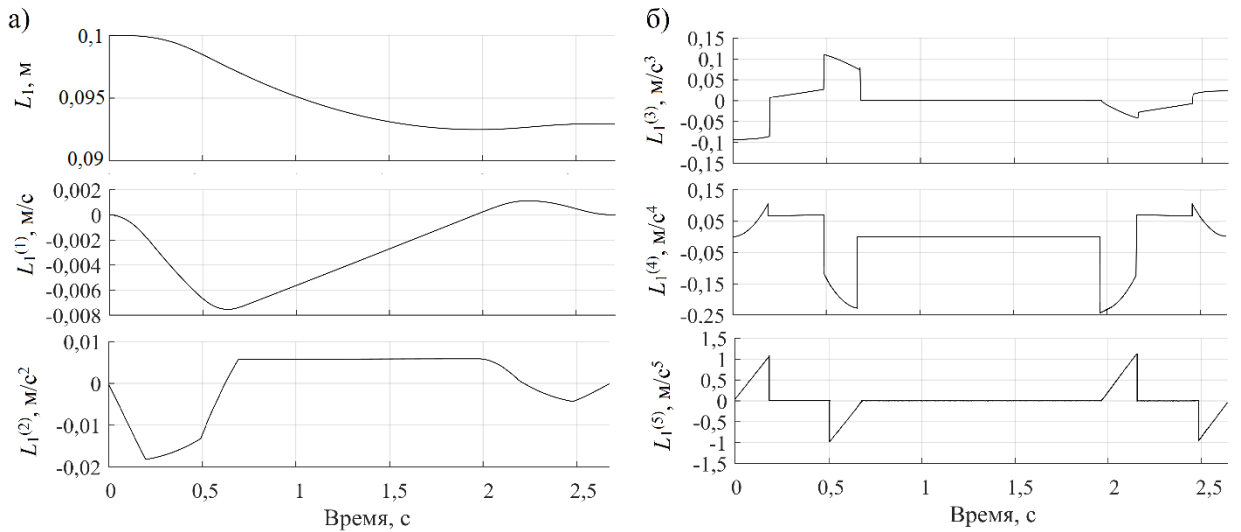


Рисунок 3.3 — Траектория $L_1(t)$ (а) и её производные 1-5 порядка (б)

На практике применить представленный выше алгоритм планирования траектории для $L(t)$ не удастся, поскольку переход от вектора $\mathbf{q}(t)$ и его производных n -го порядка к вектору $\mathbf{L}(t)$ и его производным m -го порядка осуществляется путем решения обратной задачи кинематики и включает этапы численного дифференцирования. При этом неизбежно возникают ошибки, величина которых растет с порядком производной.

Рассмотрим возможные варианты реализации системы управления гексаподом. Так, известно описание динамики платформы в виде матричного уравнения Лагранжа второго рода: $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q})$, где $\boldsymbol{\tau}$ — вектор усилий и моментов в пространстве декартовых координат; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ — матрица инерции гексапода; $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ — матрица кориолисовых и центробежных усилий и моментов; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ — матрица гравитационных сил.

Из теории управления многомерными исполнительными системами, к которым также относится и МПС, известно, что для минимизации статических и динамических ошибок движения систему регулирования следует строить на основе обратной модели динамики механизма.

В этом случае удастся минимизировать влияние нелинейных и нестационарных элементов матриц $\mathbf{M}$, $\mathbf{N}$ и $\mathbf{G}$, а также обеспечить реальную динамику движения системы $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ близкой к заданной $\mathbf{q}_3, \dot{\mathbf{q}}_3, \ddot{\mathbf{q}}_3$.

Пример системы управления гексаподом, использующий численное решение прямой задачи кинематики (ПЗК) и обратной задачи динамики (ОЗД), показан на рисунке 3.4 [10].

На рисунке обозначены: вектор линейных перемещений приводов $\mathbf{L}$; матрица Якоби гексапода $\mathbf{J}$; вектор линейных сил в приводах гексапода $\mathbf{F} = (\mathbf{J}^T)^{-1}(\boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2)$; вектор усилий и моментов в пространстве декартовых координат $\boldsymbol{\tau}_1$, полученный на основе пропорционально-дифференциального регулятора с соответствующими матрицами коэффициентов $\mathbf{K}_n$ и $\mathbf{K}_d$;

компенсационный вектор усилий и моментов, рассчитываемый на основе ОЗК

$$\tau_2 = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_3 + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}).$$

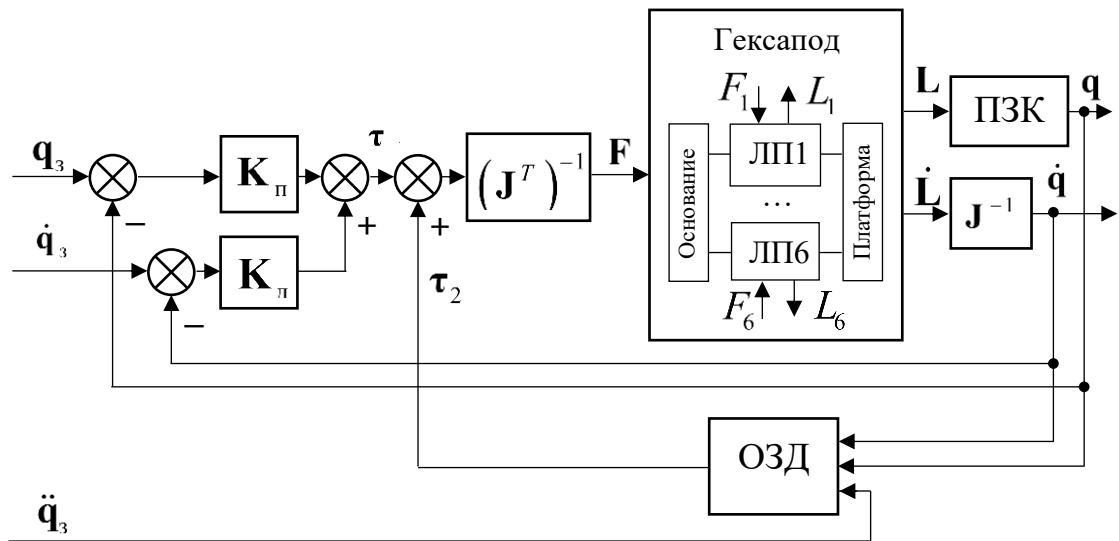


Рисунок 3.4 — Структурная схема системы управления гексаподом в пространстве декартовых координат

Несмотря на указанные выше преимущества, реализация дискретной системы управления, работающей в пространстве декартовых координат платформы $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ на основе ОЗД, требует значительных вычислительных ресурсов, поскольку на каждом элементарном шаге k требуется выполнять вычисления матриц $\mathbf{J}(\mathbf{q}_{k-1}), \mathbf{M}(\mathbf{q}_k), \mathbf{N}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k), \mathbf{G}(\mathbf{q}_k)$, решение ПЗК и ОЗД и формирование управляющего воздействия $\mathbf{F}_k$.

Кроме того, требуется иметь точные значения параметров матриц $\mathbf{J}$, $\mathbf{M}$, $\mathbf{N}$ и $\mathbf{G}$, характеризующие массо-инерционные и упруго-демпфирующие свойства данного варианта конструкции гексапода.

Рассмотрим усилия в приводах гексапода для одного из вариантов конструкции МПС, платформа которого совершает круговое перемещение с радиусом траектории 40 мм и скоростью 12 м/мин. На рисунке 3.5 приведены графики составляющих усилий в приводах [111].

Из рисунка видно, что основные усилия в линейных приводах создают силы гравитации, силы инерции, а также демпфирующие силы в приводах.

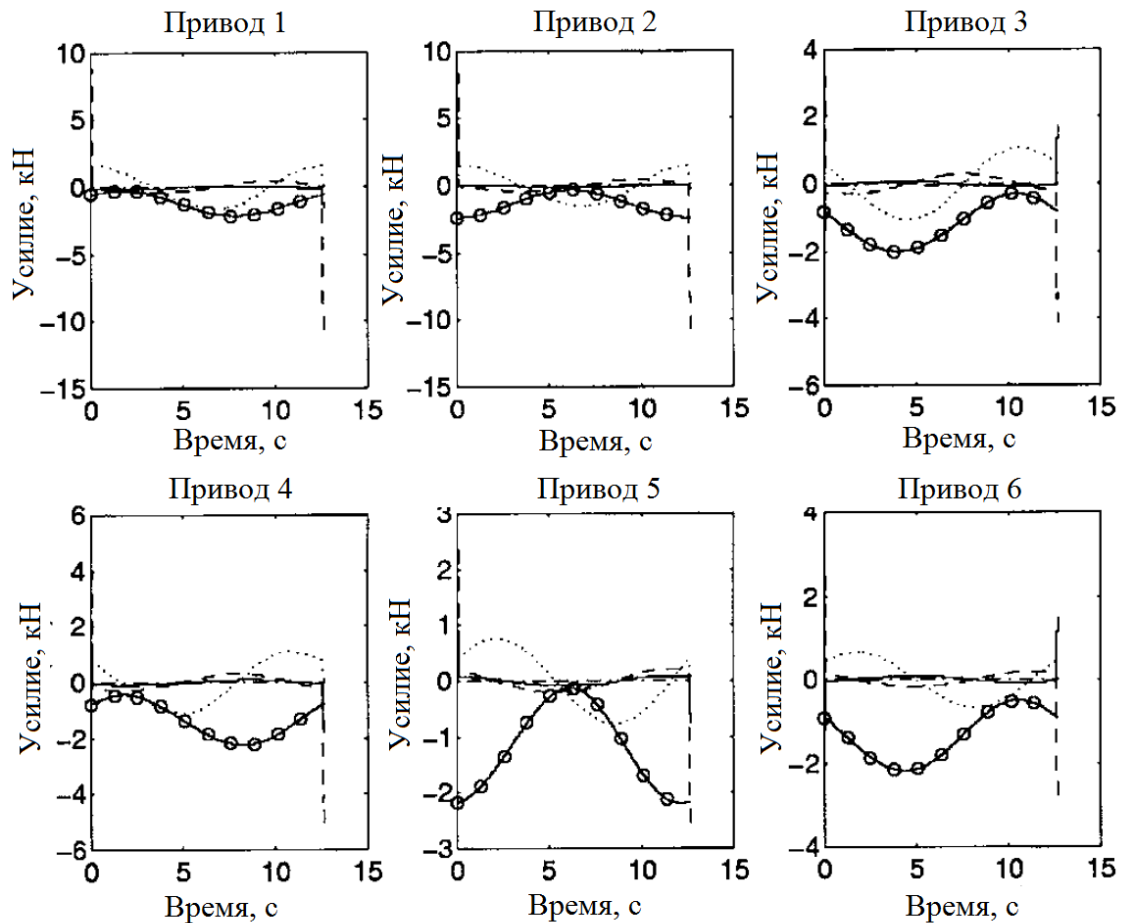


Рисунок 3.5 — Составляющие усилий в приводах гексапода для одного из вариантов траектории: «—о» силы инерции твердых тел МПС, «--» силы инерции в приводах, «-·» кориолисовы и центробежные силы, «··» демпфирующие силы в приводах, «-o-» силы гравитации [111].

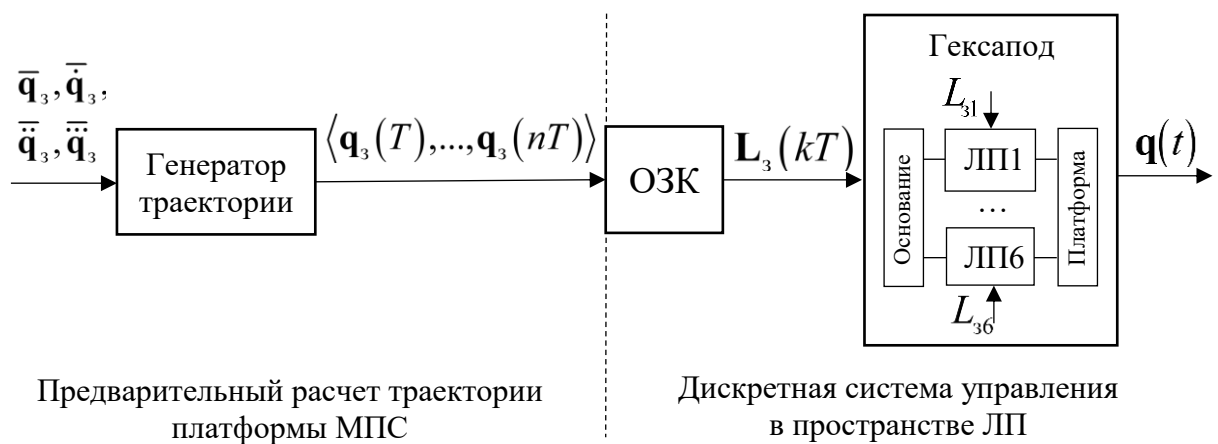


Рисунок 3.6 — Структурная схема системы управления гексаподом в пространстве обобщенных координат

Поскольку рассматриваемый в настоящей работе гексапод предназначен для функционирования с небольшими скоростями и ускорениями в условиях отсутствия гравитационных сил, рассмотрим возможность применения другого варианта системы управления МПС — в пространстве обобщенных координат или длин приводов (рисунок 3.6). 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 алгоритму планирования траектории, представленному выше, в соответствии с заданными ограничениями $\bar{\dot{\mathbf{q}}}_3, \bar{\ddot{\mathbf{q}}}_3, \bar{\ddot{\ddot{\mathbf{q}}}}_3$ выполняется вычисление вектора $\mathbf{q}_3(kT) = [x_3(kT), y_3(kT), z_3(kT), \alpha_3(kT), \beta_3(kT), \gamma_3(kT)]$, где $k = \overline{1, n}$ — номер шага дискретной системы управления, T — период дискретизации.

Далее полученный набор $\langle \mathbf{q}_3(T), \dots, \mathbf{q}_3(nT) \rangle$ путем решения обратной задачи кинематики гексапода преобразуется в набор $\langle \mathbf{L}_3(T), \dots, \mathbf{L}_3(nT) \rangle$. Значения $\mathbf{L}_3(kT)$ подаются как задающие на линейные приводы в режиме реального времени с периодом T . Графики на рисунке 3.5 при этом позволяют предположить, что в такой системе в условиях отсутствия гравитации, а также при ограниченных скоростях, ускорениях и рывках ошибки будут определяться преимущественно кинематическими и динамическими параметрами линейных приводов.

Таким образом, для реализации указанной системы требуется обеспечить работу линейного привода как следящего исполнительного устройства. Выполним синтез такой системы управления ЛП.

3.4 Синтез системы управления линейным приводом

Основным требованием к системе управления линейным приводом является минимизация ошибки в статических и динамических режимах за минимальное время. При этом расчет регулятора системы, замкнутой только

по выходной координате, часто показывает, что необходимо введение дополнительных дифференцирующих и интегрирующих звеньев в систему управления. Дифференцирующая часть делает привод крайне чувствительным к различного рода помехам, а наличие интеграторов высока порядка приводит к дрейфу выходного сигнала.

Необходимую устойчивость и достаточно высокие показатели качества может обеспечить система управления с так называемым подчиненным регулированием координат. Этот метод основан на том, что в систему управления вводятся более одного регулятора так, что контуры регулирования оказываются вложенными друг в друга. Кроме того, подчиненное регулирование позволяет устанавливать ограничения на отдельные координаты привода, обеспечивая тем самым устойчивость системы.

В такой системе внешний контур положения является основным, а остальные контуры (тока и скорости), внутренние по отношению к позиционному, называются подчиненными контурами (см. рисунок 3.7). Здесь обозначены: θ_3 — заданное угловое положение, θ — отработанное угловое положение, ω — угловая скорость, i — ток электродвигателя.

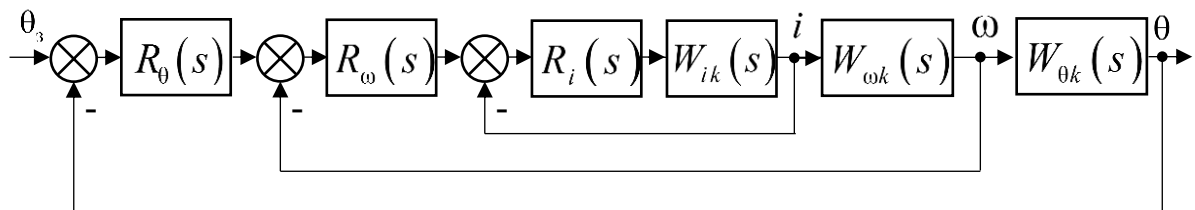


Рисунок 3.7 — Структурная схема системы управления электродвигателем с подчиненным регулированием координат

На схеме показаны последовательные регуляторы контуров $R_i(s)$, $R_\omega(s)$, $R_\theta(s)$, а также внутренние передаточные функции $W_{ik}(s)$, $W_{\omega k}(s)$ и $W_{\theta k}(s)$ соответствующих контуров.

Для построения системы подчиненного регулирования рассматриваемого привода необходимо иметь передаточные функции

разомкнутых токового, скоростного и позиционного контуров $W_i(s)$, $W_\omega(s)$, $W_\theta(s)$. Рассмотрим структурную схему (рисунок 3.8), составленную по модели шагового двигателя (3.6).

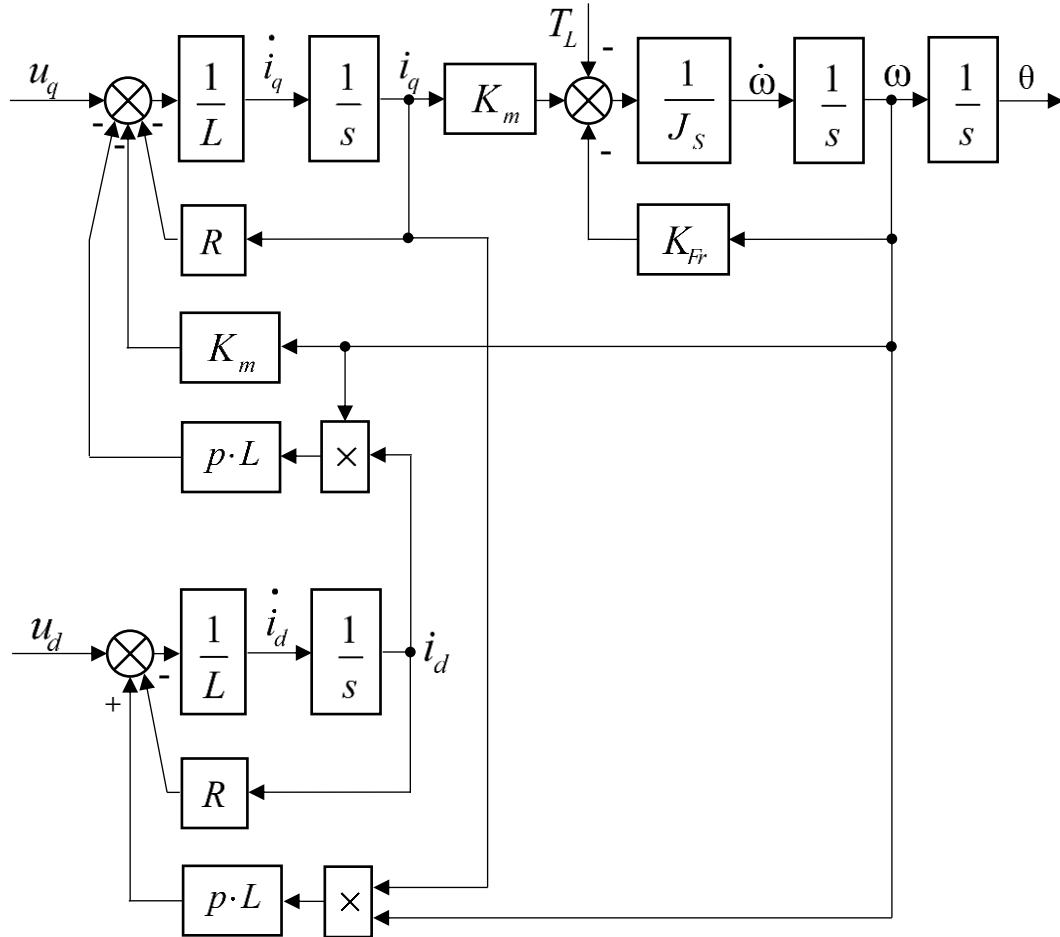


Рисунок 3.8 — Структурная схема двигателя, составленная по его модели

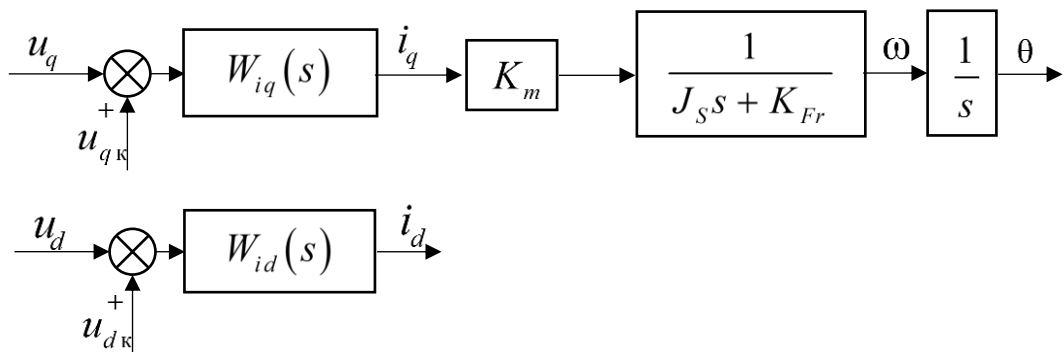


Рисунок 3.9 — Структурная схема двигателя с компенсационными сигналами

Из рисунка видно, что имеются перекрестные связи между контурами i_d и i_q , а также воздействующая на оба токовых контура противо-ЭДС электродвигателя. Для синтеза регуляторов упростим схему на рисунке 3.8 следующим образом. Введем компенсационные сигналы $u_{qк} = \omega(pLi_d + K_m)$ и $u_{dк} = -\omega pLi_q$. Далее примем момент нагрузки равным нулю. Тогда можно привести систему к виду, показанному на рисунке 3.9, где $W_{iq}(s) = W_{ik}(s) - \omega(pLi_d + K_m)$, а $W_{id}(s) = W_{ik}(s) + \omega pLi_q$.

Далее выделим из схемы передаточные функции (ПФ):

$$W_{ik}(s) = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{T_i s + 1}, \quad W_{\omega k}(s) = \frac{K_m}{J_s s + K_{Fr}}, \quad W_{\theta k}(s) = \frac{1}{s}, \quad \text{где } T_i \text{ —}$$

постоянная времени токового контура. Тогда с учетом $u_{qк}$ и $u_{dк}$ получаем

$$i_q = W_{ik}(s) \cdot u_q, \quad i_d = W_{ik}(s) \cdot u_d.$$

Каждый контур привода можно рассматривать как простую одномерную систему автоматического управления. Подбирая $R_i(s)$, $R_\omega(s)$, $R_\theta(s)$, можно найти некоторое оптимальное с точки зрения динамики системы распределение нулей и полюсов передаточных функций соответствующих контуров токов, скорости и положения.

Динамика токового контура с учетом шумов измерений оказывает значительное влияние на устойчивость рассматриваемой системы подчиненного регулирования на основе наблюдателя состояния. При высокой скорости изменения токов i_q и i_d оценки $\hat{i}_d, \hat{i}_q, \hat{\omega}, \hat{\theta}$ будут расходиться, а замкнутая система потеряет работоспособность. Поэтому выполним настройку контуров тока методом компенсации постоянной времени T_i . В этом случае с помощью пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора передаточная функция замкнутого контура тока приобретает вид

$$\Phi_i(s) = \frac{W_i(s)}{1 + W_i(s)} = \frac{1}{1/\omega_{0i} \cdot s + 1}, \quad \text{где } W_i(s) \text{ — передаточная функция}$$

разомкнутого токового контура, а ω_{0i} — желаемая собственная частота токового контура.

Пропорциональный и интегральный коэффициенты ПИ-регулятора $R_i(s) = k_{pi} + k_{ii} \frac{1}{s}$ можно найти, рассмотрев $W_i(s) = R_i(s) \cdot W_{ik}(s) = \frac{1}{s} \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{Ls + R}$.

Положим $k_{ii} = \omega_{0i}R$, тогда при $k_{pi} = \omega_{0i}L$ найдем

$$W_i(s) = R_i(s) \cdot W_{ik}(s) = \frac{1}{1/\omega_{0i} \cdot s}, \text{ откуда } \Phi_i(s) = \frac{W_i(s)}{1 + W_i(s)} = \frac{1}{1/\omega_{0i} \cdot s + 1}.$$

Далее будем рассматривать регулирование контура тока i_q , непосредственного связанного со скоростным контуром. Для контура i_d регулятор будет иметь те же вид и коэффициенты.

Скоростной контур настраивается аналогичным образом для желаемой собственной частоты $\omega_{0\omega}$. При этом обычно задаются $\omega_{0i} / \omega_{0\omega} > 10$.

В этом случае можно положить $\Phi_i(s) \approx 1$ и найти при синтезе $W_\omega(s) = R_\omega(s) \cdot \Phi_i(s) \cdot W_{\omega k}(s) \approx R_\omega(s) \cdot W_{\omega k}(s)$ коэффициенты ПИ-регулятора контура скорости $k_{p\omega} = \frac{\omega_{0\omega} K_{Fr}}{K_m}$ и $k_{i\omega} = \frac{\omega_{0\omega} J_s}{K_m}$. Откуда $\Phi_\omega(s) = \frac{1}{1/\omega_{0\omega} \cdot s + 1}$.

Для рассматриваемого линейного привода на его статические и динамические точностные характеристики будет существенно влиять настройка внешнего позиционного контура.

При работе линейного привода в режиме слежения за заданной траекторией ошибки должны быть минимальными. В рассматриваемой системе структурно обеспечивается первый порядок астатизма

$$\Phi_\omega(s) \cdot W_{\theta k}(s) = \frac{1}{s(1/\omega_{0\omega} \cdot s + 1)}, \text{ что гарантирует нулевую статическую ошибку}$$

по задающему воздействию.

Для обеспечения устойчивости позиционной системы, а также уменьшения перерегулирования рассмотрим применение ПД-регулятора в контуре положения θ .

Разомкнутая передаточная функция позиционного контура будет определяться следующим образом: $W_{\theta}(s) = R_{\theta}(s) \cdot \Phi_{\omega}(s) \cdot W_{\theta k}(s) =$

$$= \frac{k_{d\theta}s + k_{p\theta}}{s(1/\omega_{0\omega}s + 1)}, \text{ где } k_{d\theta} \text{ и } k_{p\theta} \text{ — соответственно дифференциальный и}$$

пропорциональный коэффициенты регулятора. Тогда замкнутая передаточная функция будет иметь следующий вид:

$$\Phi_{\theta}(s) = \frac{W_{\theta}(s)}{1 + W_{\theta}(s)} = \frac{\omega_{0\omega}k_{d\theta}s + \omega_{0\omega}k_{p\theta}}{s^2 + (k_{d\theta} + 1)\omega_{0\omega}s + k_{p\theta}\omega_{0\omega}}. \quad (3.10)$$

Поскольку между видом передаточной функции и характером переходных процессов существует однозначная взаимосвязь, можно подобрать параметры регулятора таким образом, чтобы обеспечивалась наиболее благоприятная динамика системы.

Применим для этого метод стандартных коэффициентов построения эталонной передаточной функции [112]. Для рассматриваемой системы второго порядка за эталонную функцию примем ПФ вида

$$\Phi_{\omega}(s) = \frac{A_{n-1}\omega_{0\omega}s + \omega_{0\omega}^2}{s^2 + A_{n-1}\omega_{0\omega}s + \omega_{0\omega}^2}, \text{ где } A_{n-1} = 2,5 \text{ — стандартный коэффициент, а } \omega_{0\omega}$$

— собственная частота позиционного контура. Для такой функции время переходного процесса будет определяться зависимостью $T_{\theta} \approx 2,9\omega_{0\omega}$.

Как видно из (3.10), вид $\Phi_{\theta}(s)$ отличается от эталонной функции, поскольку коэффициенты числителя и знаменателя перед s не равны.

В то же время, так как устойчивость системы определяют полюса функции, выбор $k_{d\theta}$ и $k_{p\theta}$ выполним с учетом вида характеристического полинома $s^2 + A_{n-1}\omega_{0\omega}s + \omega_{0\omega}^2$. Приравнявая коэффициенты знаменателей

передаточных функций, находим: $k_{p\theta} = \omega_{0\theta}^2 / \omega_{0\omega}$, $k_{d\theta} = 2,5\omega_{0\theta} / \omega_{0\omega} - 1$.

Дополнительным условием является выбор $\omega_{0\theta} > 0,4\omega_{0\omega}$.

Отметим, что в реальной системе ПД регулятор позиционного контура будет иметь вид $R_\theta(s) = k_{p\theta} + k_{d\theta} \frac{N_d}{1 + N/s}$, где N_d — коэффициент фильтрации дифференциальной составляющей.

На рисунке 3.10 показана полная структурная схема системы управления электродвигателем (СУЭ) линейного привода с подчиненным регулированием координат. В оба токовых контура вводятся компенсационные сигналы $u_{qк} = \omega(pLi_d + K_m)$ и $u_{dк} = -\omega pLi_q$. Задающим сигналом для независимого контура тока i_d служит нулевое напряжение u_{d3} , а для контура тока i_q — выходной сигнал регулятора скорости.

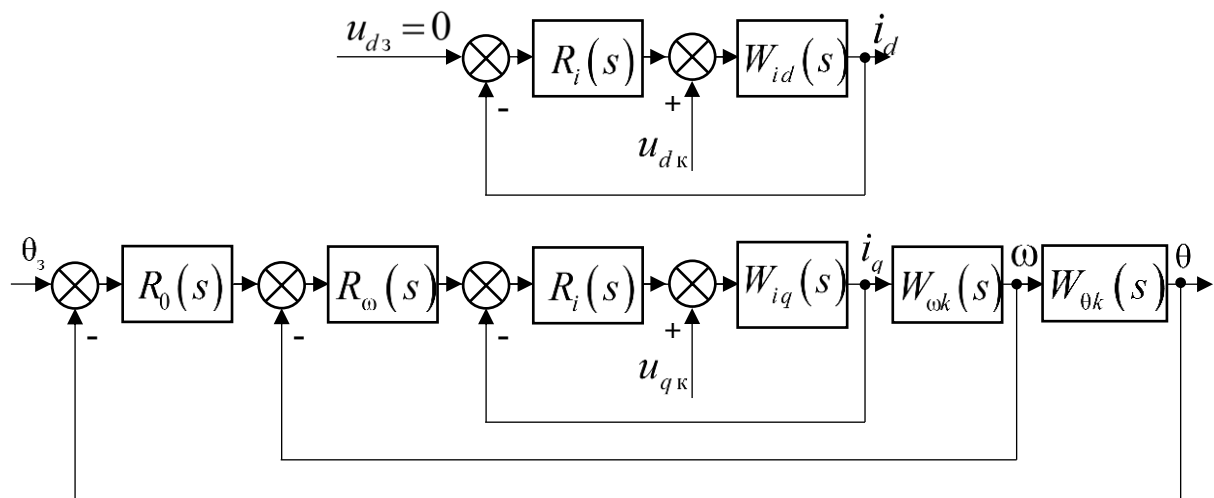


Рисунок 3.10 — Структурная схема системы управления электродвигателем линейного привода с подчиненным регулированием координат

3.5 Режим разомкнутого управления шаговым двигателем

Поскольку линейный привод гексапода работает в режиме отработки заданного положения штока, в качестве исполнительного выбран шаговый

электродвигатель, являющийся более предпочтительным для устройств позиционирования при движении с небольшой скоростью.

В том случае, когда в приводе отсутствует возможность реализовать наблюдатель состояния, выполняющий оценку текущего положения, либо такой режим работы не удастся обеспечить из-за выхода из строя датчиков фазных токов, работа шагового двигателя в вентильном режиме становится невозможной. Рассмотрим особенности построения разомкнутой системы управления шагового двигателя.

В работе [114] наряду с вентильным режимом работы ШД, рассмотрены полношаговый режим и режим с дроблением шага.

В полношаговом режиме работы наблюдаются ярко выраженные колебательные переходные процессы позиционирования, отрицательно сказывающиеся на динамике объекта управления. Такой эффект резонанса проявляется в виде внезапного падения момента на некоторых скоростях и может привести к пропуску шагов и потере синхронности.

Режим с дроблением шага позволяет уменьшить резонансные колебания и реализовать плавное перемещение штока ЛП. В том случае, если величина момента нагрузки двигателя не превышает максимально допустимой, для приводов на основе ШД, возможно использовать разомкнутое управление без обратной связи. Такой подход позволяет упростить систему управления, поскольку не требуется организации быстродействующей петли обратной связи. Датчик углового положения вала двигателя в этом случае необходим только для контроля конечного положения, по отклонению которого от заданного можно определить функциональный или параметрический отказ привода или мехатронного устройства. Однако, для разомкнутого управления требуется иметь нагрузку, момент инерции которой не меньше момента инерции ротора, поскольку на ненагруженном двигателе явление резонанса проявляется наиболее сильно.

Режим с дроблением шага в современных микропроцессорных системах управления приводом реализуется обычно путем формирования в статорных

обмотках двигателя синусоидальных токовых сигналов, сдвинутых друг относительно друга на электрический угол 90° . Таким образом создается вращающееся круговое магнитное поле.

Для шагового двигателя такое поле будет неидеальным, с полюсными пульсациями, однако на малых скоростях и при токовом управлении ШД этим эффектом можно пренебречь. На один шаг 50-полюсного ШД при этом приходится четверть периода синусоидального сигнала.

Обычно используются следующие режимы дробления одного полного шага: $1/2$, $1/4$... $1/64$. Дробление на 64 микрошага при этом является зачастую пределом чувствительности электромеханической системы привода.

Для обеспечения движения вала двигателя в соответствии с траекторией $x(t)$, спланированной по алгоритму, представленному в подразделе 3.3, в качестве задающего сигнала принимается $v(t)$. При этом каждый элементарный микрошаг делается через промежутки времени, обратно пропорциональные мгновенной скорости.

За счет дробления с высоким коэффициентом и высокой частоты микрошагов достигается плавное вращение вала. Однако, управление скоростью вращения вала шагового двигателя разомкнутого привода требует высокой точности отсчета времени в системе управления и может сопровождаться значительными ошибками [115]. Для их устранения, например, возможно построение системы управления на базе высокопроизводительных программируемых логических интегральных схем.

В то же время, для дискретной системы линейного привода, совершающей за единицу времени элементарный микрошаг, удобным является задание скорости в зависимости от текущего положения, т.е. использование функции вида $v = f(x)$.

Заметим, что скорость и положение в выражении (3.9) задаются параметрически от времени. Для того, чтобы перейти к явному аналитическому заданию $v = f(x)$, необходимо, чтобы решение уравнения

$x = f(t)$ имело единственное решение, т.е. существовала обратная функция $t = f(x)$. Очевидно, что для уравнения третьей степени с произвольными коэффициентами j_0, a_0, v_0, x_0 решений будет несколько.

Даже при справедливом в рассматриваемом случае допущении о строгом монотонном возрастании $x = f(t)$, численное решение кубического уравнения $x = f(t)$ в соответствии с известными точным методами решения (например, формулой Кардано), в ряде случаев сопряжено со значительными вычислительными и временными затратами.

В этом случае для дискретной системы управления в соответствии с алгоритмом планирования траектории, приведенным выше, вычисляются $v(t)$ и $x(t)$ для полного интервала $t_0 - t_7$. Такие вычисленные значения сохраняются в виде двух массивов данных V и X с заданным постоянным шагом dx по перемещению. Таким образом, конкретное i -тое значение дискретного массива X_i сопоставляется со значением V_i .

Далее на каждом известном элементарном микрошаге x_d двигателя путем простого поиска по массиву X вычисляется соответствующий индекс n , а по нему далее — скорость V_n . Обратная скорости V_n величина является задержкой перед следующим микрошагом. При этом в связи с ограниченным объемом памяти микропроцессорной системы не следует выбирать величину dx слишком малой. Обычно задаются фиксированной размерностью N массивов V и X , исходя из которой вычисляют $dx = \bar{x}/N$. В этом случае для обеспечения плавности хода в промежуточных между узловыми точками значениях применяют линейную интерполяцию.

Отметим, что указанная реализация алгоритма управления подходит также для приводов, замкнутых обратной связью, поскольку в такой системе всегда имеется информация о текущем перемещении $x(t)$.

Таким образом, при выходе из строя датчиков, обеспечивающих работу ШД в вентильном режиме, система управления переходит в режим

разомкнутого управления шаговым двигателем и, несмотря на ухудшающиеся динамические параметры, линейный привод не теряет работоспособность.

3.6 Методы повышения точности линейного привода

Как было показано в подразделе 2.4, основными источниками погрешностей линейного привода являются 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; а также упругие деформации элементов привода под действием статической и динамической нагрузки.

Представляет практический интерес развитие методов компенсации указанных ошибок и разработка комплексного, многофакторного подхода к повышению точности линейного привода. Для начала рассмотрим отдельные методы компенсации основных источников ошибок линейного привода.

3.6.1 Метод компенсации систематической ошибки механической части линейного привода

В современном станкостроении широко применяется метод программного устранения систематической кинематической погрешности элементов исполнительных систем [116–119 и др.].

Метод заключается в компенсации погрешностей на основе информации, полученной аналитическими расчетами или экспериментальными исследованиями, т.е. априорной информации.

На рисунке 3.11 приведены графики ошибок шарико-винтовой передачи [120–122] в зависимости от линейного перемещения при двукратном проходе в одном направлении в диапазоне от 0 до 200 мм (сплошная и пунктирная линии соответственно) при одной и той же температуре ШВП $T_{ШВП} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Приведенная форма кривой ошибок является типовой для ШВП [86, 90]. Из представленных графиков видно, что ошибка повторяемости ШВП составляет доли микрометров.

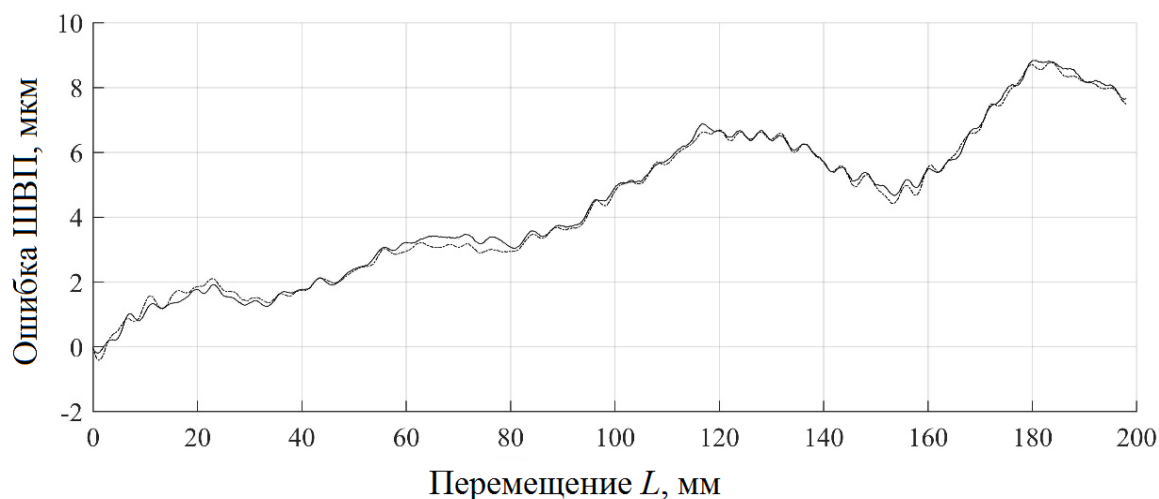


Рисунок 3.11 — Ошибка шарико-винтовой передачи

Форма кривой ошибки механической части линейного привода определяется суммой ошибок редуктора, шарико-винтовой передачи, электромеханической части двигателя. Такая суммарная ошибка также будет преимущественно систематической, поэтому можно предложить следующий метод компенсации ошибки механической части линейного привода: с помощью отдельного датчика выполняется измерение фактического положения штока для всего рабочего диапазона при фиксированном значении температуры ЛП с требуемой дискретностью, затем вычисляются ошибки перемещения штока и формируется дискретный набор значений поправок.

Поправки записываются в память микропроцессорного модуля управления ЛП, либо системы управления верхнего уровня [123 и др.] в виде таблицы поиска и в дальнейшем учитываются при линейном перемещении. Таким образом выполняется *калибровка* линейного привода.

На рисунке 3.12 приведена разность характеристик, показанных на рисунке 3.11, т.е. теоретическая погрешность ШВП при выполнении калибровки по одной из двух представленных кривых.

Из графика видно, что при компенсации систематической ошибки случайная составляющая погрешности ШВП не превышает $\pm 0,4$ мкм, что вполне удовлетворяет точностным требованиям к линейному приводу.

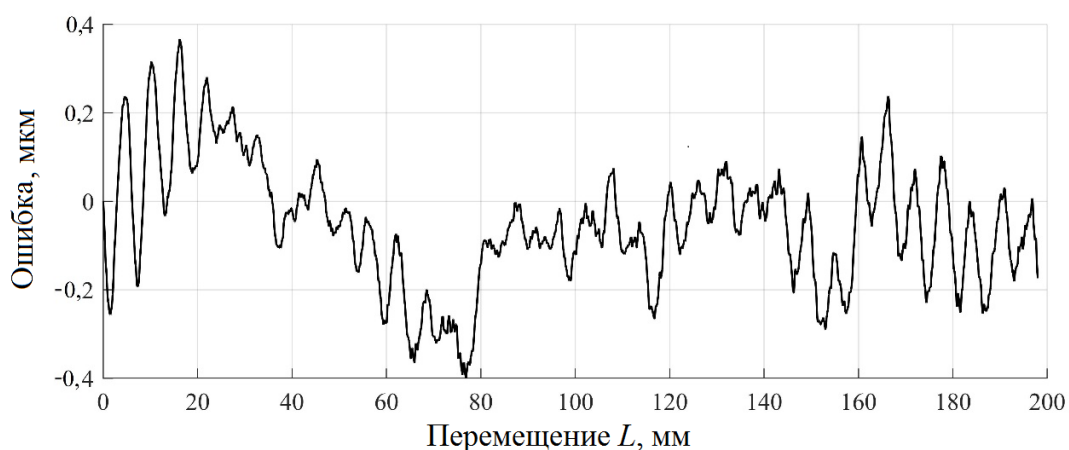


Рисунок 3.12 — Теоретическая ошибка ШВП после калибровки

Заметим, что такой метод калибровки одновременно позволяет учесть геометрические ошибки, возникающие при изготовлении элементов ЛП и его сборки, а также некоторые другие систематические ошибки, которые зависят от текущего положения вала электродвигателя, редуктора и штока линейного привода (см. таблицу 2.3).

На рисунке 3.13 представлена ошибка e_L положения штока линейного привода от 0 до 10 мм, включающая систематическую ошибку ШВП и более высокочастотную ошибку редуктора.

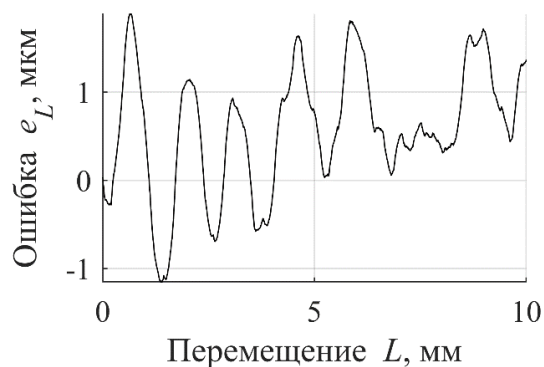


Рисунок 3.13 — Ошибка ЛП

Из рисунка 3.11 видно, что зависимость ошибки e_L перемещения штока ЛП от текущего линейного положения L является нелинейной.

Уже при дискретном перемещении с шагом 1 мкм и ходом 200 мм необходимо хранить 200 000 значений поправок, что может быть затруднительно при реализации системы управления линейным приводом на

базе микроконтроллера с ограниченным объемом памяти. Поэтому наиболее оптимальным вариантом является хранение не полного массива поправок, а некоторого дискретного набора из n узловых точек $\{e_{d1}, e_{d2}, \dots, e_{d(n-1)}, e_{dn}\}$, по которому возможно нахождение промежуточных значений поправок.

Такая задача интерполяции в общем случае имеет множество решений. Приведенную зависимость $e_L(L)$ описать одной общей функцией (т.е. выполнить глобальную интерполяцию) не представляется возможным, поэтому рассмотрим локальную кусочную интерполяцию.

При этом на каждом интервале $[e_{d(i)}, e_{d(i+1)}]$ задается отдельная интерполяционная функция. Рассмотрим различные варианты интерполяционных функций и определим оптимальную для системы управления линейным приводом.

При **кусочно-постоянной интерполяции** на каждом промежутке между узловыми точками $(L_{d(i)}, e_{d(i)})$ и $(L_{d(i+1)}, e_{d(i+1)})$ значение функции постоянно и равно значению величины на левой границе: $e(L) = e(L_{d(i)})$, здесь и далее $L_{d(i)} \leq L \leq L_{d(i+1)}$.

При **кусочно-линейной интерполяции** узловые точки соединяются отрезками прямых, то есть через каждые две точки $(L_{d(i)}, e_{d(i)})$ и $(L_{d(i+1)}, e_{d(i+1)})$ проводится полином первой степени $e(L) = a_0 + a_1 L$. Коэффициенты находятся по формулам: $a_0 = e(L_{d(i-1)}) - a_1 L_{d(i-1)}$, $a_1 = \frac{e(L_{d(i)}) - e(L_{d(i-1)})}{L_{d(i)} - L_{d(i-1)}}$.

При **кусочно-квадратичной интерполяции** для каждой трёх узловых точек $(L_{d(i-1)}, e_{d(i-1)})$, $(L_{d(i)}, e_{d(i)})$, $(L_{d(i+1)}, e_{d(i+1)})$, строится уравнение параболы $e(L) = a_0 + a_1 L + a_2 L^2$. Коэффициенты находятся по формулам

$$a_0 = e(L_{d(i-1)}) - a_1 L_{d(i-1)} - a_2 L_{d(i-1)}^2, \quad a_1 = \frac{e(L_{d(i)}) - e(L_{d(i-1)})}{L_{d(i)} - L_{d(i-1)}} - a_2 (L_{d(i)} - L_{d(i-1)}),$$

$$a_2 = \frac{e(L_{d(i+1)}) - e(L_{d(i-1)})}{(L_{d(i+1)} - L_{d(i-1)})(L_{d(i+1)} - L_{d(i)})} - \frac{e(L_{d(i)}) - e(L_{d(i-1)})}{(L_{d(i)} - L_{d(i-1)})(L_{d(i+1)} - L_{d(i)})}.$$

При **эрмитовой интерполяции** строится многочлен, значения которого в выбранных точках совпадают со значениями исходной функции в этих точках, и производные многочлена в данных точках совпадают со значениями производных функции до некоторого порядка m [124]. Для сравнительного анализа примем $m = 3$.

При **интерполяции кубическими сплайнами** между любыми двумя соседними узлами функция интерполируется кубическим полиномом, при этом его коэффициенты на каждом интервале определяются из специальных условий сопряжения в узлах и особых требований к значениям производных на границах интервалов [124].

Нейронная сеть, согласно универсальной теореме аппроксимации, может аппроксимировать любую непрерывную функцию многих переменных с любой точностью [125]. Условиями являются достаточное количество нейронов скрытого слоя, удачный подбор весов между входными нейронами и нейронами скрытого слоя, весов между связями от нейронов скрытого слоя и выходным нейроном, смещений для нейронов входного слоя.

С учетом высокочастотной составляющей ошибки, показанной на рисунке 3.13, для исследования указанных выше методов интерполяции на основе экспериментальных измерений ошибки ЛП в диапазоне от 0 до 200 мм был подготовлен набор $\{e_{d1}, e_{d2}, \dots, e_{d(n-1)}, e_{dn}\}$ для $n = 2000$, т.е. с шагом $\Delta L = 0,1\text{мм}$. Для нейросетевой аппроксимации подобрана и обучена искусственная нейронная сеть (ИНС) с прямой связью, содержащая в каждом слое по 25 нейронов. Предварительно было установлено, что ИНС с меньшим числом слоев и нейронов имеет большие ошибки аппроксимации.

Для сравнения указанных методов интерполяции были выполнены численные исследования в среде MATLAB® и Keil uVision® для

микроконтроллера серии 1986BE8х. На рисунке 3.14 показаны ошибки различных методов интерполяции.

Как видно из сопоставления рисунков 3.11 и 3.14, случайные ошибки работы механической передачи, неизбежно возникающие от опыта к опыту, сопоставимы с ошибками интерполяции.

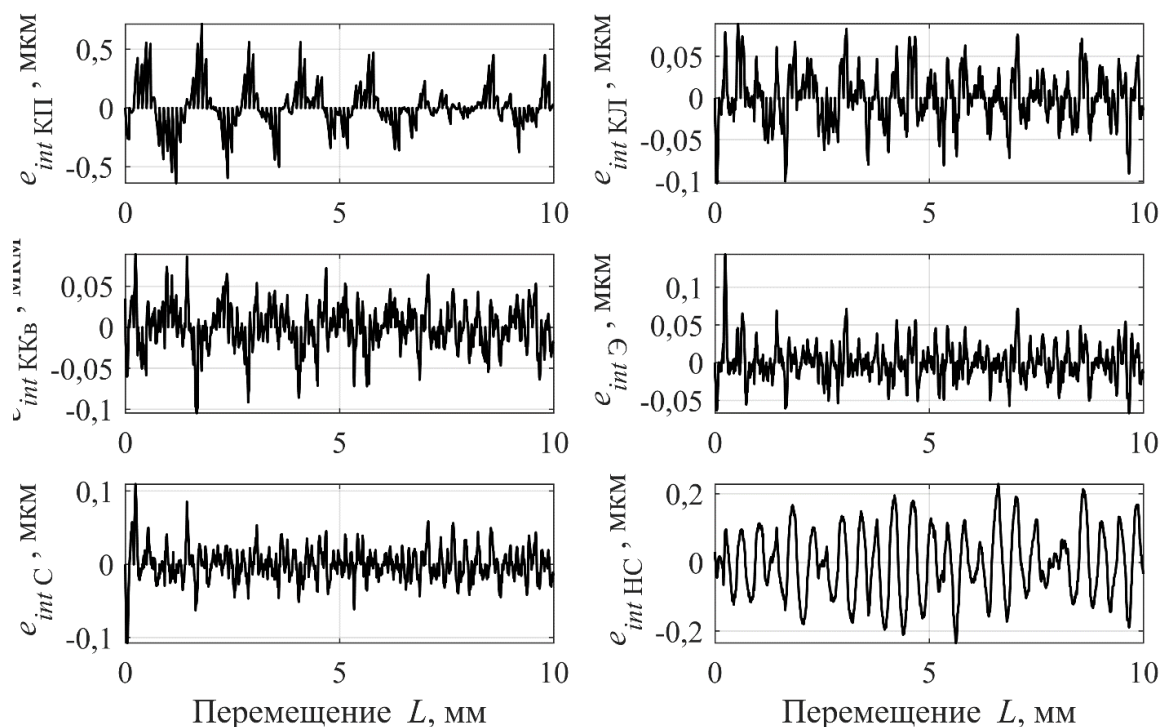


Рисунок 3.14 — Ошибки различных методов интерполяции

В таблице 3.1 представлены сравнительные характеристики методов интерполяции: максимальные значения и среднеквадратичные отклонения (СКО) ошибок, необходимый объем памяти для хранения исходных данных, а также временные затраты на вычисление интерполированного значения.

Последние два параметра являются относительными, а в качестве базового (единичного) значения для них выбраны характеристики, полученные для кусочно-линейной интерполяции.

Из таблицы видно, что наиболее оптимальной по необходимому объему памяти и временным затратам являются кусочно-постоянная и кусочно-линейная функции, при этом по уровню ошибок интерполяции преимущество имеет последняя. Реализация других типов интерполяционных функций

требует больших ресурсов, что особенно критично в малопроизводительных микропроцессорных системах управления.

Кроме того, эрмитова и сплайн-интерполяция, а также применение нейронных сетей требуют выполнения предварительных объемных вычислений и обработки (расчет коэффициентов, обучение нейронной сети).

Таблица 3.1 — Характеристики различных интерполяционных функций

Функция интерполяции	$\max e_L$, мкм	СКО e_L , мкм	Объем памяти (относи- тельный)	Временные затраты (относи- тельные)
Кусочно-постоянная ($e_{int\text{КП}}$)	0,82	0,19	1	0,2
Кусочно-линейная ($e_{int\text{КЛ}}$)	0,12	0,03	1	1
Кусочно-квадратичная ($e_{int\text{ККВ}}$)	0,14	0,02	1	5
Эрмитова интерполяция ($e_{int\text{Э}}$)	0,12	0,10	3	10
Кубический сплайн ($e_{int\text{С}}$)	0,11	0,02	3	7
Трехслойная нейросеть ($e_{int\text{НС}}$)	0,95	0,14	200	$> 10^5$

Таким образом, для компенсации ошибки механической передачи линейного привода целесообразным является использование метода кусочно-линейной интерполяции. При использовании представленного метода можно снизить систематическую погрешность механической части ЛП в десятки раз.

3.6.2 Метод компенсации температурных деформаций

Чувствительность исполнительного механизма к изменению его тепловых полей можно уменьшить путем изготовления деталей из материалов с малым коэффициентом линейного теплового расширения, либо путем обеспечения работы оборудования при постоянной температуре [126, 127 и др.]. Однако, такой подход не всегда возможно применить в космической технике, в том числе из-за широкого рабочего температурного диапазона.

Альтернативным методом повышения точности является учет поправок теплового изменения размеров на программном уровне [128]. Этот способ снижения погрешности применяется, например, в прецизионных измерительных интерферометрических системах [129].

Тепловое изменение размеров стальных и алюминиевых деталей в рассматриваемом диапазоне от -80°C до $+80^{\circ}\text{C}$ происходит практически линейно [130] (см. также рисунок 2.14), что позволяет достаточно просто на программном уровне реализовать компенсацию данного эффекта.

Однородное температурное поле линейного привода

Известно, что изменение длины Δl тела за счет линейного теплового расширения описывается формулой

$$\Delta l = \Delta T \cdot \alpha \cdot l \quad (3.11)$$

где α — коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) тела; l — начальная длина тела при T_0 ; ΔT — изменение температуры относительно T_0 .

Линейный привод можно разбить на n элементов, каждый из которых имеет номинальную длину в осевом направлении l_i , определенную для $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$, а также коэффициент линейного температурного расширения α_i . Общее температурное изменение линейного положения ΔL_T будет описываться выражением:

$$\Delta L_T = \Delta T \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i. \quad (3.12)$$

Ходовая гайка ШВП занимает относительное положение на винте L , которое меняется в зависимости от заданного линейного перемещения штока. Остальные номинальные длины l_i элементов линейного привода для рассматриваемой схемы построения ЛП не изменяются в процессе работы. Поэтому можем преобразовать выражение (3.12) следующим образом:

$$\Delta L_T = \Delta T \left(\alpha_{\text{ШВП}} L + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i l_i \right) = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L + K_{\text{ЛП}}), \quad (3.13)$$

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.

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 $T_{\text{ЛП}} = 20^\circ\text{C}$ и $L = 0$ мм будет равно заданному: $L_T = L_3$.

Выразим зависимость между указанными величинами следующим образом: $L_3 = L_T = \Delta L_T + L$. Отсюда с учетом (3.13) получаем следующее выражение: $L_3 = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L + K_{\text{ЛП}}) + L$.

Тогда $L_3 = L(1 + \Delta T \cdot \alpha_{\text{ШВП}}) + \Delta T \cdot K_{\text{ЛП}}$, отсюда:

$$L = \frac{L_3 - \Delta T \cdot K_{\text{ЛП}}}{1 + \Delta T \cdot \alpha_{\text{ШВП}}}. \quad (3.14)$$

Таким образом выполняется учет температурного изменения размеров при управлении линейным приводом.

Заметим, что в выражении (3.14) присутствуют постоянные коэффициенты $\alpha_{\text{ШВП}}$ и $K_{\text{ЛП}}$, которые можно 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 $T_0 = 20^\circ\text{C}$) определяют величины ошибок ΔL_T в двух крайних положениях $L_0 = 0$ мм и $L_{200} = 200$ мм ($\Delta T = T_{\text{ЛП}} - T_0$):

$$\Delta L_{T, L_0} = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L_0 + K_{\text{ЛП}}), \quad (3.15)$$

$$\Delta L_{T, L_{200}} = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L_{200} + K_{\text{ЛП}}). \quad (3.16)$$

Вычитая (3.15) из (3.16) и выражая $\alpha_{\text{ШВП}}$, получим:

$$\alpha_{\text{ШВП}} = \frac{\Delta L_{T, L_{200}} - \Delta L_{T, L_0}}{\Delta T (L_{200} - L_0)}. \quad (3.17)$$

Аналогичным образом можно экспериментально найти величину $K_{\text{ЛП}}$. Для этого, при известной и постоянной температуре $T_{\text{ЛП}}$ (но отличной от температуры определения номинальных размеров ЛП $T_0 = 20^\circ\text{C}$) определяют величину ошибки ΔL_T при положении $L = 0\text{ мм}$. Тогда

$$\Delta L_T = \Delta T (\alpha_{\text{ШВП}} L_0 + K_{\text{ЛП}}) = \Delta T \cdot K_{\text{ЛП}}. \quad (3.18)$$

Откуда получаем:

$$K_{\text{ЛП}} = \frac{\Delta L_T}{\Delta T}. \quad (3.19)$$

Заметим, что на точность компенсации температурных деформаций влияет как погрешность измерения температуры, так и погрешности определения $K_{\text{ЛП}}$ и $\alpha_{\text{ШВП}}$. Так, при технически достижимой максимальной погрешности измерения температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$ погрешность расчёта температурной поправки для привода при $L = 200\text{ мм}$ составит ориентировочно $\pm 2\text{ мкм}$. Обеспечить указанную точность можно, например, с помощью платиновых резистивных датчиков, устанавливаемых в корпусе ЛП.

Неоднородное температурное поле линейного привода

Заметим, что рассмотренный выше случай температурной компенсации может быть применен только при однородном (изотермическом) температурном поле привода, когда в любой точке конструкции линейного привода температура одинакова и равна $T_{\text{ЛП}}$.

Однако, при работе космического аппарата гексапод и его линейные приводы могут подвергаться тепловым воздействиям неравномерно, в том числе и при укрытии экранно-вакуумной термоизоляции.

На рисунке 3.15 показано неоднородное температурное поле линейного привода с температурой шарниров основания 50°C и платформы около 34°C , а на рисунке 3.16 — соответствующее такому полю изменение линейных размеров, полученное в ходе конечно-элементного моделирования.

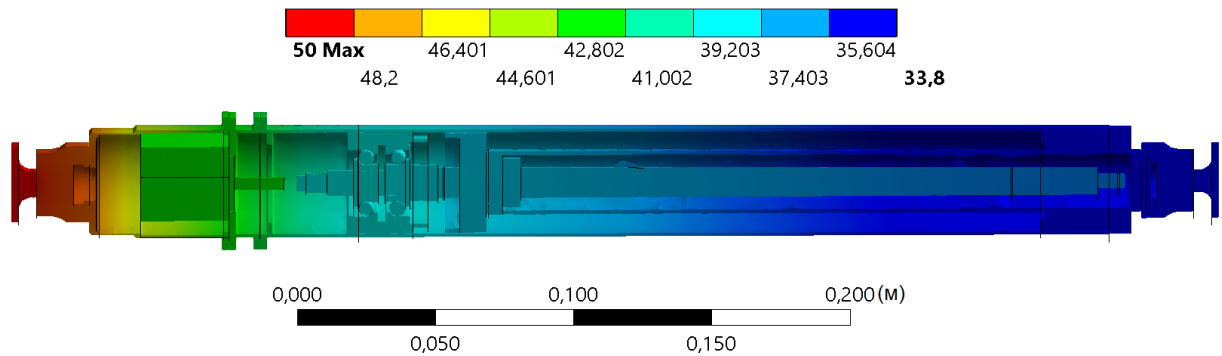


Рисунок 3.15 — Неоднородное температурное поле линейного привода

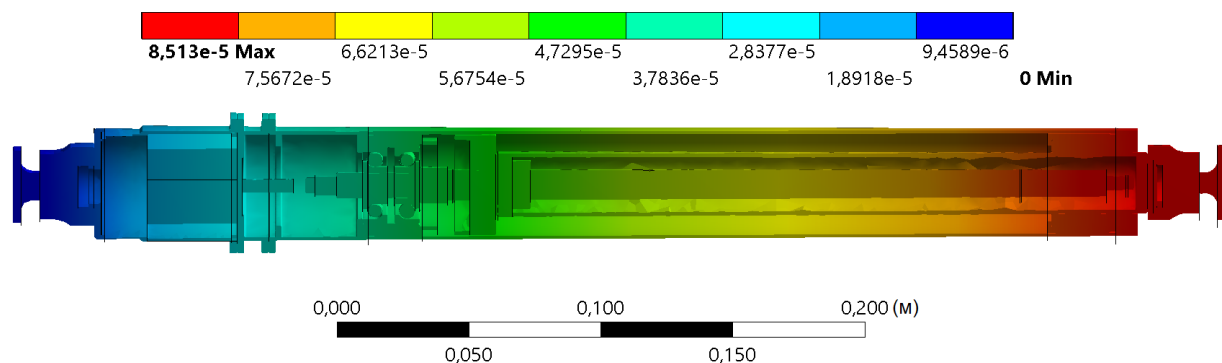


Рисунок 3.16 — Изменение размеров линейного привода
при неоднородном температурном поле

Как было показано ранее, температурная компенсация выполняется отдельно для элементов привода, относительное удлинение которых зависит только от их линейных размеров, и отдельно для элементов, удлинение которых зависит также от текущего линейного положения штока привода.

Разобьем привод на элементы, как показано на рисунке 3.17. Зона $\mathcal{E}_1$ охватывает связанную с линейным приводом часть шарнира основания, стакан с электродвигателем и часть корпуса с подшипниками; зона $\mathcal{E}_2$ включает часть винта шарико-винтовой передачи от места его упора в подшипники до места расположения подвижной гайки со штоком; зона $\mathcal{E}_3$ включает гайку со штоком и часть шарнира платформы. Как видно из рисунка, тепловое изменение размеров $L_{\mathcal{E}_1}$ и $L_{\mathcal{E}_3}$ зависит только от температуры, а размера $L_{\mathcal{E}_2}$ — также и от текущего положения гайки относительно винта ШВП.

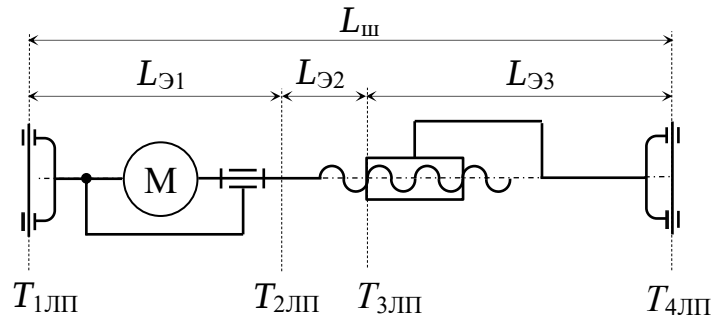


Рисунок 3.17 — Схема разбиения линейного привода на элементы

Расположим, как показано на рисунке 3.17, датчики температуры $T_{1лп}$ — $T_{4лп}$. Предположим, что при неоднородном тепловом поле вдоль осевого направления привода градиент температуры будет равномерным в пределах зон $T_{1лп}$ — $T_{2лп}$, $T_{2лп}$ — $T_{3лп}$ и $T_{3лп}$ — $T_{4лп}$. Тогда можно вычислить соответствующие удлинения:

$$\Delta L_{Э1} = \left(\frac{T_{1лп} + T_{2лп}}{2} - T_0 \right) \alpha_{Э1} L_{Э1}, \quad \Delta L_{Э2} = \left(\frac{T_{2лп} + T_{3лп}}{2} - T_0 \right) \alpha_{Э2} L_{Э2},$$

$$\Delta L_{Э3} = \left(\frac{T_{3лп} + T_{4лп}}{2} - T_0 \right) \alpha_{Э3} L_{Э3}, \quad \Delta L_{ш} = \Delta L_{Э1} + \Delta L_{Э2} + \Delta L_{Э3}. \quad (3.20)$$

При этом произведения $\alpha_{Э1} L_{Э1}$ и $\alpha_{Э2} L_{Э3}$ можно учесть аналогично (3.19) и определить $\alpha_{Э2} = \alpha_{швп}$, $L_{Э2} = L$.

На рисунке 3.18 показаны результаты конечно-элементного моделирования линейного привода, имевшего начальную температуру $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Выполнена имитация неравномерного нагрева привода путем задания плоскости шарнира основания постоянной температуры $T = -60^\circ\text{C}$.

После установления переходного процесса в течение 10 000 секунд в точках, обозначенных на рисунке $T_{1лп}$ — $T_{4лп}$, замерены температуры (рисунок 3.18, а) и линейные деформации (рисунок 3.18, б). Согласно (3.20) вычислены температурные деформации элементов и общая деформация линейного привода (см. таблицу 3.2).

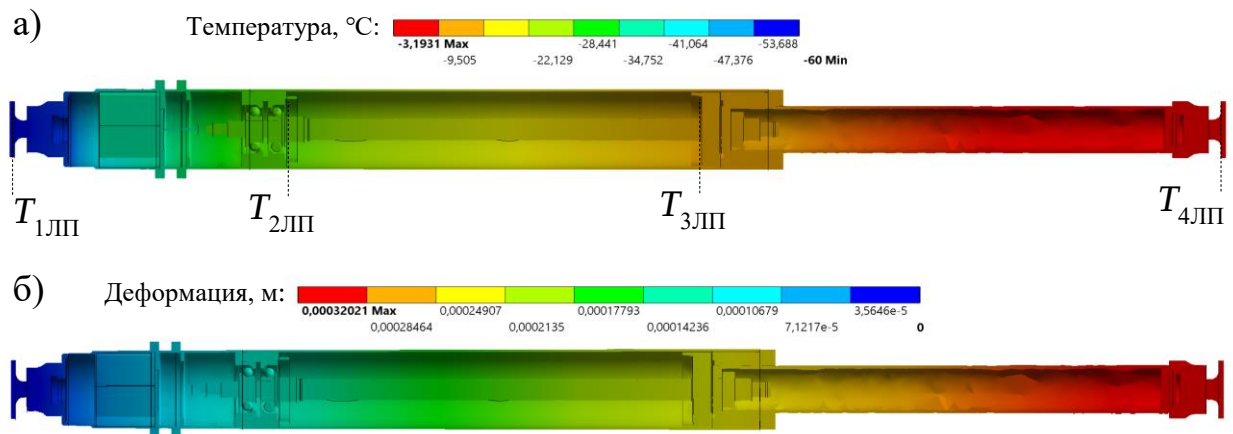


Рисунок 3.18 — Результаты конечно-элементного моделирования

Таблица 3.2 — Результаты конечно-элементного моделирования

Точка	$T_{1ЛП}$	$T_{2ЛП}$	$T_{3ЛП}$	$T_{4ЛП}$
Температура, °C	– 60	– 28,14	– 13,08	– 3,19
Элемент привода	$T_{1ЛП} — T_{2ЛП}$		$T_{2ЛП} — T_{3ЛП}$	$T_{1ЛП} — T_{2ЛП}$
Температурный множитель, °C	– 66,07		– 42,61	– 30,14
Множитель $\alpha_3 L_3$, мкм/°C	1,73		2,62	3,29
Деформация ΔL_3 , мкм	– 114,3		– 111,64	– 99,16
Общая деформация $\Delta L_{ш}$, мкм	Расчет по (3.20)		Моделирование	
	– 325,1		– 320,21	

Расхождение результатов конечно-элементного моделирования и вычислений согласно (3.20) можно объяснить тем, что температурная деформация привода имеет в общем случае две составляющие — линейную, описываемую (3.11), и нелинейную, вызванную изгибными деформациями элементов линейного привода. Известны методы компенсации температурных деформаций при сложной пространственной конфигурации теплового поля, но они требуют точного определения механических и теплофизических характеристик материалов элементов конструкции линейного привода, и фактически представляют собой требовательные к вычислительным ресурсам методы конечных элементов [131].

Вместе с тем, расчет температурных деформаций по формуле (3.20) позволяет существенно упростить программную компенсацию и реализовать ее технически в системе управления ЛП, в отличие от МКЭ.

Кроме того, при уменьшении градиента температур вдоль оси линейного привода (например, за счет применения ЭВТИ для укрытия конструкции гексапода в целом) точность предложенного подхода также увеличится за счет уменьшения изгибных деформаций [132].

Таким образом, при использовании метода компенсации температурных деформаций, можно снизить погрешность в сотни раз.

3.6.3 Метод компенсации упругой деформации

Осевое усилие нагрузки, действующее с учетом конечной жесткости конструкции линейного привода, приводит к упругой деформации и возникновению погрешности линейного положения.

Для приводов гексапода, работающего в условиях невесомости, источниками осевых усилий на конце штока являются только силы инерции нагрузки и взаимонагружающие усилия от других приводов.

При отсутствии движения силы инерции нулевые, а взаимонагружающие усилия с учетом высокого качества изготовления механизма с параллельной структурой незначительны.

Однако, для наземных механизмов с параллельной структурой упругая деформация элементов привода под нагрузкой является существенной [133], поэтому компенсация упругой деформации является актуальной задачей. В станко- и машиностроении такой способ снижения погрешности линейного позиционирования применяется достаточно широко [134–136 и др.].

Упругую деформацию $\Delta L_{\text{упр}}$ легко оценить, зная жесткость механической передачи привода $C_{\text{ЛП}}$ и усилие нагрузки $F_{\text{н}}$, прикладываемое к штоку: $\Delta L_{\text{упр}} = F_{\text{н}} / C_{\text{ЛП}}$ (шток зафиксирован от линейного перемещений со

стороны двигателя). Жесткость $C_{лп}$ определяется преимущественно жесткостью ШВП и редуктора, указываемых в документации производителей.

Нагружающее усилие F_n при этом можно определить несколькими способами: с помощью датчика усилия (деформаций), устанавливаемого на штоке; датчика момента на валу ШД; по току потребления электродвигателя, пропорционального моменту нагрузки, и некоторыми другими методами.

Однако, в ряде случаев установка дополнительных датчиков может быть затруднена. При этом, как будет показано далее в подразделе 4.3, оценить F_n можно с помощью расширенного фильтра Калмана путем введения дополнительной переменной состояния в модель наблюдателя.

3.7 Алгоритм прецизионного управления линейным приводом

На основе предложенных методов повышения точности разработан алгоритм прецизионного управления линейным приводом, показанный на рисунке 3.19.

На шаге 1 в соответствии с алгоритмом планирования траектории движения платформы гексапода (см. подраздел 3.3) для заданных динамических ограничений выполняется вычисление набора векторов $\langle \mathbf{q}_3(T), \dots, \mathbf{q}_3(nT) \rangle$ и далее путем решения обратной задачи кинематики гексапода вычисляется набор векторов $\langle \mathbf{L}_3(T), \dots, \mathbf{L}_3(nT) \rangle$. Далее на шаге 3 на каждом такте k , пока $k \leq n$ (проверка выполняется на шаге 2), линейным приводам

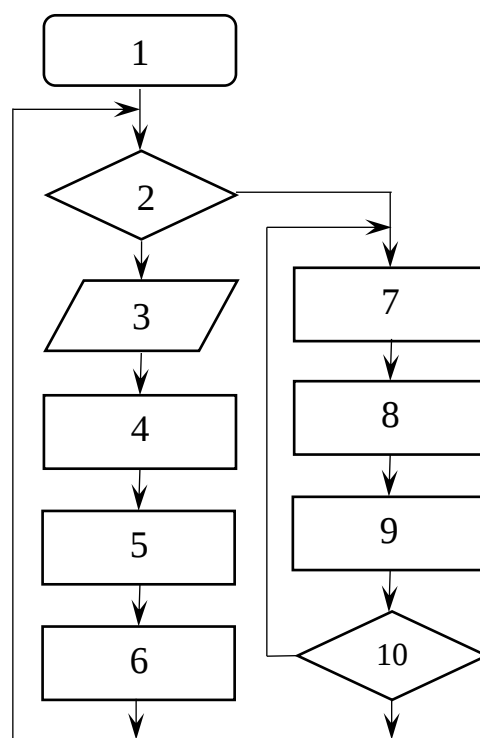


Рисунок 3.19 — Алгоритм прецизионного управления линейным приводом

гексапода в режиме реального времени с периодом T передаются задающие воздействия $\mathbf{L}_3(kT) = [L_1(kT), \dots, L_6(kT)]$.

На шаге 4 система управления линейным приводом получает информацию от датчика(-ов) температуры, и, в соответствии с методом компенсации температурной деформации (см. подраздел 3.6) 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 (см. подраздел 3.6) вычисляется соответствующее угловое положение вала электродвигателя $\theta_3 = f(L_3^*)$. На шаге 6 заданный сигнал θ_3 отрабатывается шаговым электродвигателем в замкнутом (см. подраздел 3.4) или разомкнутом (см. подраздел 3.5) режиме.

После отработки всей траектории $\langle \mathbf{L}_3(T), \dots, \mathbf{L}_3(nT) \rangle$ система переходит на шаг 7 в режим поддержания заданного линейного положения (стабилизации). В этом режиме периодически измеряется температурное поле привода. Затем 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 $L_3^* = L_3 + \Delta L_T + \Delta L_{\text{упр}}$ (см. подразделы 3.6 и 4.3).

На шаге 9, аналогично шагу 6, заданный сигнал $\theta_3 = f(L_3^*)$ отрабатывается электродвигателем в замкнутом или разомкнутом режиме.

На шаге 10 в случае, если сформирована новая траектория $\langle \mathbf{L}_3(T), \dots, \mathbf{L}_3(nT) \rangle$, система управления переходит к шагу 2.

Параллельно основному алгоритму также осуществляется контроль пропуска шагов по встроенному датчику углового положения. В случае пропуска шага система управления выдает информацию о соответствующей ошибке бортовому компьютеру и далее оператору на Земле. Возможными

решениями могут быть повторная попытка перемещения, изменение траектории или ее динамических параметров и ограничений.

3.8 Выводы по разделу

1. Предъявляемые к гексаподу требования статической и динамической точности, ограничений динамических возмущений на объект управления и несущую платформу КА подразумевают применение специальных алгоритмов планирования траектории в координатах подвижной платформы.

2. Реализация системы управления, обеспечивающей траекторное управление на основе решения задач кинематики и динамики МПС требует значительных вычислительных ресурсов, а также точных априорных значений параметров матриц, характеризующие массо-инерционные и упруго-демпфирующие свойства данного варианта конструкции гексапода.

3. Поскольку рассматриваемый гексапод предназначен для функционирования с небольшими скоростями и ускорениями в условиях отсутствия гравитационных сил, возможно построение системы управления МПС в пространстве обобщенных координат линейных приводов. Задающие сигналы при этом передаются на ЛПП в режиме реального времени.

4. Управление таким следящим линейным приводом на основе шагового двигателя целесообразно реализовать в вентильном режиме, позволяющем получить лучшие динамические характеристики путем регулирования вращающего момента и потокосцепления ротора. Вентильный режим обеспечивается наблюдателем на основе расширенного фильтра Калмана.

5. Дополнительным преимуществом использования наблюдателя состояния является возможность построения замкнутой системы подчиненного регулирования, обеспечивающей высокую устойчивость, статические и динамические показатели качества работы привода путем отдельного регулирования магнитных полей статора и ротора, угловой скорости и положения шагового двигателя.

6. Рассмотренные методы повышения точности ЛПП и разработанный алгоритм прецизионного управления позволяют значительно снизить

погрешность за счет компенсации систематической ошибки механической части ЛП, а также температурных и упругих деформаций элементов ЛП.

4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Имитационная компьютерная модель

Имитационное компьютерное моделирование выполнялось в среде MATLAB® Simulink®. На рисунке 4.1 показана блок-схема модели ЛП.

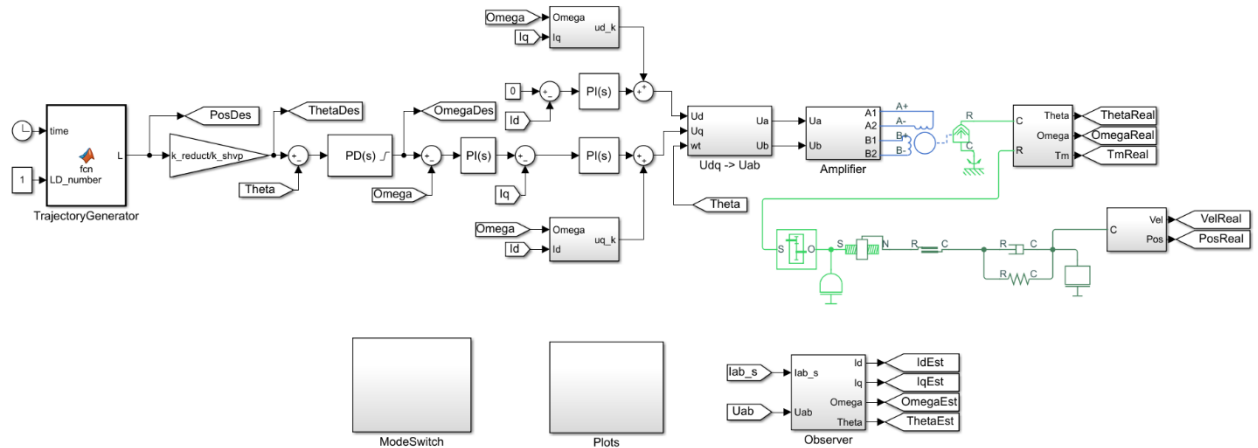


Рисунок 4.1 — Блок-схема модели линейного привода в среде Simulink®

Модель состоит из следующих блоков:

- блок генератора траектории *TrajectoryGenerator*, реализующий траекторное управление, описанное в подразделе 3.3;
- систему подчиненного регулирования, включающую ПИ- и ПД-регуляторы сигналы обратной связи по координатам i_d , i_q , ω и θ , а также компенсационные сигналы $u_{qк}$ и $u_{dк}$ (см. подраздел 3.4);
- блоки, реализующие прямое и обратное преобразования координат связанных со статором фазных токов i_a, i_b и напряжений u_a, u_b к неподвижно связанным с ротором величинам i_d, i_q, u_d, u_q , согласно выражению (3.5);
- блок усилителя сигналов *Amplifier*, содержащий также датчики фазных токов с шумом измерений σ_i ;
- модель шагового двигателя библиотеки *Simscape Electrical*;

- модель нагрузки, включающую редуктор, упругую шариковинтовую передачу с инерционным валом, блок трения, а также закрепленный на подвижной части ШВП объект постоянной массы;
- блок *Observer* наблюдателя состояния на основе РФК;
- блок *ModeSwitch*, в котором задается способ введения сигналов обратной связи: действительные сигналы от идеальных датчиков, либо оценки наблюдателя состояния;
- вспомогательные блоки измерения действительных параметров i_d , i_q , ω , θ , оценок РФК и других величин.

Работа цифрового наблюдателя состояния на основе фильтра Калмана моделировалась с дискретностью 0,1 мс.

Сигналы на обмотки электродвигателя моделировались как непрерывные, поскольку с учетом постоянной времени ЭД квантованием широтно-импульсных сигналов фазных напряжений с типовой частотой более 20 кГц можно пренебречь. Трение в механической передаче линейного привода моделировалось согласно выражению (3.4).

Моделирование выполнялось без учета сил гравитации, поскольку рассматривается работа гексапода в условиях невесомости.

Параметризация модели линейного привода

Определим основные параметры модели, заданной системой уравнений (3.6) и показанной на рисунке 4.1.

Приведенное в (3.2) математическое описание момента двигателя содержит значительное количество нелинейностей в выражениях для T_{Fr} и T_D .

На практике идентификация параметров выражения (3.4) F_B , F_C , v_C , v_S и др. сопряжена с рядом технических трудностей, поэтому достоверно описать в наблюдателе состояния поведение трения в системе с помощью (3.4) зачастую не удастся. Кроме того, при циклической работе исполнительного устройства, особенно в условиях пониженного давления и широкого

диапазона температур, численные значения указанных параметров подвержены значительным изменениям.

Поэтому зачастую используют линеаризованную модель, в которой момент трения является функцией угловой скорости: $T_{Fr} = K_{Fr} \omega$, где K_{Fr} — коэффициент вязкого трения на валу ротора электродвигателя, а остальные составляющие выражения (3.4) считают случайными.

Как видно из выражения (3.3), величина фиксирующего момента зависит от текущего углового положения и изменяется с высокой частотой. На практике это приводит к тому, что оцененные по $\hat{\theta}$ величины $\hat{T}_d$ и $\hat{T}_s$ расходятся и РФК становится вычислительно неустойчивым.

Вместе с тем, благодаря свойству РФК оценивать вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных и зашумленных измерений, можем исключить аналитическое описание T_D и упростить описание T_{Fr} , считая их случайной составляющей эволюции системы.

В этом случае суммарный момент на валу двигателя будет определяться следующим выражением:

$$T_s = K_{Fr} \omega + T_L, \quad (4.1)$$

где T_L включает момент T_{LD} , а также указанные выше, аналитически не учитываемые составляющие моментов T_D и T_{Fr} .

Для работы РФК необходимо определение ковариационных матриц случайного эволюционного процесса $\mathbf{Q}_k$, процесса измерений $\mathbf{R}_k$, начального состояния $\mathbf{x}_0$ и начальных ошибок $\mathbf{P}_0$.

Начальное состояние шагового двигателя известно достаточно точно: $\mathbf{x}_0 = [i_{d0} \ i_{q0} \ \omega_0 \ \theta_0]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. Значение θ_0 может быть уточнено в начальный момент времени по встроенному датчику углового положения.

От выбора матриц $\mathbf{P}_0$, $\mathbf{Q}_k$ и $\mathbf{R}_k$ зависит производительность и сходимость фильтра Калмана. В общем случае данные матрицы могут

зависеть от времени. Для наблюдателя состояния рассматриваемого привода примем их постоянными и опустим коэффициент k .

Для электромеханической системы привода можно считать, что матрицы $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ — диагональные, т.е. значения ковариаций между компонентами вектора состояния, а также между компонентами вектора измерений равны нулю [137].

Матрица $\mathbf{R}$ может быть определена как $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 \end{bmatrix}$, где σ_i — среднеквадратическое отклонение (СКО) измерений i_d и i_q . Экспериментальным путем было установлено, что для аналого-цифровой системы управления двигателем эти значения составляют $\sigma_i = 0,004\text{A}$.

Значения элементов матрицы $\mathbf{Q}$ зависят от параметров двигателя, шумов процессов, периода дискретизации РФК и некоторых других случайных величин. Для их точного определения возможно воспользоваться оптимизационным подходом с применением методов искусственного интеллекта [138 и др.], в большинстве же случаев достаточно выполнить оценку СКО переменных состояния путем имитационного моделирования.

Так для рассматриваемого привода получены значения СКО скорости и углового положения соответственно $\sigma_\omega = 1\text{рад/с}$, $\sigma_\theta = 0,001\text{ рад}$. Отметим, что при меньших значениях σ_i , σ_ω и σ_θ наблюдаются меньшие статические и динамические ошибки привода, однако вместе с тем система теряет устойчивость к возмущающим воздействиям и шумам измерений.

Диагональная матрица ошибок $\mathbf{P}_0$ определяет СКО начальных значений переменных состояния $\mathbf{x}_0$ [139].

Зададим матрицы $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{P}_0$ следующим образом:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\theta \end{bmatrix}.$$

Немаловажным является вопрос определения обычно априори не известной величины K_{Fr} . Для реального привода её можно оценить с помощью расширенного фильтра Калмана.

Для этого необходимо расширить вектор переменных состояния $\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ \omega \ \theta \ K_{Fr}]^T$, приняв также $\dot{K}_{Fr} = 0$. Далее необходимо разомкнуть обратные связи в позиционном, скоростном и токовых контурах и задать постоянные значения $u_d = 0$ и $u_q = \text{const}$.

В этом случае переменные состояния двигателя i_d, i_q и ω также будут сходиться к постоянным значениям, что согласно системе уравнений (3.6) позволит оценить неизвестное значение параметра K_{Fr} . Аналогичным образом можно оценить моментную постоянную двигателя $\hat{K}_m$.

На рисунке 4.2 показаны оценки $\hat{K}_{Fr}$ и $\hat{K}_m$ при заданных в модели параметрах $K_{Fr} = 0,001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$ и $K_m = 0,09 \text{ Н} \cdot \text{м/А}$. Относительная ошибка оценки в установившемся режиме не превышает 10%.

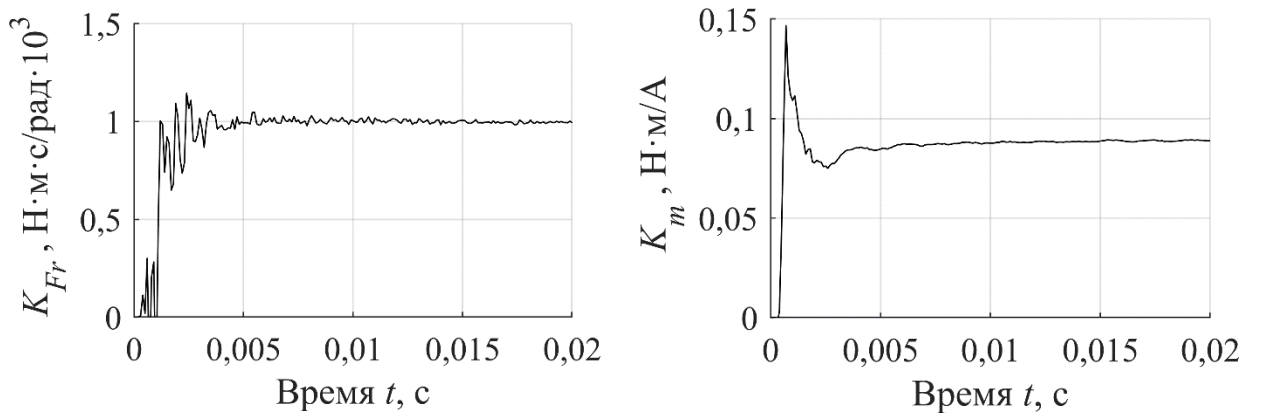


Рисунок 4.2 — Оценки $\hat{K}_{Fr}$ и $\hat{K}_m$

Отметим, что оценка приведенного к валу момента инерции $\hat{J}_s$ для рассматриваемого привода затруднена, поскольку значения ковариаций и дисперсий переменных состояния велики. При выбранном векторе $\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ \omega \ \theta \ J_s]^T$ оценка $\hat{J}_s$ расходится, а наблюдатель состояния линейного привода теряет устойчивость.

В таблице 4.1 приведены параметры модели линейного привода и РФК, полученные из технической документации, вычисленные аналитически, либо полученные экспериментально.

Таблица 4.1 — Параметры модели линейного привода и РФК

Наименование параметра	Номинальное значение
Сопротивление обмотки R	5,6 Ом
Индуктивность обмотки L	3,8 мГн
Число пар полюсов p	50
Моментная постоянная двигателя K_m	0,09 Н · м/А
Передаточное число редуктора k_p	50
Шаг ШВП $k_{ШВП}$	0,004π мм/рад
Приведенный к валу момент инерции J_s	$2,1 \cdot 10^{-6}$ кг · м ²
Фиксирующий момент T_{dA}	0,001 Н · м
Коэффициент трения (в наблюдателе) K_{Fr}	0,001 Н · м · с/рад
Сила трения отрыва F_B	25 Н
Сила Кулонова трения F_C	20 Н
Порог скорости Кулона v_C	0,01 м/с
Порог скорости Штрибека v_s	0,14 м/с
Коэффициент формы Штрибека α	2
Коэффициент вязкого трения σ	100 Н / (м · с)
СКО измерений токов σ_i	0,004 А
СКО угловой скорости σ_ω	1 рад/с
СКО углового положения σ_θ	0,001 рад
Жесткость механической передачи ЛП $C_{ЛП}$	10 Н/мкм
Коэффициент демпфирования ЛП	1 Н/(мкм/с)
Масса объекта, закрепленного на ЛП	50 кг

4.2 Оценка устойчивости системы управления

На рисунке 4.3 приведена структурная схема следящего привода с системой управления на основе наблюдателя состояния на базе РФК. Электромеханическая часть привода включает в себя шаговый двигатель, редуктор, шарико-винтовую передачу и механические элементы ЛП.

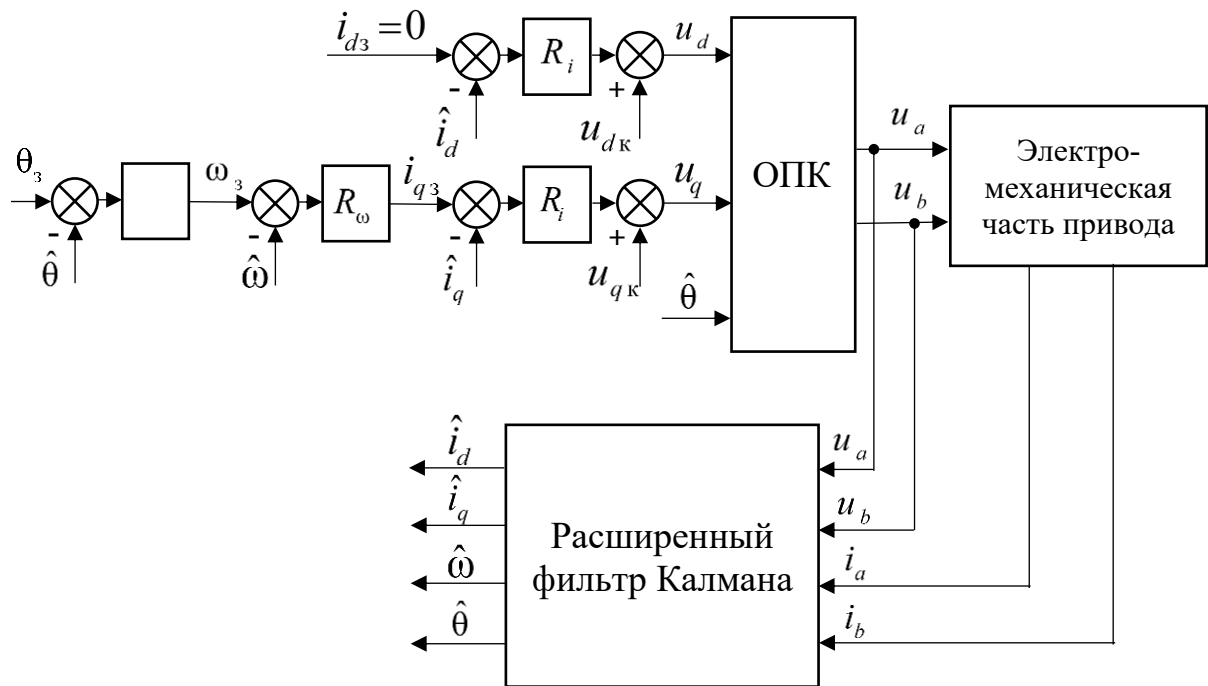


Рисунок 4.3 — Структурная схема линейного привода с системой управления на основе наблюдателя

В системе реализовано подчиненное регулирование координат тока, скорости и углового положения, а в качестве сигналов обратной связи используются оценки $\hat{i}_d, \hat{i}_q, \hat{\omega}, \hat{\theta}$, получаемые с помощью РФК на основе измерений фазных токов и напряжений u_a, u_b, i_a, i_b двигателя. Для устранения перекрестных связей подаются соответствующие сигналы $u_{dк}$ и $u_{qк}$.

Регулирование токов выполняется в пространстве dq -координат. На основе оценки $\hat{\theta}$ с помощью обратного преобразования Парка выполняется вычисление фазных напряжений u_a, u_b и их подача на обмотки двигателя.

Устойчивость замкнутой системы управления на основе наблюдателя состояния можно определить следующим образом.

Сначала оценивается устойчивость собственно наблюдателя. Если расширенный фильтр Калмана имеет экспоненциальную устойчивость, т.е. отвечает ряду выраженных методом функций Ляпунова критериев, то при условии устойчивости системы управления с регуляторами, замкнутая система ЛП также будет устойчива [140].

Определим следующие достаточные условия экспоненциальной устойчивости РФК на каждом шаге k :

1. матрица измерений системы ограничена: $\|\mathbf{H}_k\| \leq \bar{h}$;
2. начальная ковариационная матрица $\mathbf{P}_0$, а также ковариационные матрицы эволюционного процесса $\mathbf{Q}_k$ и шумов измерений $\mathbf{R}_k$ должны быть положительно определенными;
3. апостериорная ковариационная матрица ошибок ограничена: $\underline{p}\mathbf{I} \leq \mathbf{P}_{k|k} \leq \bar{p}\mathbf{I}$;
4. матрица коэффициентов усиления ограничена: $\|\mathbf{K}_k\| \leq \|\mathbf{P}_{k|k}\| \|\mathbf{H}_k\| \|\mathbf{R}_k^{-1}\| \leq \bar{\kappa}$;

где $\bar{h}$, $\underline{p}$, $\bar{p}$, $\bar{\kappa}$ — некоторые положительные действительные числа, а $\mathbf{I}$ — единичная матрица $n \times n$;

Нетрудно показать, что рассматриваемая система вполне удовлетворяет первому и второму условиям. Однако, аналитическая оценка устойчивости наблюдателя по третьему и четвертому условиям является сложной задачей, поэтому выполним проверку этих условий методом имитационного моделирования.

На рисунке 4.4 показаны графики линейного перемещения и ошибки для линейного привода, замкнутого по измеряемым виртуальными датчиками имитационной модели переменным состоянием.

Параллельно и независимо моделируется работа РФК с введением в канал измерения токов случайных шумов с $\sigma_i = 0,004\text{A}$.

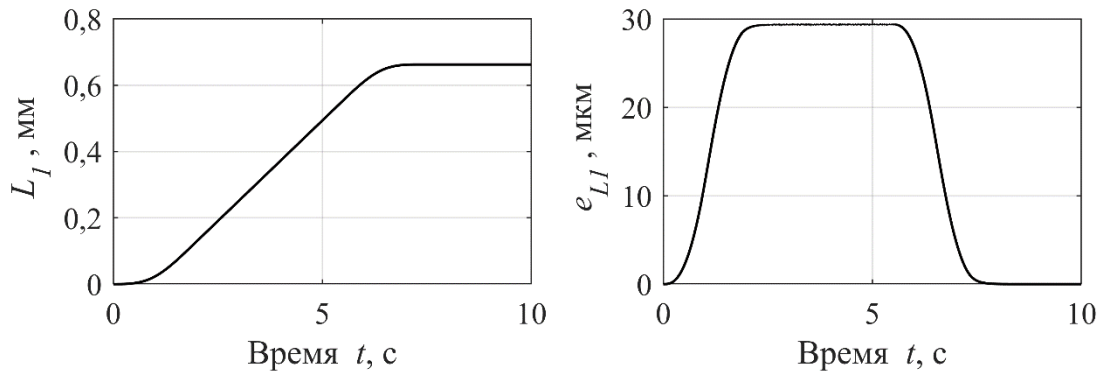


Рисунок 4.4 — Заданное перемещение и ошибка работы линейного привода

На рисунках 4.5 показаны соответствующие значения диагональных элементов апостериорной ковариационной матрицы $\mathbf{P}_{k|k}$, а на рисунке 4.6 — нормы $\|\mathbf{K}_k\|$ и $\|\mathbf{P}_{k|k}\| \|\mathbf{H}_k\| \|\mathbf{R}_k^{-1}\|$.

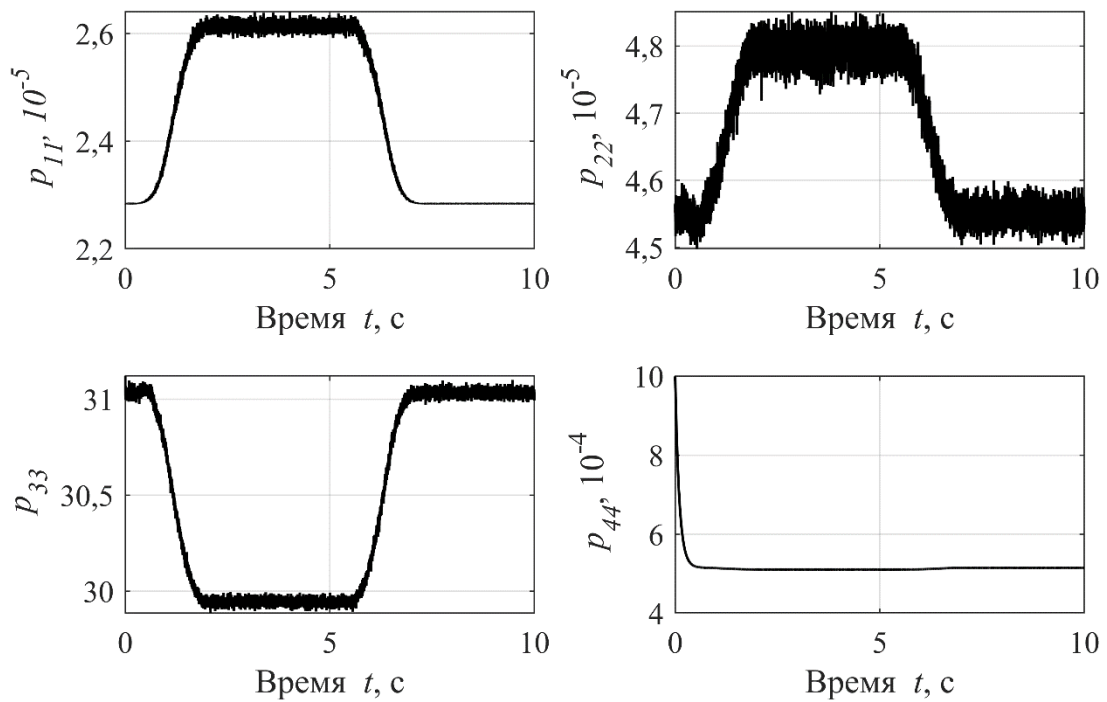


Рисунок 4.5 — Значения диагональных элементов матрицы $\mathbf{P}_{k|k}$

Как видно из рисунков 4.5 и 4.6, третье и четвертое условия устойчивости РФК при заданной траектории и условиях нагрузки выполняются.

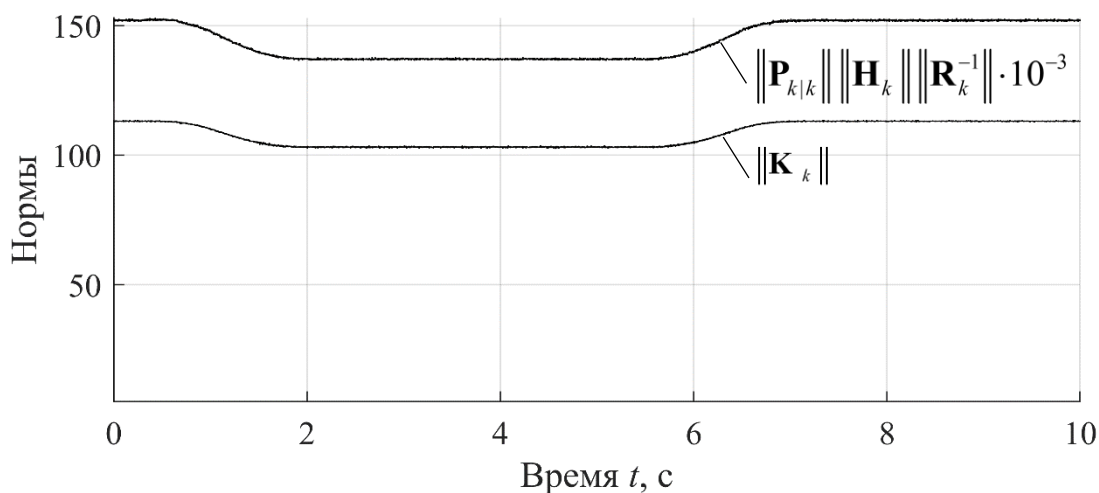


Рисунок 4.6 — Нормы $\|K_k\|$ и $\|P_{k|k}\| \|H_k\| \|R_k^{-1}\|$

Поскольку синтезированный наблюдатель состояния является экспоненциально устойчивым, рассмотрим вопрос устойчивости системы подчиненного регулирования с исполнительным шаговым двигателем.

Как показано в подразделе 3.4, такую систему при введении специальных компенсационных сигналов $u_{qк}$ и $u_{dк}$ можно линеаризовать.

Примем $\omega_{0i} = 500 \text{ Гц}$, $\omega_{0\omega} = 50 \text{ Гц}$, $\omega_{0\theta} = 25 \text{ Гц}$. Тогда с учетом параметров двигателя передаточные функции полученной системы подчиненного регулирования можно приближенно представить следующим образом (без учета малых коэффициентов при старших степенях s):

$$W_{\theta}(s) \approx \frac{0,116s^3 + 34,33s^2 + 4675s + 156250}{s(0,016s^3 + 3,496s^2 + 374s + 12500)},$$

$$\Phi_{\theta}(s) \approx \frac{1,282s^5 + 250,3s^4 + 3321s^3 + 2,72 \cdot 10^6 s^2 + 1,17 \cdot 10^8 s + 1,95 \cdot 10^9}{0,16s^6 + 26,98s^5 + 3277s^4 + 2,6 \cdot 10^6 s^3 + 1,2 \cdot 10^7 s^2 + 2,73 \cdot 10^8 s + 1,95 \cdot 10^9}.$$

Поскольку система управления ЛП функционирует в цифровом виде, полученную непрерывную ПФ $W_{\theta}(s)$ преобразуем в дискретную методом экстраполятора нулевого порядка с периодом квантования 0,1 мс:

$$W_{\theta}(z) \approx \frac{0,007z^3 - 0,02z^2 + 0,018z - 0,00546}{z^4 - 3,788z^3 + 5,386z^2 - 3,406z + 0,809}.$$

Оценим запас устойчивости, построив логарифмическую амплитудно-фазовую частотную характеристику (ЛАФЧХ) дискретной системы (рисунок 4.7).

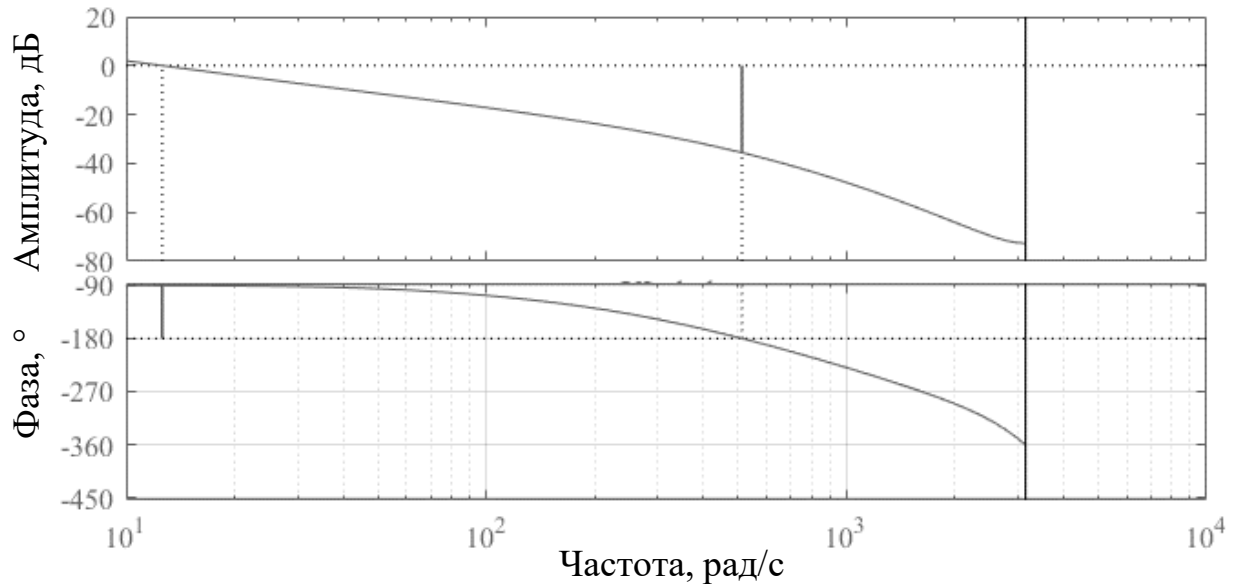


Рисунок 4.7 — ЛАФЧХ для дискретной системы

Как видно, система имеет достаточно большие запасы устойчивости, по амплитуде и фазе они составляют соответственно 35,6 дБ и $89,5^\circ$.

Однако, определяющим фактором устойчивости работы замкнутой системы управления вентильным приводом является точность поддержания угла между векторами магнитных потоков статора и ротора. При соблюдении ортогональности указанных потоков развиваемый приводом момент, а также его КПД будут максимальны. В противном случае при некотором отклонении угла от 90 электрических градусов шаговый двигатель выпадает из синхронизма, а система управления теряет устойчивость.

При использовании в системе управления оценки $\hat{\theta}$, точность поддержания ортогональности магнитных потоков напрямую зависит от сходимости данной оценки к действительной величине θ . В то же время, в соответствии с итерационным принципом работы РФК, величина ошибки оценивания $e_\theta = \theta - \hat{\theta}$ растет с увеличением скорости вращения вала двигателя

(что также видно из рисунков 4.5 и 4.6). Поэтому еще одним фактором, влияющим на устойчивость системы управления, является величина $\omega = \dot{\theta}$.

На рисунке 4.8 показаны графики изменения переменных состояния i_d , i_q , ω и θ , а также соответствующих ошибок оценок расширенного фильтра Калмана $e_{i_d} = i_d - \hat{i}_d$, $e_{i_q} = i_q - \hat{i}_q$, $e_{\omega} = \omega - \hat{\omega}$, $e_{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ при линейно увеличивающейся скорости вращения вала шагового двигателя.

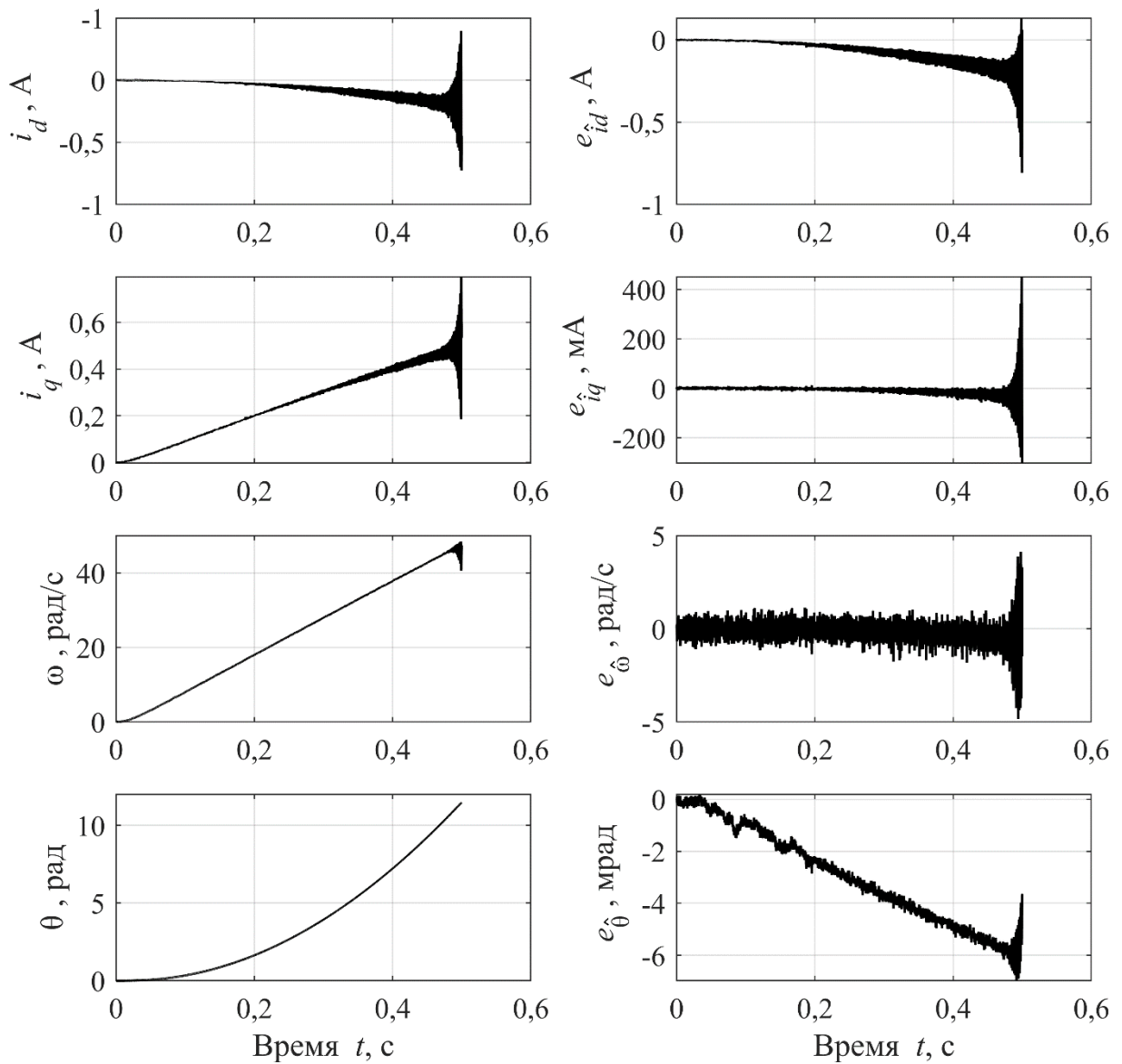


Рисунок 4.8 — Изменение переменных состояния и соответствующих ошибок оценки при потере устойчивости

Из рисунка видно, что при достижении некоторого максимального рассогласования e_{θ} система теряет устойчивость.

Путем серии имитационных экспериментов для рассматриваемого линейного привода были установлены соответствующие значения e_{θ} и ω , при которых система управления остается устойчивой: $e_{\theta} < 5$ мрад, $\omega < 45$ рад/с.

Указанное ограничение скорости достаточно легко реализовать с применением рассмотренного выше подчиненного регулирования, в этом случае устойчивость работы линейного привода обеспечивается путем введения соответствующих параметров насыщения на выходе регулятора позиционного контура, т.е. на входе регулятора скоростного контура.

На рисунке 4.9 показана реакция замкнутой по оцениваемым координатам системы на последовательность единичных скачков входного сигнала L_{13} и скачков осевой нагрузки F_n при ограничениях регулятора позиционного контура $\max|\omega_3| = 40$ рад/с. На рисунке 4.10 показаны переменные состояния и соответствующие ошибки оценки.

Положительное значение F_n соответствует усилию, противодействующему движению штока. Скорость v_{L1} при скачке усилия кратковременно падает, а ошибка позиционирования e_{L1} увеличивается.

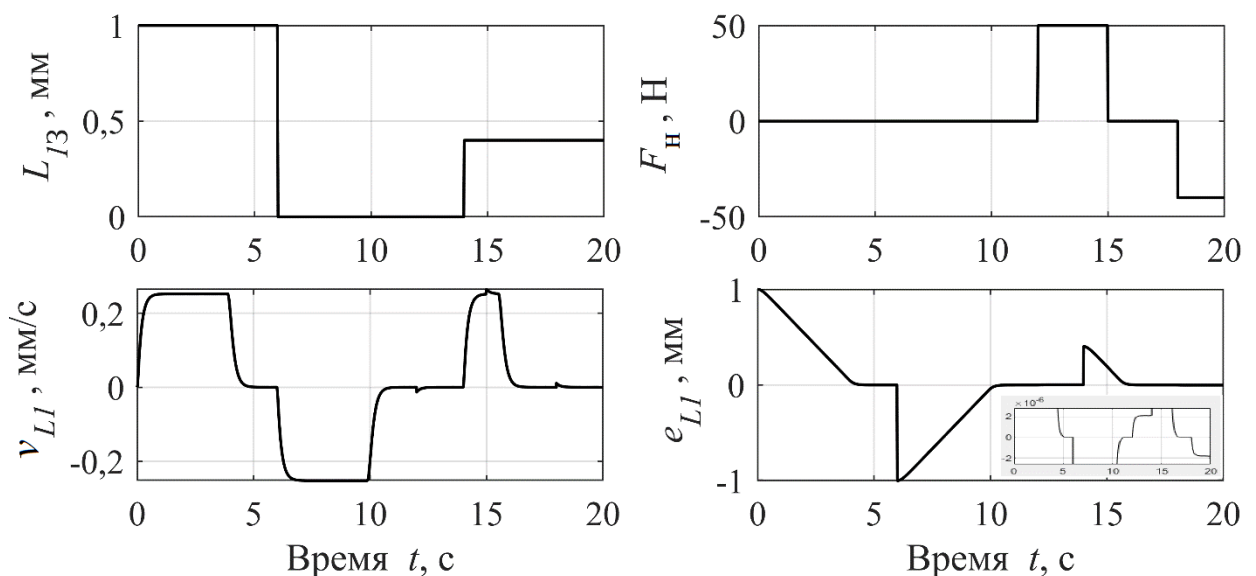


Рисунок 4.9 — Реакция ЛП на единичные скачки L_{13} и F_n

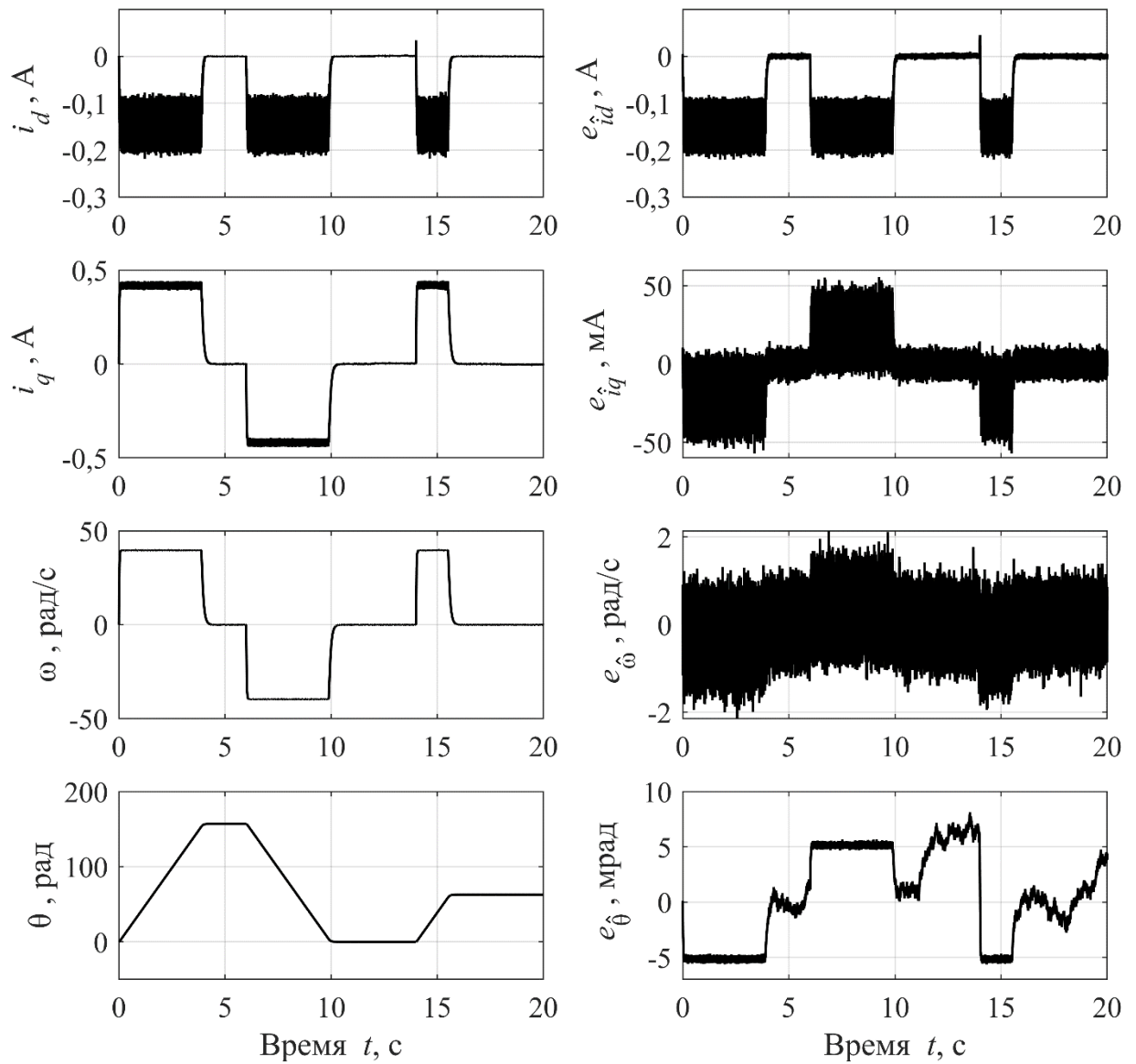


Рисунок 4.10 — Изменение переменных состояния
и соответствующих ошибок оценки

Таким образом, из представленных вычислений и результатов моделирования видно, что синтезированная система управления ЛП и замкнутый линейный привод устойчивы в широких пределах задающих и возмущающих воздействий.

4.3 Моделирование работы линейного привода в режиме слежения

Как было показано в подразделе 3.3, линейный привод гексапода должен функционировать в режиме следящего исполнительного устройства, т.е. обрабатывать заданный сигнал в реальном времени. Оценим с помощью описанной выше имитационной модели привода динамические ошибки ЛП.

На рисунке 4.11 показаны графики заданного положения, скорости и их ошибок для линейного привода, замкнутого по оцениваемым координатам при действии осевого усилия 10 Н.

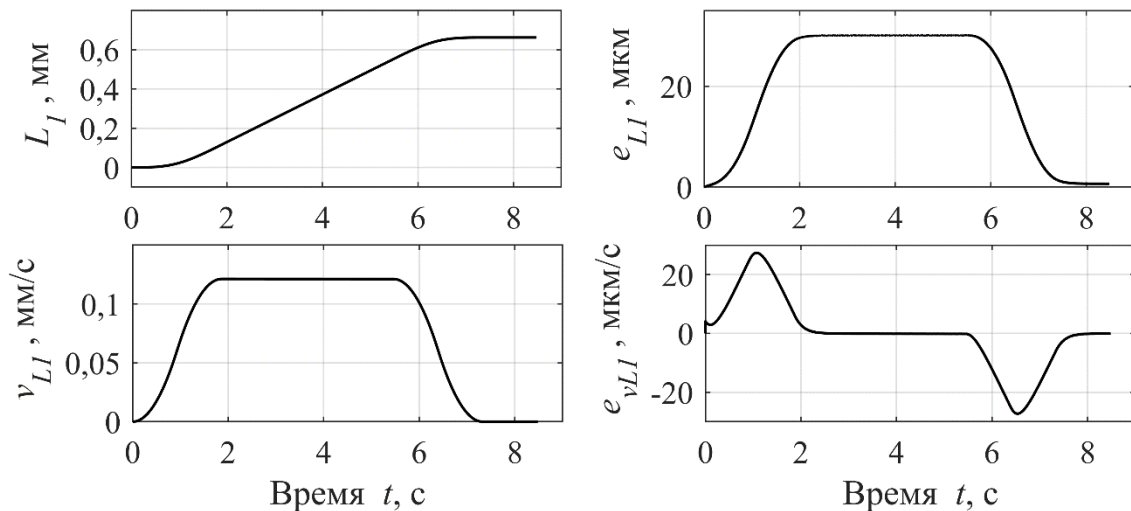


Рисунок 4.11 — Заданное положение, скорость штока ЛП и их ошибки

Относительная динамическая ошибка по положению не превышает 5%, по скорости — 20%. Статические ошибки стремятся к нулю.

На рисунке 4.12 показаны графики изменения переменных состояния i_d , i_q , ω и θ , а также соответствующих ошибок оценок РФК.

Небольшая ошибка i_d объясняется нелинейными свойствами системы и двигателя, а также соответствующей работой регулятора в данном контуре тока. В то же время, расширенный фильтр Калмана достаточно точно оценивает переменные состояния i_q , ω и θ , которые определяют качественные показатели работы линейного привода.

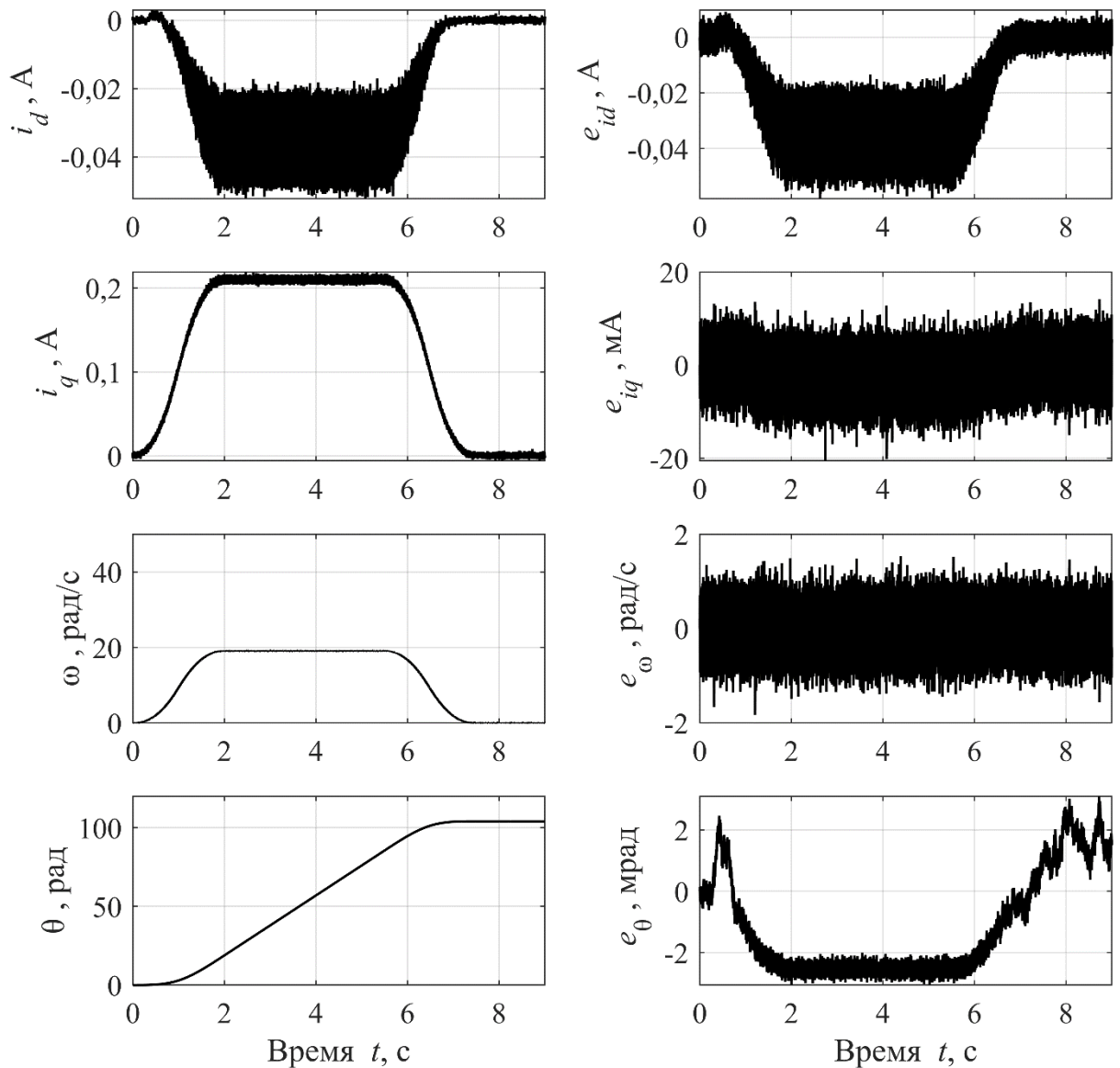


Рисунок 4.12 — Изменение переменных состояния
и соответствующих ошибок оценки

Оценка осевого усилия

Как было указано в подразделе 3.6, с помощью наблюдателя состояния можно оценить суммарный момент нагрузки на валу шагового двигателя $T_L = T_{LD} + T_D + T_{Fr}$, где T_{LD} — момент нагрузки, T_D — фиксирующий момент двигателя, T_{Fr} — момент трения за исключением составляющей вязкого трения $K_{Fr}\omega$, учитываемой в модели двигателя отдельно.

При движении вала ШД переменные состояния i_d, i_q и ω , моменты T_D, T_{Fr} , а также момент вязкого трения динамически меняются. В то же время в

статическом режиме, когда привод остановлен и работает в режиме поддержания заданного положения, будет справедливо выражение $T_L \approx T_{LD}$.

Тогда усилие нагрузки можно оценить как $\hat{F}_H = \hat{T}_{LD} \frac{k_p}{k_{ШВП}} \approx \hat{T}_L \frac{k_p}{k_{ШВП}}$.

Выполним такую оценку при работе ЛП в режиме $\theta_3 = 0$ и выбранном векторе $\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ \omega \ \theta \ T_L]^T$. На рисунке 4.13 показаны графики ω , θ , $e_{\hat{\theta}}$ и $\hat{F}_H$ при действующем усилии нагрузки $F_H = 20$ Н. Относительная ошибка оценки F_H в установившемся режиме не превышает 15%.

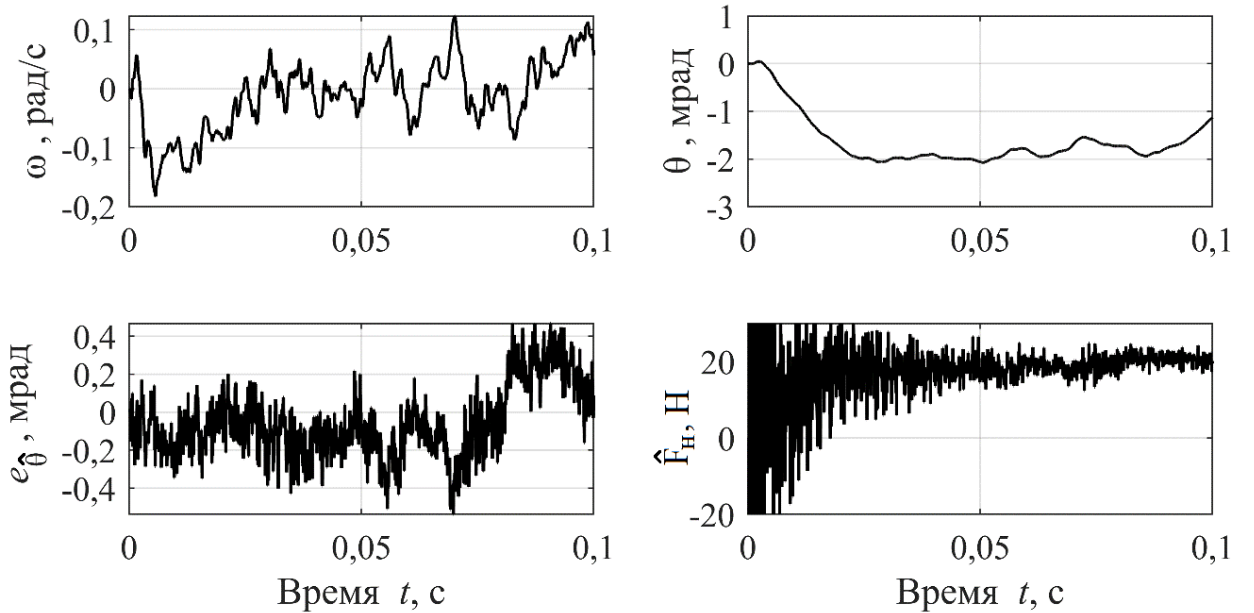


Рисунок 4.13 — Графики ω , θ , $e_{\hat{\theta}}$ и $\hat{F}_H$ при действующей $F_H = 20$ Н.

4.4 Моделирование динамики гексапода

Для анализа качества разработанной системы управления гексаподом в пространстве обобщенных координат ЛП, приведенной на рисунке 3.6, была использована имитационная модель механизма с параллельной структурой для среды MATLAB® Simulink®, представленная на рисунке 4.14.

На вход системы поступает программно заданная траектория в обобщенных координатах $\langle \mathbf{L}_3(T), \dots, \mathbf{L}_3(nT) \rangle$, вычисленная по набору декартовых координат $\langle \mathbf{q}_3(T), \dots, \mathbf{q}_3(nT) \rangle$ согласно ограничениям $\bar{\mathbf{q}}_3, \dot{\bar{\mathbf{q}}}_3, \ddot{\bar{\mathbf{q}}}_3, \ddot{\bar{\mathbf{q}}}_3$.

(см. подраздел 3.3). С выхода снимается фактическое положение платформы в декартовых координатах и углах Эйлера $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \varphi, \xi, \psi]^T$.

Модель линейного привода (блоки LD1-LD6) приведена на рисунке 4.1, описание модели динамики гексапода с объектом управления (блок *Hexapod*) представлено в [10]. Моделируется управление гексаподом в условиях отсутствия гравитации. Для алгоритма управления задано значение периода квантования $T = 0,001\text{с}$.

Параметры механики гексапода определены следующим образом: задана масса платформы с инерционной нагрузкой 100 кг, а осевые моменты инерции составляют $J_{xx} = 4900 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{yy} = 4900 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{zz} = 6300 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

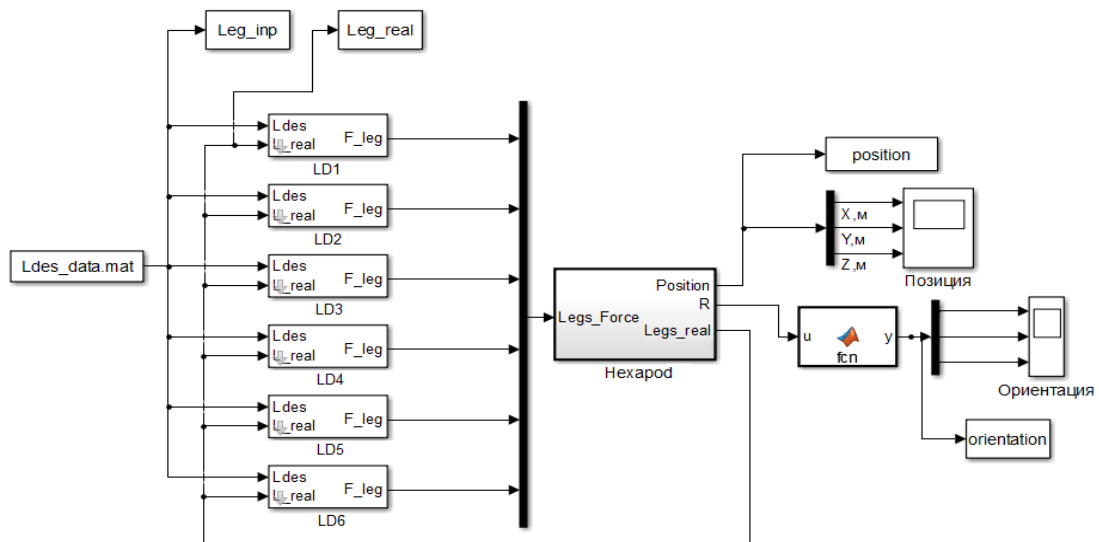


Рисунок 4.14 — Блок-схема модели гексапода в среде Simulink®

Траектория, для которой выполнялось моделирование динамики гексапода с системой управления в пространстве обобщенных координат линейных приводов, сформирована согласно алгоритму планирования, приведенному в подразделе 3.3.

При планировании траекторий заданы ограничения, указанные в таблице 4.2 (см. обозначения на рисунке 3.1). Для линейных координат X , Y и Z размерность величины $\bar{x}$ составляет метры, для угловых φ , ξ , ψ — радианы. Производные величины $\bar{v}$, $\bar{a}$, $\bar{j}$ имеют соответствующие размерности.

Таблица 4.2 — Ограничения при планировании траекторий

Координата(-ы)	$\bar{x}$	$\bar{v}$	$\bar{a}$	$\bar{j}$
$\varphi, X + \varphi$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$
X, ψ	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Z	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$

На рисунках 4.15–4.19 показаны ошибки координат платформы $\mathbf{q}$ и обобщенных координат ЛП $\mathbf{L}$ для различных заданных траекторий $\mathbf{q}_3$.

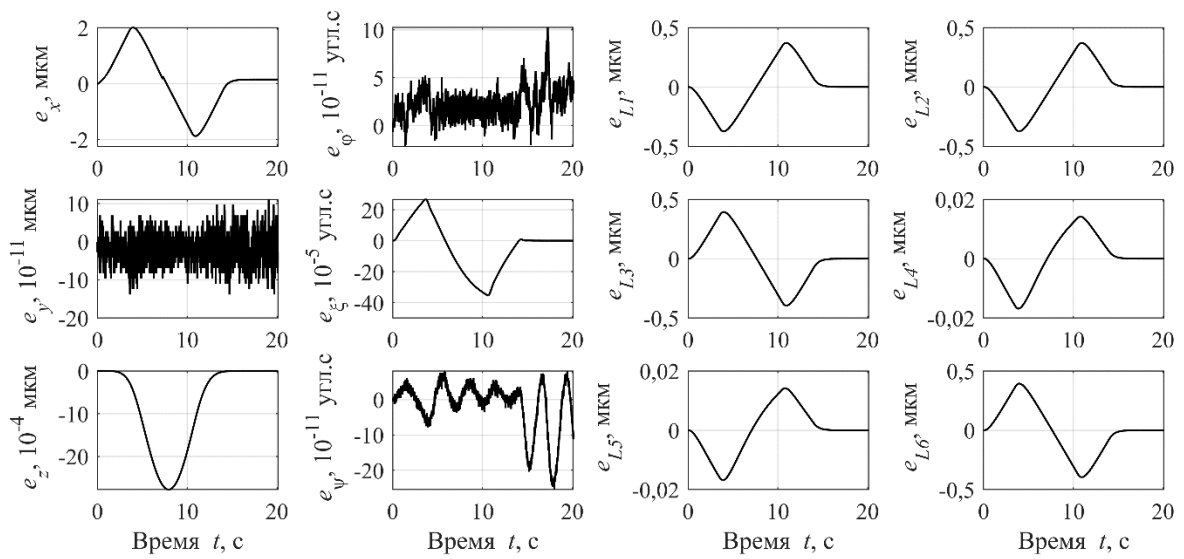


Рисунок 4.15 — Ошибки координат платформы и ЛП при движении по X

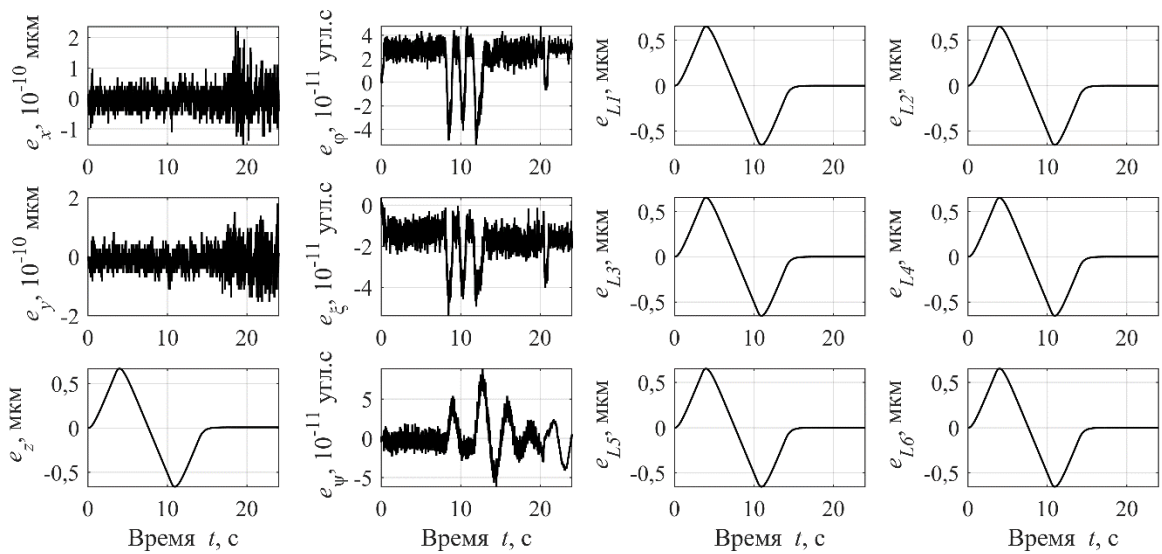


Рисунок 4.16 — Ошибки координат платформы и ЛП при движении по Z

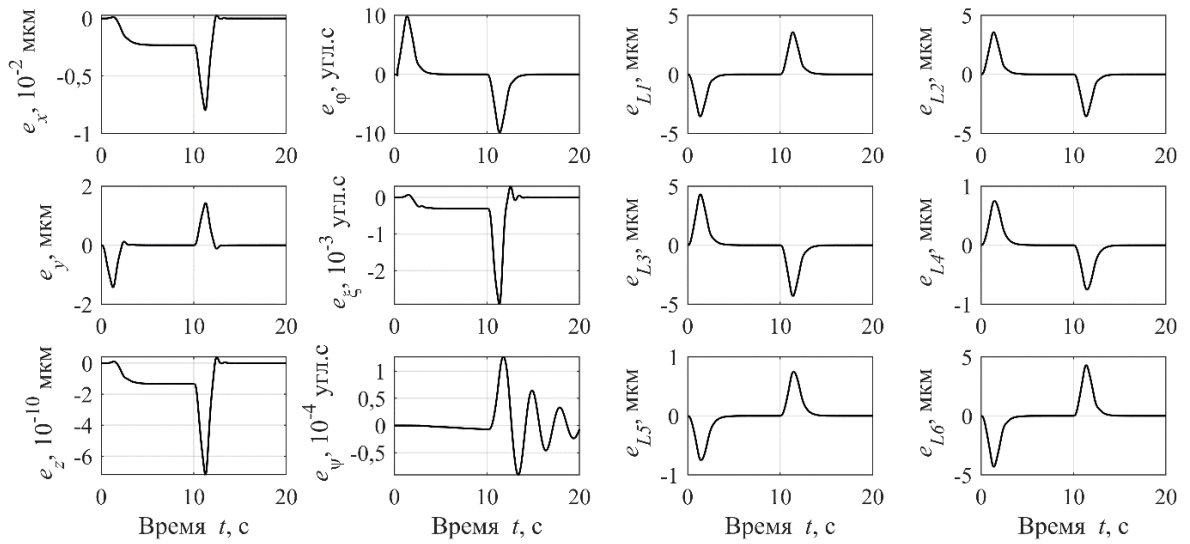


Рисунок 4.17 — Ошибки координат платформы и ЛП при движении по ϕ

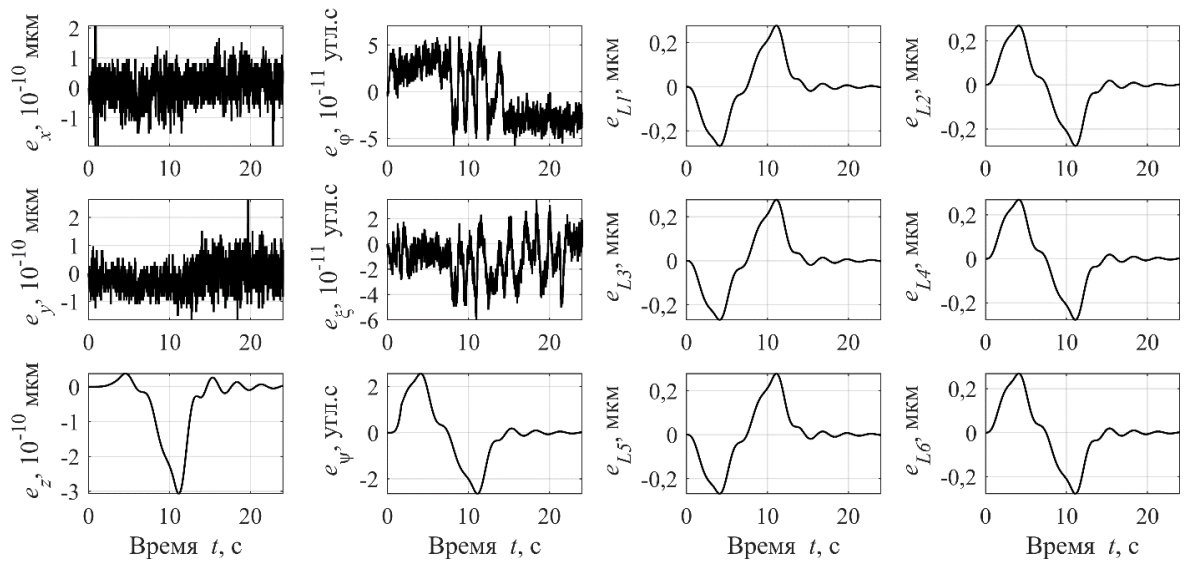


Рисунок 4.18 — Ошибки координат платформы и ЛП при движении по ψ

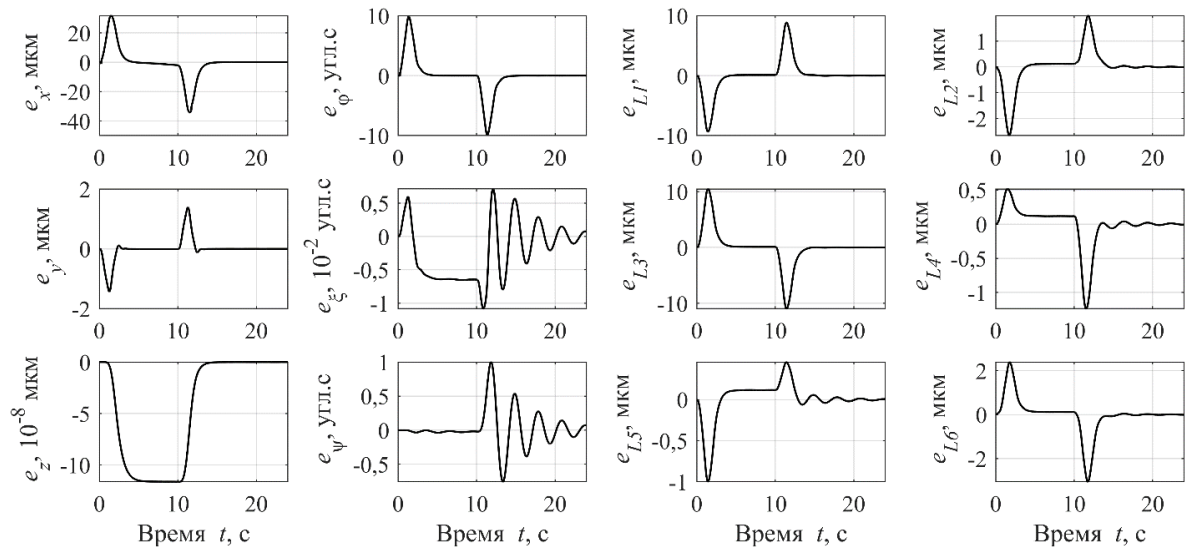


Рисунок 4.19 — Ошибки координат платформы и ЛП при движении по X и ϕ

Для четырех опытов (рисунки 4.15–4.18) перемещение платформы спланировано только по одной координате (X , Z , φ или ψ). Для пятого опыта (рисунок 4.19) перемещение выполнялось одновременно по координатам X и φ . Заданные перемещения по остальным координатам вектора $\mathbf{q}_3$ во всех представленных опытах нулевые.

Из рисунков видно, что предложенная система управления гексаподом в пространстве обобщенных координат линейных приводов обеспечивает высокое качество работы механизма с малыми значениями статических и динамических ошибок по всем координатам подвижной платформы.

Заметим, что приведенные графики переходных процессов получены для относительно высоких скоростей движения линейных приводов. Из рисунка 4.16 видно, что с ужесточением ограничений $\bar{\mathbf{q}}_3, \dot{\bar{\mathbf{q}}}_3, \ddot{\bar{\mathbf{q}}}_3$ ошибки воспроизведения траектории значительно уменьшаются.

4.5 Разработка системы прецизионного управления приводом

Функциональная схема системы, реализующей разработанный алгоритм прецизионного управления линейным приводом механизма с параллельной структурой, показана на рисунке 4.20.

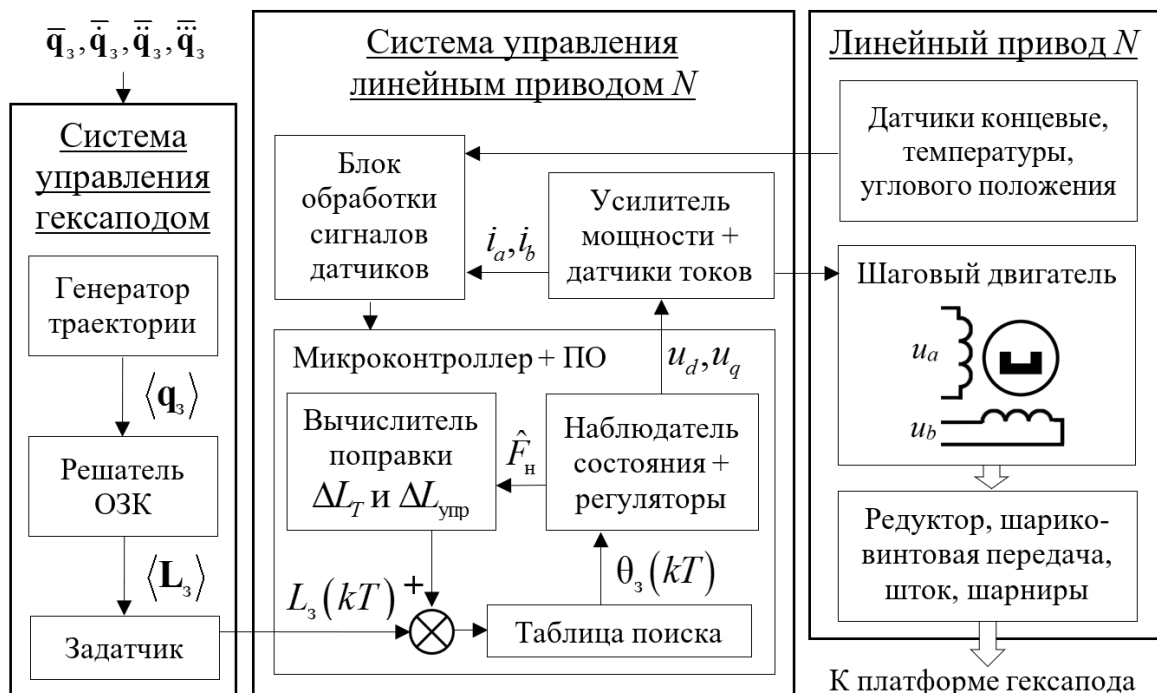


Рисунок 4.20 — Функциональная схема системы прецизионного управления

В системе управления гексаподом реализуется генератор траектории $\langle \mathbf{q}_3 \rangle$, решатель обратной задачи кинематики, формирующий набор $\langle \mathbf{L}_3 \rangle$, а также задатчик сигналов, передающий каждой системе управления линейным приводом ($N = 1, 6$) с периодом T задающие воздействия $L_3(kT)$.

СУЛП включает электронный модуль с микроконтроллером, усилителем мощности, датчиками токов и блоком обработки сигналов датчиков, а также специализированное программное обеспечение (ПО), реализующее алгоритм, описанный в подразделе 3.7.

Линейный привод содержит исполнительный шаговый двигатель, механическую передачу, включающую редуктор, ШВП, подвижный шток, шарниры, а также датчики углового положения, концевые и температуры.

На рисунке 4.21 показан экспериментальный образец гексапода, разработанный БГТУ «ВОЕНМЕХ» им Д. Ф. Устинова и АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнёва» в рамках совместной НИОКТР.

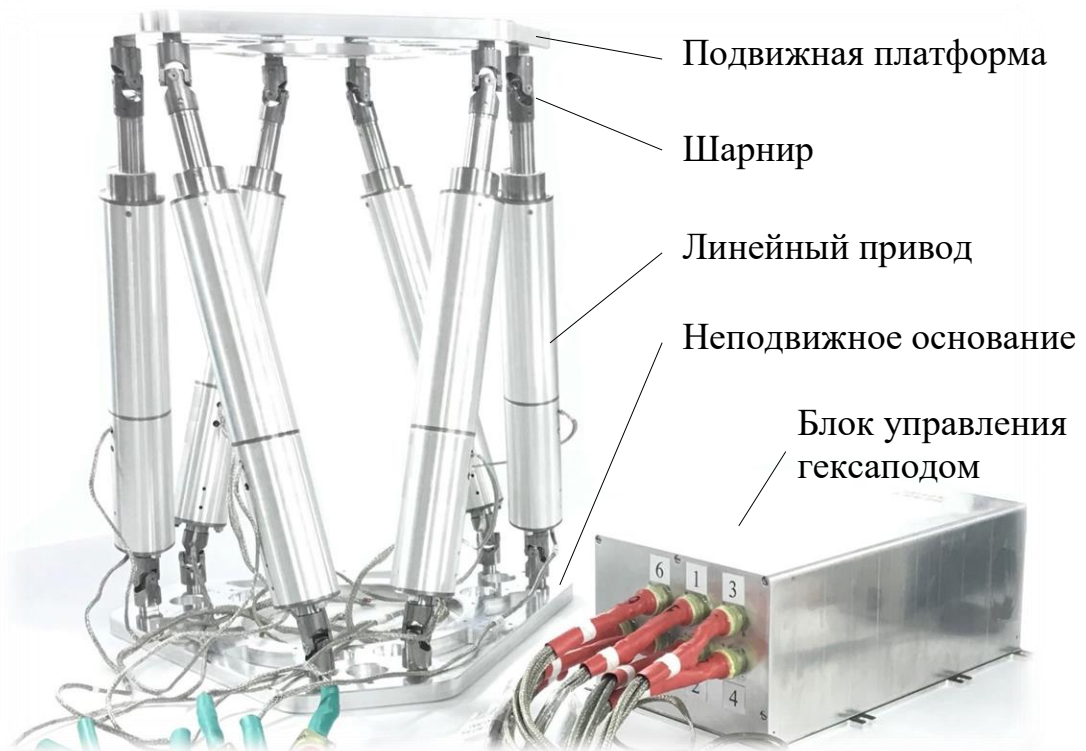


Рисунок 4.21 — Экспериментальный образец гексапода

Структурная схема гексапода показана на рисунке 4.22, где: СУЛП — система управления линейным приводом; ЛП — линейный привод.

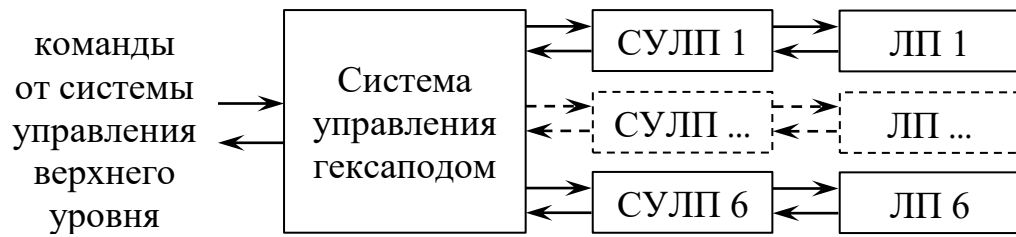


Рисунок 4.22 — Структурная схема гексапода

На рисунке 4.23 показан экспериментальный образец электронного блока СУГ, разработанный изготовленный под руководством и при личном участии автора диссертации. Конструкция блока управления гексаподом включает в себя модуль контроллера СУГ (1), шесть модулей СУЛП (2), модуль вторичного источника питания (3), модуль системы обеспечения теплового режима (4), а также объединяющую модули кросс-плату (5).

Примененные в СУГ схемотехнические и конструктивные решения обеспечивают работу гексапода в соответствии с показанной на рисунке 4.20 функциональной схемой в широком температурном диапазоне, в условиях космического вакуума и действия ионизирующего излучения [141–145].

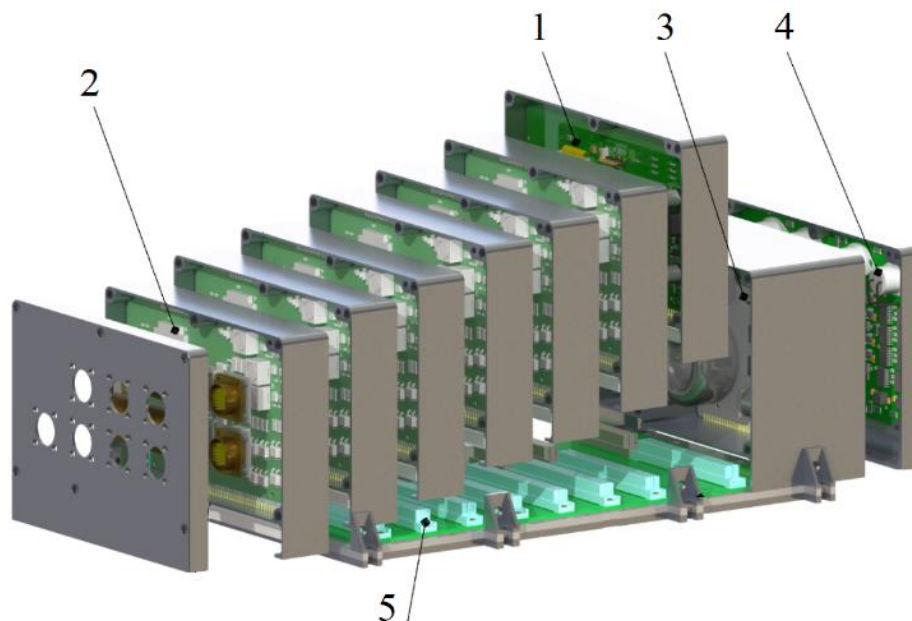


Рисунок 4.23 — Экспериментальный образец электронного блока СУГ

На рисунке 4.24 показан разработанный автором диссертации макет электронного модуля системы управления линейным приводом, соответствующий схеме на рисунке 4.20. Модуль управления линейным приводом (МУЛП) предназначен для проведения экспериментальных исследований точностных параметров ЛП.

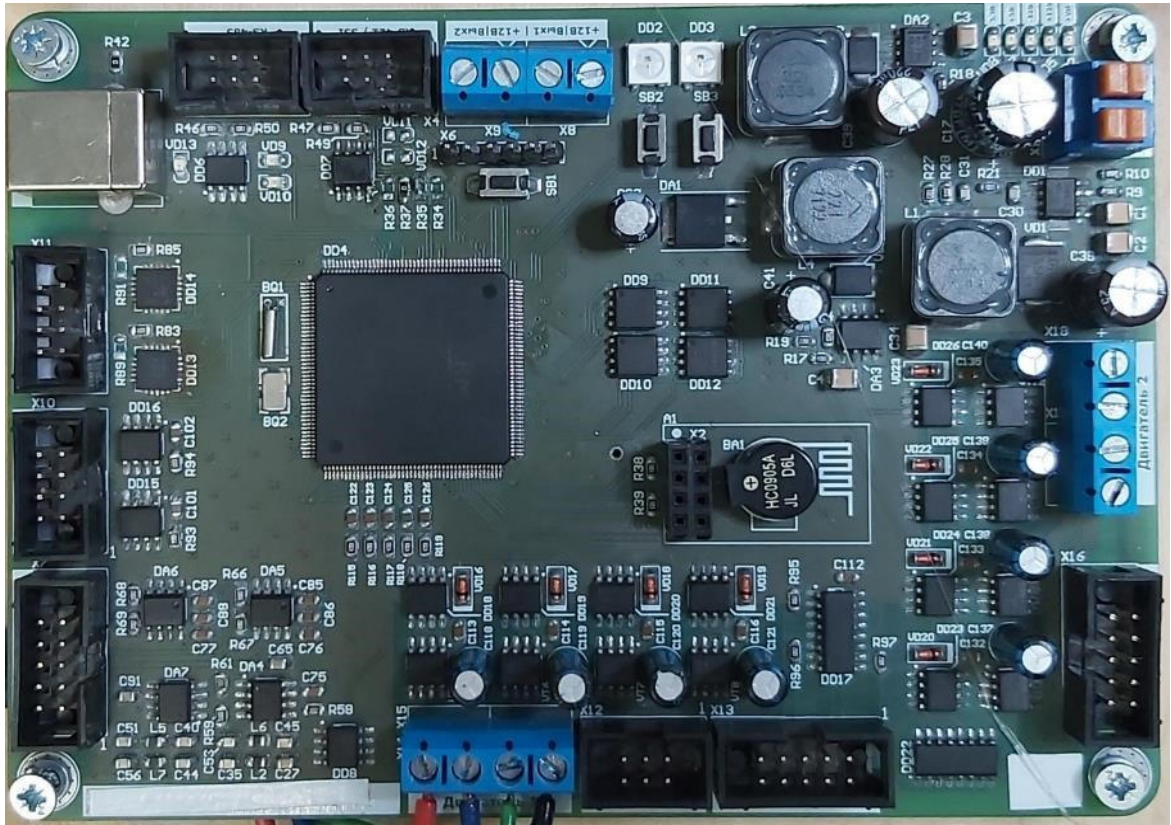


Рисунок 4.24 — Макет электронного модуля
системы прецизионного управления линейным приводом

МУЛП содержит: 32-разрядный микроконтроллер с ядром Cortex-M4F, в котором хранится таблица поиска, реализуется вычисление поправок в соответствии с алгоритмом прецизионного управления, реализуется наблюдатель состояния; усилитель мощности с датчиками тока; блок обработки сигналов датчиков ЛП.

Дополнительно МУЛП включает блок обработки сигналов линейного датчика перемещения для измерения систематической ошибки механической передачи в процессе калибровки ЛП.

Вычислительные мощности указанного микроконтроллера включают аппаратный блок вычисления чисел с плавающей запятой, а также цифровой сигнальный сопроцессор. При этом на практике вычисление одного цикла работы наблюдателя состояния составляет не более 20 мкс, что с большим запасом обеспечивает устойчивую работу РФК (на частоте не менее 10 кГц).

Кроме того, микроконтроллер имеет в своем составе аналого-цифровые преобразователи для обработки сигналов датчиков, блоки таймеров для генерации высокочастотных ШИМ-сигналов, а также необходимый объем памяти типа ПЗУ для хранения таблицы поиска.

Макет модуля управления линейным приводом (МУЛП) построен на базе коммерчески доступных ЭРИ, однако летный образец МУЛП комплектуется элементами, имеющими стойкость к факторам космической среды, в том числе отечественным радиационно-стойким микроконтроллером серии 1986VE8х производства АО «ПКК «Миландр» [10, 123].

4.6 Экспериментальные исследования точности линейного привода

4.6.1 Стендовое оборудование

Экспериментальные исследования точности линейного привода были выполнены на базе макета линейного привода, разработанного в опытно-конструкторском бюро БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

Рассматриваемый линейный привод (рисунок 4.25) включает ШД, шарико-винтовую передачу с шагом 4 мм, а также планетарный редуктор с $k_p = 10$. Таким образом, на один полный шаг ШД приходится 2 мкм.

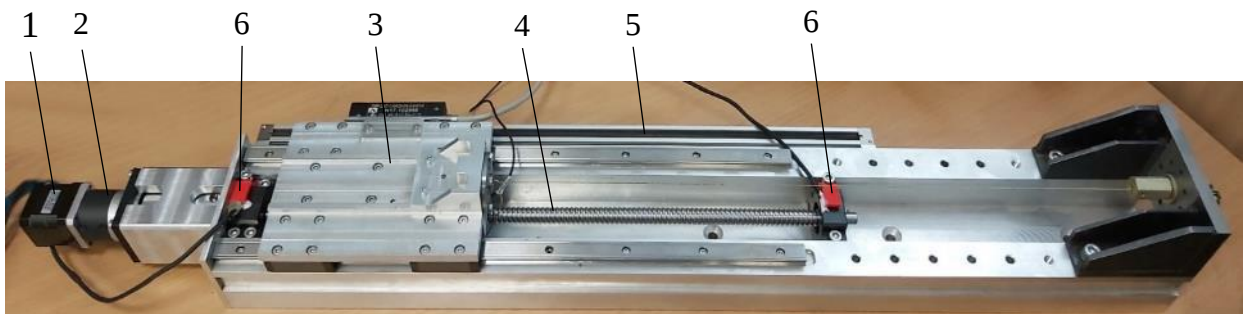


Рисунок 4.25 — Макет линейного привода

На рисунке обозначены: 1 — шаговый двигатель; 2 — планетарный редуктор; 3 — подвижная часть привода, закрепленная на гайке ШВП; 4 — винт ШВП, установленный на двух подшипниковых опорах; 5 — измерительный датчик линейного положения; 6 — датчики температуры.

Шарики-винтовая передача пятого класса точности и максимальной погрешностью типовой длины хода 20 мкм имеет предварительный натяг и обеспечивает минимальный люфт на уровне погрешности повторяемости. Осевая жесткость передачи составляет не менее 190 Н/мкм. Люфт редуктора макета ЛП составляет 15 угл. минут, т.е. около 2,7 мкм в пересчете на линейное положение, поэтому в ходе экспериментов осуществлялась предварительная выборка люфта, а затем уже фиксация положения.

Для контроля ошибок линейного положения штока в исследованиях использовался абсолютный фотоэлектрический датчик линейного положения типа ЛИР-ДА7 с дискретностью измерения 0,1 мкм и величиной абсолютной погрешности до $\pm 0,6$ мкм. Интервал рабочих температур такого датчика составляет $+5...+50$ °С. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности ± 3 мкм на длине 1 метр, т.е. $\pm 0,6$ мкм на длине 200 мм. Указанный датчик для проведения исследований подключается к предусмотренному в МУЛП (рисунок 4.24) интерфейсу сбора данных [146].

Во время испытаний устанавливались стабильные температурные условия макета линейного привода, и с помощью двух датчиков температуры, показанных на рисунке 4.25, контролировался равномерный нагрев ЛП.

Фиксация результатов измерений проводилась в статическом режиме после завершения переходных процессов в электромеханической системе ЛП (0,2 с). В качестве датчиков температуры использованы платиновые датчики типа HRTS. Относительная погрешность измерения температуры такого датчика совместно с системой измерений сигналов составляет не более 1%.

Для проведения исследований точности автором диссертации в среде MATLAB® было разработано прикладное программное обеспечение [147], интерфейс которого показан на рисунке 4.26.

Программное обеспечение позволяет подключаться к макету модуля управления, задавать режимы работы, линейное положение для отработки приводом, а также получать информацию с датчиков температуры и линейного положения для калибровки; сохранять и загружать калибровочные значения в МУЛП; настраивать коэффициент температурного расширения; проводить исследования в режиме прецизионного управления с учетом

температурной поправки и компенсации ошибки механической передачи. С учетом собственных шумов датчика линейного положения, необходимо выполнять фильтрацию первичных данных для формирования поправок в виде таблицы поиска. Для этого в ПО предусмотрены измерение линейного положения с шагом номинального перемещения 10 мкм и предварительная обработка в виде фильтра скользящего среднего с размером окна 20.

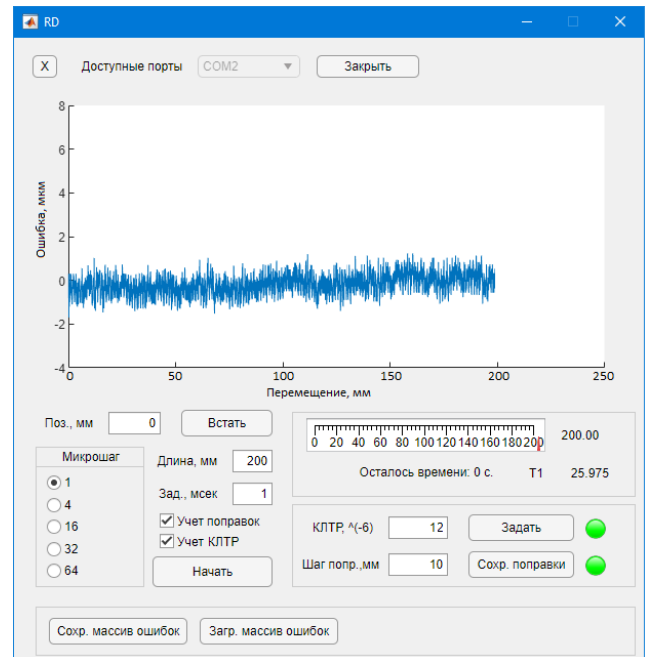


Рисунок 4.26 — Интерфейс ПО для проведения точностных испытаний

4.6.2 Методика точностных исследований

Методика исследований точности макета линейного привода была подготовлена в соответствии с ГОСТ 27843-2006 [153].

В терминах данного стандарта линейный ход оси ЛП составляет 250 мм, измерительный ход, т.е. часть хода оси, используемая для сбора данных и выбранная так, чтобы к первой и последней заданным позициям можно было приближаться с двух направлений, составляет 200 мм.

В ходе точностных испытаний выполнялись измерения линейного положения подвижной части привода, закрепленной на ходовой гайке ШВП, в зависимости от заданного углового положения винта передачи.

Измерения проводятся в двустороннем режиме, при котором подход к заданной позиции осуществляется в обоих направлениях вдоль линейной оси.

Однако, в связи с тем, что в макете ЛП используется планетарный редуктор с существенным значением люфта 15 угловых минут (в отличие от лётного образца гексапода, в котором применяется волновой редуктор с люфтом не более 1 угловой минуты), перед изменением направления движения гайки ШВП осуществлялась выборка люфта редуктора.

Параметры, характеризующие точность привода без коррекции и с коррекцией, рассчитывались для $m = 5$ точек ($i = 1, m$) при $n = 5$ подходах ($j = 1, 5$) в каждом из двух направлений ($\uparrow \downarrow$) по заданным P_i и измеренным P_{ij} позициям. Расчетные формулы приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 — Расчетные формулы, характеризующие точность привода

Параметр	Выражение
Позиционное отклонение x_{ij} , мкм	$x_{ij} = P_{ij} - P_i$
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i \uparrow, \bar{x}_i \downarrow$, мкм	$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow, \bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow$
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм	$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2}$
Среднеквадратическое отклонение $s_i \uparrow, s_i \downarrow$, мкм	$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2},$ $s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2}$

Параметр	Выражение
Зона нечувствительности на позиции B_i , мкм	$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow$
Средняя зона нечувствительности позиционирования оси $\bar{B}$	$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i$
Зона нечувствительности позиционирования оси B , мкм	$B = \max(B_i)$
Односторонняя повторяемость $R_i \uparrow, R_i \downarrow$, мкм	$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow, R_i \downarrow = 4s_i \downarrow$
Двусторонняя повторяемость на позиции R_i , мкм	$R_i = \max[(2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + B_i); R_i \uparrow; R_i \downarrow]$
Двусторонняя повторяемость позиционирования оси R	$R = \max(R_i)$
Среднее двустороннее позиционное отклонение оси M	$M = \max(\bar{x}_i) - \min(\bar{x}_i)$
Одностороннее систематическое позиционное отклонение оси $E \uparrow, E \downarrow$, мм	$E \uparrow = \max(\bar{x}_i \uparrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow),$ $E \downarrow = \max(\bar{x}_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \downarrow)$
Двустороннее систематическое позиционное отклонение оси E , мм	$E = \max(\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow)$
Точность одностороннего позиционирования оси $A \uparrow, A \downarrow$	$A \uparrow = \max(\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow),$ $A \downarrow = \max(\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow)$
Точность двустороннего позиционирования оси A	$A = \max(\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow) -$ $-\min(\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow)$

Далее приведены полученные экспериментально графики ошибок линейного привода при различных режимах работы.

4.6.3 Исследование точности линейного привода без коррекции

На рисунке 4.27 приведен график ошибки линейного привода в зависимости от заданного перемещения в диапазоне от 0 до 200 мм при температуре линейного привода $T_{\text{ЛП}} = 25,1^\circ\text{C}$.

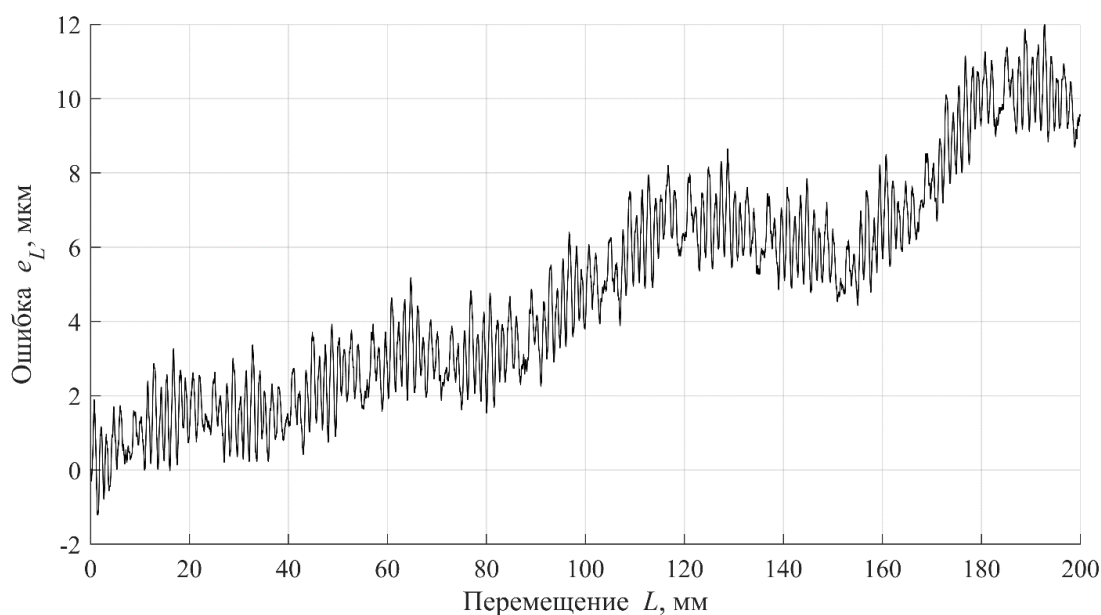


Рисунок 4.27 — Ошибка линейного привода при $T_{\text{ЛП}} = 25,1$ °C.

На рисунке 4.28 показаны графики ошибок при той же температуре для двух проходов (сплошная и пунктирная линии) на интервале 0-5 мм.

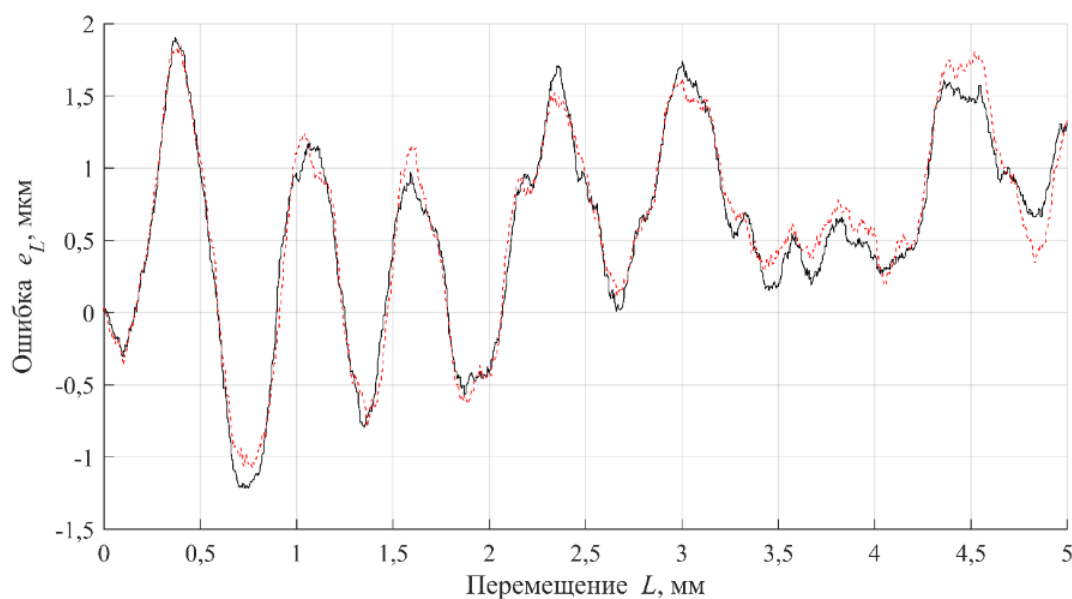


Рисунок 4.28 — Ошибки линейного привода для двух проходов.

На рисунке 4.29 приведены графики ошибок линейного привода в зависимости от заданного перемещения в диапазоне от 0 до 200 мм при различных температурных условиях. Выбранный температурный диапазон ограничен собственной температурной зависимостью погрешности измерения датчика линейного положения в составе стендового оборудования.

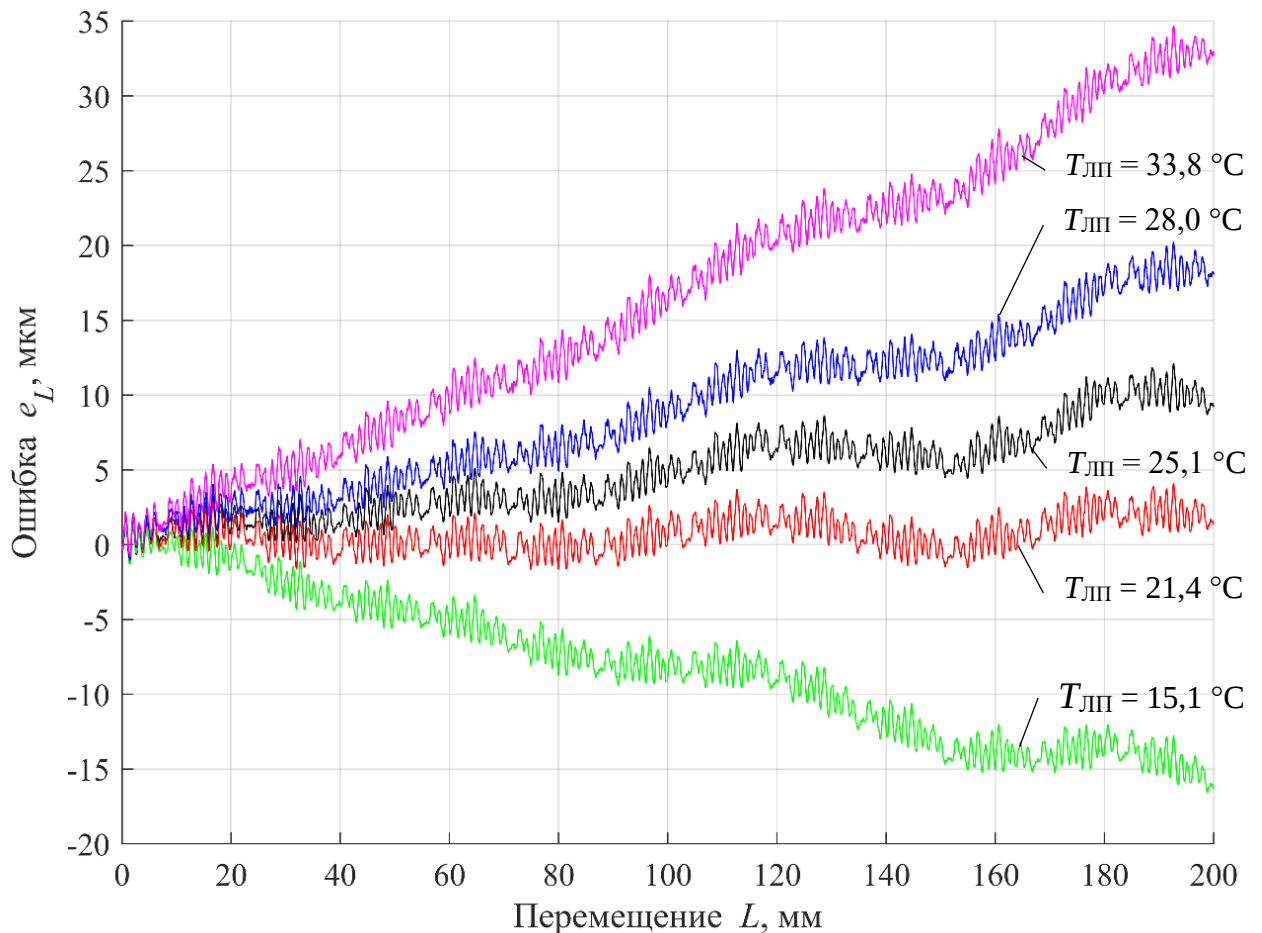


Рисунок 4.29 — Ошибки ЛП при различных температурных условиях

В таблицах А1-А5 приложения А приведены численные характеристики точности линейного привода без калибровки в соответствии с ГОСТ 27843-2006 для различных температурных условий.

4.6.4 Исследование точности позиционирования с коррекцией

Высокая повторяемость погрешности, показанная на рисунке 4.28, наблюдается на всем диапазоне линейного перемещения 0-200 мм.

Согласно изложенному в подразделе 3.6.1 методу, выполнена калибровка ЛП по следующей методике: измерено фактическое линейное положение штока для диапазона 0-200 мм при фиксированном значении температуры $T_{ЛП} = 25,1\text{ °C}$ с дискретностью 10 мкм, вычислены ошибки линейного перемещения, сформирована соответствующая таблица поиска.

На рисунке 4.30 приведен график ошибки линейного привода при $T_{\text{ЛП}} = 25,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ с учетом поправочных значений, полученных по характеристике, показанной на рисунке 4.27. Как видно из графика, максимальное значение ошибки не превышает $\pm 1,2\text{ мкм}$.

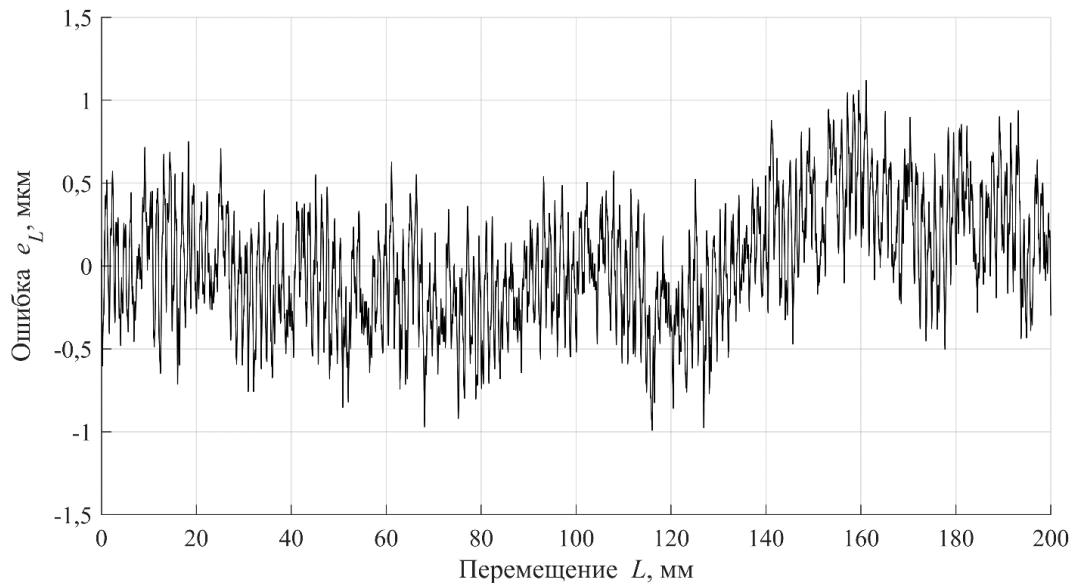


Рисунок 4.30 — Ошибка линейного привода
с учетом поправочных значений при $T_{\text{ЛП}} = 25,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 4.31 приведены графики ошибок линейного положения штока для различных температурных условий с учетом поправочных значений, полученных по характеристике на рисунке 4.27, и с компенсацией линейного температурного расширения. В таблицах А6-А10 приведены численные характеристики точности ЛП с компенсацией систематической погрешности механической передачи и температурных деформаций.

Как видно из экспериментальных данных, максимальное значение ошибки находится в пределах $\pm 2,5\text{ мкм}$. Такое значение ошибки связано с точностью измерения температуры для вычисления компенсации температурного расширения. Также для повышения точности при калибровке необходимо применение прецизионных измерительных устройств типа интерферометрической системы *Renishaw XL-80*, минимизирующих влияние собственной температурной зависимости калибровочного датчика.

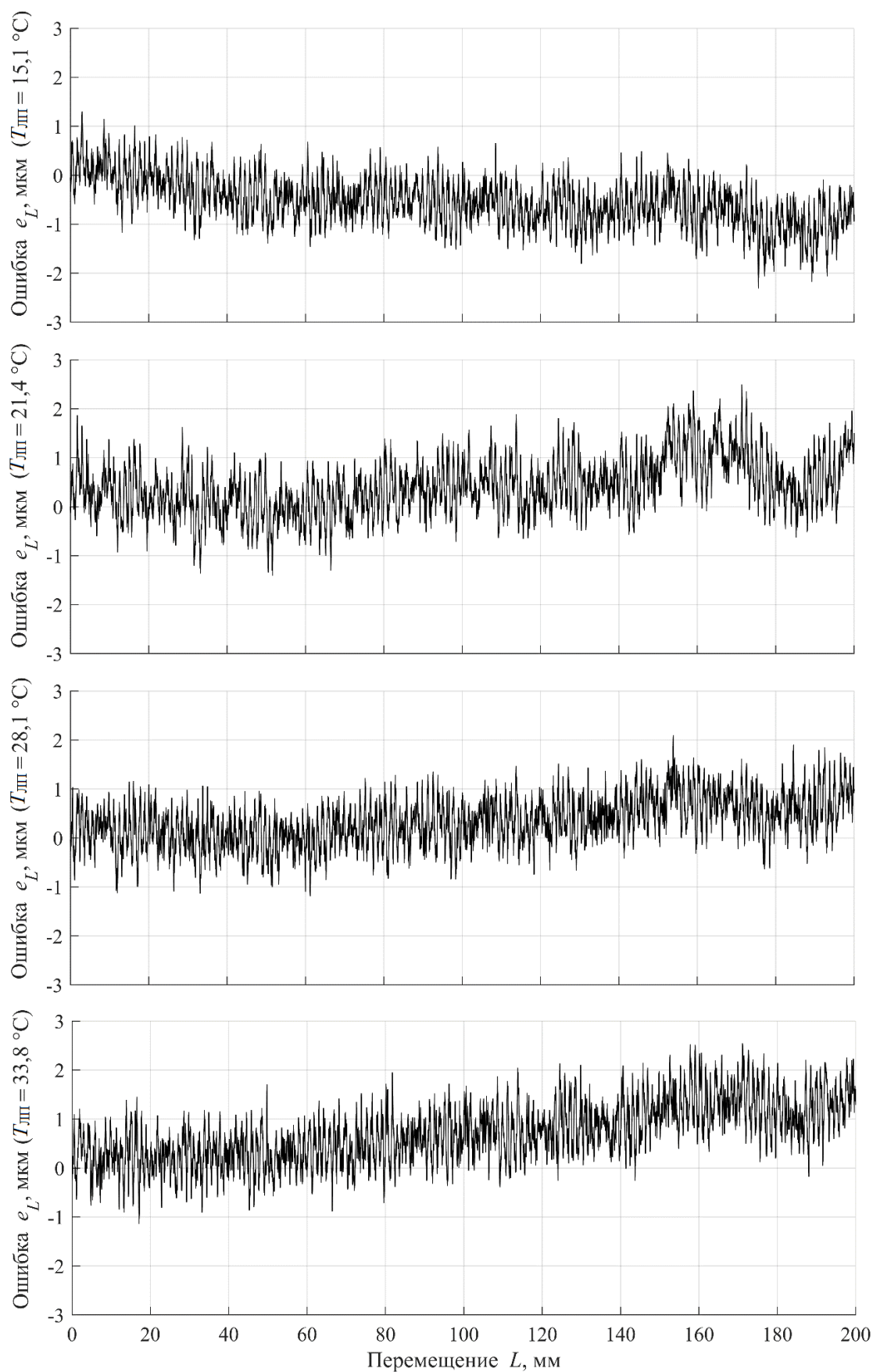


Рисунок 4.31 — Ошибки линейного привода с коррекцией
для различных температурных условий

4.7 Выводы по разделу

1. Использование прецизионного следящего линейного привода в механизмах с параллельной структурой позволяет существенно улучшить статические и динамические характеристики многостепенного мехатронного устройства типа «гексапод» космического применения.

2. Результаты имитационного компьютерного моделирования показывают, что система управления линейным приводом на основе наблюдателя состояния устойчива, а регуляторы обеспечивают работу ЛП в следящем режиме с малыми статическими и динамическими ошибками.

3. Предложенный метод управления гексаподом в пространстве обобщенных координат линейных приводов прост в практической реализации и обеспечивает выполнение требований к статической и динамической точности гексапода, а также ограничению динамических возмущений на объект управления и несущую платформу космического аппарата за счет применения разработанного алгоритма планирования траектории в координатах подвижной платформы МПС.

4. Разработанная система управления линейным приводом, макет электронного модуля СУЛП, а также программное обеспечение стендового оборудования для испытаний макета линейного привода позволяют выполнять калибровку ЛП, а также экспериментально исследовать предложенные методы прецизионного управления.

5. Полученные экспериментальные данные и результаты имитационного моделирования подтверждают работоспособность предложенных методов компенсации систематической ошибки механической передачи, а также температурных и упругих механических деформаций линейного привода. Применяя данные методы, удастся существенно снизить погрешность работы линейного привода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследована проблема прецизионного управления линейными приводами механизма с параллельной структурой космического применения типа «гексапод». Описаны возможные варианты, а также технические проблемы реализации системы измерения линейного положения на основе доступных на рынке 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 ЛП и работу привода в следящем режиме с высокими 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. Разработана математическая модель линейного привода, позволяющая исследовать разработанные методы управления. Выполнено имитационное компьютерное моделирование, подтверждающее целесообразность использования системы управления в пространстве обобщенных координат.

Рассмотрены источники погрешности работы линейного привода, среди которых выделены наиболее существенные: 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. Разработаны методы повышения точности ЛП, компенсирующие

влияние указанных источников ошибок. Разработан алгоритм калибровки и прецизионного управления линейным приводом.

Разработан и изготовлен исследовательский программно-аппаратный комплекс, включающий макет модуля управления линейным приводом, а также специальное программное обеспечение для выполнения калибровки линейного привода и проведения экспериментальных исследований. Результаты выполненных экспериментальных исследований привода подтверждают эффективность предложенных методов повышения точности.

Перспективными являются задачи экспериментального исследования точности привода при работе в широком диапазоне температур и неоднородных тепловых полях, а также при различных осевых нагрузках.

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. Предложенные методы актуальны для измерительных устройств и датчиков различного назначения, поскольку при работе в широком диапазоне температур без применения специальных мер их точность будет невысока.

Разработанный привод с наблюдателем состояния может быть использован не только в экстремальных условиях космоса. Насущными являются вопросы бездатчикового управления и для атомной техники, подвергающейся ионизирующему излучению, для нефтегазовой и химической техники, к которой предъявляются требования взрывобезопасности, а также для систем, работающих в условиях сильных электромагнитных полей и т.п.

Таким образом, проведенные исследования и достигнутые результаты являются актуальными для космической техники, станкостроения, медицинской техники, атомной промышленности и других областей. Разработанные методы позволяют повысить точность и надежность работы, уменьшить себестоимость исполнительных робототехнических систем.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДПТ	—	двигатель постоянного тока
ДНП	—	датчик нулевого положения
ДУП	—	датчик углового положения
ИНС	—	искусственная нейронная сеть
КА	—	космический аппарат
КД	—	конструкторская документация
КЛТР	—	коэффициент линейного теплового расширения
КПД	—	коэффициент полезного действия
ЛАФЧХ	—	логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика
ЛП	—	линейный привод
МПС	—	механизм с параллельной структурой
МУЛП	—	модуль управления линейным приводом
НИОКТР	—	здесь: научно-исследовательская, опытно-конструкторская и технологическая работа «Организация импортозамещающего производства прецизионных мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения бортовой аппаратуры космической и авиационной техники», выполненная ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова совместно с Индустриальным партнером АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор от 01.12.2015 № 02.G25.31.0160)
ОЗД	—	обратная задача динамики
ОЗК	—	обратная задача кинематики
ОС	—	обратная связь
ПД	—	пропорционально-дифференциальный [регулятор]
ПЗК	—	прямая задача кинематики

ПЗУ	—	постоянно запоминающее устройство
ПИ	—	пропорционально-интегральный [регулятор]
ПО	—	программное обеспечение
ПФ	—	передаточная функция
РВП	—	роликовинтовая передача
РФК	—	расширенный фильтр Калмана
САПР	—	система автоматизированного проектирования
СДПМ	—	синхронный двигатель с постоянными магнитами
СКО	—	среднеквадратическое отклонение
СУЛП	—	система управления линейным приводом
СУЭ	—	система управления электродвигателем
ЧПУ	—	числовое программное управление
ШВП	—	шариковинтовая передача
ШИМ	—	широтно-импульсная модуляция
ШД	—	шаговый двигатель
ЭВМ	—	электронно-вычислительная машина
ЭВТИ	—	экранны-вакуумная теплоизоляция
ЭДС	—	электродвижущая сила
ЭРИ	—	электрорадиоизделия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тестоедов Н.А. Сибирский центр российского спутникостроения // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2012. №2. С. 126-139.
2. Космическая обсерватория «Миллиметрон» [Электронный ресурс]. URL: <http://millimetron.ru/ru/> (дата обращения: 17.07.2020).
3. Lightsey P., Atkinson Ch., Clampin M., Feinberg L. James Webb Space Telescope: Large deployable cryogenic telescope in space. // Optical Engineering. 2012. Vol. 51 (1). P. 011003.
4. Артеменко Ю.Н., Белоножко П.П., Карпенко А.П., Саяпин С.Н., Фоков А.А. Использование механизмов параллельной структуры для взаимного позиционирования полезной нагрузки и космического аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1 (1). С. 65-71.
5. Дорофеева Е.С., Мирзаев Р.А., Смирнов Н.А. Механизмы ориентации антенн космических аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. №10. С. 83-84.
6. Юсов А.В., Архипов М.Ю., Козлов С.А., Устинова Е.А., Васильченко Д.В. Криовакуумный гексапод с субмикронным приводом для температур 4,2 °К // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. № 21. С. 189-190.
7. 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. Научный редактор А.Т. Барабанов. 2017. С. 87-91.
8. Gough V. E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance // Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng. 1956—1957. P. 392-394.
9. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proceedings of the Institution of mechanical engineers. 1965. Vol. 180. No. 15. P. 371-385.
10. 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 радиационно стойком ARM-микроконтроллере // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 103-110.

11. 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.

12. P. Dietmaier. The Stewart-Gough Platform of General Geometry can have 40 Real Postures. // Journal of Mechan. Design. 1998. Vol. 115. No. 2. P. 277-282.

13. Hybrid hexapods and parallel kinematics motion systems [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alioindustries.com/products-systems/hybrid-hexapods-parallel-kinematic-motion-systems> (дата обращения: 17.07.2020).

14. Механизмы перспективных робототехнических систем: Монография / Под ред. В. А. Глазунова, С. В. Хейло. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 296 с.

15. Hexapods [Электронный ресурс]. URL: <http://mikrolar.com/rp2000.html> (дата обращения: 17.07.2020).

16. Шестиосевые координатно-измерительные машины [Электронный ресурс]. URL: <http://lapic.ru/catalog> (дата обращения: 17.07.2020).

17. TwinCAT CNC software controls 6-axis parallel kinematics with absolute precision [Электронный ресурс]. URL: https://www.pc-control.net/pdf/032017/solutions/pcc_0317_boeckstiegel-automation_e.pdf (дата обращения: 17.07.2020).

18. Positioning hexapods [Электронный ресурс]. URL: <https://symetrie.fr/en/hexapods-en/positioning-hexapods/> (дата обращения: 17.07.2020).

19. 6-Axis Robotics, Hexapods [Электронный ресурс]. URL: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/productfinder/6-axis-robotics-hexapods/#productfilter-area/> (дата обращения: 17.07.2020).

20. Продукция ООО «Прикладная механика» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.amech.ru/> (дата обращения: 17.07.2020).

21. Рыбак Л.А., Синев А.В., Пашков А.И. Синтез активных систем виброизоляции на космических объектах / М.: Янус-К, 1997. — 160 с.
22. 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.
23. 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 // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. № 21. С. 117-118.
24. Артеменко Ю. Н. Многофункциональное использование манипулятора наведения космического телескопа «Миллиметр» // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-2. С. 44-46.
25. A Researcher's Guide to International Space Station: Space Environmental Effects [Электронный ресурс]. URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-015-JSC_Space_Environment-ISS-Mini-Book-2015-508.pdf (дата обращения: 17.07.2020).
26. 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» им. Д.Ф. Устинова, 2016-2018 гг.
27. Коротков Е. Б., Матвеев С. А., Слободзян Н. С., Слободзян А. Е. Система управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения // В книге: Сист. анализ, управление и навигация 2018. С. 89-91.
28. Zhukov Y., Korotkov E., Slobodzyan N., Kireev O.L. High accuracy control system of mechanism with parallel kinematic // Известия Кыргызского гос. техн. университета им. И.Раззакова. 2017. № 4 (44). С. 448-454.

29. Андриевский Б. Р., Арсеньев Д. Г., Зегжда С. А. и др. Динамика платформы Стюарта // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 1: математика, механика, астрономия. 2017. № 4 (62). Вып. 3. С. 489-504.

30. Navvabi H., Markazi A. H. D. Position control of Stewart manipulator using a new extended adaptive fuzzy sliding mode controller and observer (E-AFSMCO) // Journal of the Franklin Institute. 2018. Vol. 355. No. 5. P. 2583-2609.

31. Кардашёв Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др. Обзор научных задач для обсерватории «Миллиметрон» // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 12. С. 1319-1352.

32. Дятлов С.А., Бессонов Р.В. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Механика, управление и информатика. 2009. № 1. С. 11-31.

33. Guérard J., Larroque M., Lizin G., Verstraeten L., Delavoipière G. MEMS gyroscope demonstration for space application, using a DPC // 6th International Workshop on Analogue and Mixed-Signal Integrated Circuits for Space Applications. 2016. P.15-21.

34. 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.

35. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Управление высокоточной системой позиционирования и наведения космического применения на базе гексапода с "пространственным датчиком положения" // Экстремальная робототехника. 2017. Т. 1. № 1. С. 256-265.

36. 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.

37. Продукция холдинга «Швабе» [Электронный ресурс]. URL: <https://shvabe.com/products/> (дата обращения: 17.07.2020).

38. Продукция Edmund Optics Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.edmundoptics.com/> (дата обращения: 17.07.2020).
39. Абсолютные энкодеры компании Renishaw [Электронный ресурс]. URL: <https://www.renishaw.ru/ru/symetrie-hexapods-choose-renishaws-advanced-resolute-absolute-encoders--38342> (дата обращения: 17.07.2020).
40. Смирнов Ю.С., Кацай Д.А., Юрасова Е.В., Козина Т. А. Обеспечение радиационной стойкости электромехатронных преобразователей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. №1. С. 79-87.
41. Mekid S., Ogedengbe T. A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines // International Journal of Precision Technology. 2010. Vol. 1. No. 3/4. P. 251-286.
42. Fu, R., Jin, Y., Yang, L., Sun, D., Murphy, A., Higgins, C. Review on structure-based errors of parallel kinematic machines in comparison with traditional NC machines. // Recent advances in intelligent manufacturing: communications in computer and information science. 2018. Vol. 923. P. 249-256.
43. Pandilov Z. Dominant types of errors at parallel kinematics machine tools // FME Transactions. 2017. Vol. 45. No. 4. P. 491-495.
44. Ramesh, R., Mannan, M.A. and Poo, A.N. Error compensation in machine tools - a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture dependent errors // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000. Vol. 40. P. 1235-1256.
45. Weck M. Staimer D. Parallel kinematic machine tools - current state and future potentials // Annals of the CIRP. 2002. Vol. 51. No. 2. P. 671-683.
46. 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.

47. Chanal II., Due E., Ray P., Hascoet, J.Y. A new approach for the geometrical calibration of parallel kinematics machines tools based on the machining of a dedicated part // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. Vol. 47. No. 7-8. P. 1151-1163.

48. Hernández-Martínez E.E., López-Cajún C.S., Jáuregui-Correa J.C. Calibration of parallel manipulators and their application to machine tools. A state of the art survey // Ingeniería, investigación y tecnología. 2010. Vol. 11. No. 2. P. 141-154.

49. Ibaraki S., Yokawa T., Kakino Y., Nakagawa M., Matsushita T. Kinematic calibration on a parallel kinematic machine tool of the Stewart platform by circular tests // Proceedings of the 2004 American Control Conference. 2004. Vol. 2. P. 1394-1399.

50. Bleicher F., Puschitz F., Theiner A. Laser based measurement system for calibrating machine tools in 6 DOF [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/ee47/60e56f8a9c87b68d2be375e7593f483fe671.pdf> (дата обращения: 17.07.2020).

51. Pandilov Z., Dukovski V. Parallel kinematics machine tools: overview-from history to the future // Annals of faculty engineering hunedoara - international journal of engineering. 2012. Vol. 10. P. 111-124.

52. Weck M., Staimer D.: On the accuracy of parallel machine tools: design, compensation and calibration // 2nd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. 2000. P. 73-83.

53. Кольцов А.Г., Хабаров А.В. Компенсация тепловых погрешностей, возникающих при прогреве станка // ОмГТУ. 2016. №1. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompensatsiya-teplovyyh-pogreshnostey-voznikayuschih-pri-progreve-stanka> (дата обращения: 17.07.2020).

54. Kruth J.-P., Vanherck P., Van den Bergh C. Compensation of static and transient thermal errors on CMMs // Annals of CIRP. 2001. Vol. 50. No. 1. P. 377-384

55. Бровкина Юлия Игоревна. Автоматизированная система оценки влияния температурных процессов на точность позиционирования станков с параллельной кинематикой : Дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 Москва, 2006 121 с. РГБ ОД, 61:06-5/1139.

56. 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.

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

58. Cao X., Zhao W., Zhao H., Wang H., Yang W., Zhang B. 6-PSS Precision Positioning Stewart Platform for the Space Telescope Adjustment Mechanism // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2018. P. 487-492.

59. Штых Д.В. Линейные перемещения с микронной и субмикронной точностью // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. 2012. №1-2. С. 649-652.

60. Бардин В.А., Васильев В. А., Чернов П. С. Современное состояние и разработки актюаторов нано- и микроперемещений // Надежность и качество. 2014. № 2. С. 123-127.

61. Шароватов В.Т., Чернусь П.П. Позиционирование пневмопривода по положению // Вестник СевНТУ. 2014. № 153. С. 30-35.

62. Sanguinetti B., Varcoe B.T.H. Use of a piezoelectric SQUIGGLE® motor for positioning at 6K in a cryostat // Cryogenics. 2006. Vol. 46. Iss. 9. P. 694-696.

63. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Карев П.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: Учебное пособие. — СПб: Университет ИТМО, 2017. — 134 с.

64. Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Жарский В.В. Программная компенсация погрешности позиционирования линейного шагового привода // Доклады БГУИР. 2003. №2 (2). С. 89-98.

65. Гулиа Н. В., Клоков В. Г., Юрков С. А. Детали машин: Учебник / Под общ. ред. д. т. н., проф. Н. В. Гулиа. — 3-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2013. — 416 с.

66. Янгулов В.С., Эдличко А.А. Прецизионные винтовые механизмы и передачи для использования в редукторах приводов систем космического применения // Известия ТПУ. 2010. Т. 317. № 2. С. 40-45.

67. Блинов Д.С. Планетарные роликовинтовые механизмы. Конструкции, методы расчетов / Под ред. О. А. Ряховского. — М.: МГТУ, 2006. — 222 с.

68. Блинов Д.С., Морозов М.И. Перспективные конструкции планетарных роликовинтовых механизмов // Известия вузов. Машиностроение. 2013. №3. С. 62-72.

69. Бойко С.О., Комаров С.А., Гурылёв А.Б., Улыбушев Е.А., Леканов А.В. Результаты разработки планетарной роликовинтовой передачи для высокоточных механизмов космического применения // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. № 21. С. 92-93.

70. Хадкевич Т.Г., Токарев А.В., Уланов Р.О. Обзор основных характеристик современных электромеханических приводов для космических аппаратов // Решетневские чтения. 2016. №20. С. 164-166.

71. Ultra-High Precision Positioning Actuators to Align Mirror Segments in the ELT Telescope [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pi-usa.us/en/tech-blog/ultra-high-precision-positioning-actuators-to-align-mirror-segments-in-the-elt-telescope/> (дата обращения: 17.07.2020).

72. Авербух В.Я. Космическая прецизионная электромеханика // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2011. Т. 124. № 5. С. 17-28.

73. Derammelaere S., Haemers M., Viaene J. De, Verbelen F., Stockman K. A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping

motor technologies // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems. 2016. P. 1-5.

74. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: МЭИ, 2010. — 328 с.

75. Oudet J.-F., Pagnon F. High-speed stepper motor for mechanism [Электронный ресурс]. URL: <https://esматы.eu/esматыpapers/pastpapers/pdfs/2003/oudet.pdf> (дата обращения: 17.07.2020).

76. Вихретоковые датчики [Электронный ресурс]. Сайт ЗАО «Сенсор Системс». URL: https://www.eddylab.ru/eddylab-ru/products/wirbelstromsensoren/pdf/eddy_current_probe_ic_ru.pdf (дата обращения: 17.07.2020).

77. Датчики линейных перемещений [Электронный ресурс]. Сайт ЗАО «Сенсор Системс». URL: http://www.sensor-systems.ru/category_11.html (дата обращения: 17.07.2020).

78. Absolute Linear Transducer Type 3711 [Электронный ресурс]. Сайт Zettlex UK Ltd. URL: <https://www.zettlex.com/wp-content/uploads/Linear-Transducer-3711-OEM-Product-Guide.pdf> (дата обращения: 17.07.2020).

79. SMART Position Sensor (магниторезистивный датчик) [Электронный ресурс]. Сайт Honeywell International Inc. URL: <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-smart-position-sensor-35-mm-75-mm-225-mm-linear-configurations-productsheet-000674-6-en.pdf2.pdf> (дата обращения: 17.07.2020).

80. Абсолютный преобразователь линейных перемещений ЛИР-ДА7 [Электронный ресурс]. Сайт ОАО «СКБ ИС». URL: <https://skbis.ru/catalog/linear/sealed/lir-da7> (дата обращения: 17.07.2020).

81. Лазерная интерферометрическая система XL-80 [Электронный ресурс]. Сайт Renishaw plc. URL: <https://www.renishaw.ru/ru/xl-80-laser-system-8268> (дата обращения: 17.07.2020).

82. 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.

83. Tsui K. W. H., Cheung N. C., Yuen K. C. W. Novel modeling and damping technique for hybrid stepper motor // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56. No. 1. P. 202-211.

84. Рожавский Э. И., Моисеев П. П. Прецизионные оптико-механические сканирующие устройства системы дистанционного зондирования МСУ-ГС // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов : сб. докл. сем. ИКИ РАН. М. : ИКИ РАН, 2009. С. 503-509.

85. 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.

86. Точность шарико-винтовой передачи *THK* [Электронный ресурс]. URL: https://tech.thk.com/ru/products/pdf/ru_a15_011.pdf (дата обращения: 17.07.2020).

87. Бойко С. О., Комаров С. А., Харитонов С. Г., Улыбушев Е. А., Леканов А. В. Проектирование высокоточных линейных приводов для шестистепенного механизма типа «Гексапод» космического применения // Сибирский журнал науки и технологий. 2013. № 6 (52). С. 142-149.

88. Волновые редукторы *HarmonicDrive* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.harmonicdrive.net/technology> (дата обращения: 17.07.2020).

89. Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Саламатин Е.В. Проблемы компенсации погрешностей перемещений в современных системах ЧПУ // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской Академии Наук. 2014. С. 4645-4655.

90. Прецизионные катаные шариковинтовые передачи *SKF* [Электронный ресурс]. URL: https://www.skf.com/binary/56-49715/6971_RU_Precision_rolled_ball_screws.pdf (дата обращения: 17.07.2020).

91. Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений // Современная электроника. 2014. №. 4. С. 30-33.
92. Усольцев А.А. Электрические машины / Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО. 2013, — 416 с.
93. Акишин А.И. Космическое материаловедение: Методическое и учебное пособие. — М: НИИЯФ МГУ, 2007. — 209 с.
94. Гаврюсев В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. — Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. — 113 с.
95. Bendjedja M., Ait-Amirat Y., Walther B., Berthon A. Sensorless control of hybrid stepper motor // Power Electronics and Applications. 2007. P.1-10.
96. Борисевич А.В., Глебо Д.В. Бездатчиковое векторное управление шаговым двигателем на основе расширенного фильтра Калмана // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 473-484.
97. Masi M., Butcher M., Martino M., Picatoste R. An application of the extended Kalman filter for a sensorless stepper motor drive working with long cables // IEEE Trans.Indust.Electron. 2012. Vol 59. No. 11. P. 4217-4225.
98. Olsson H., Åström K.J., Canudas de Wit C., Gäfvert M., Lischinsky P. Friction Models and Friction Compensation // European Journal of Control. 1998. Vol. 4. Iss. 3. P. 176-195.
99. Krause, P., O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff,, S. Pekarek. Analysis of electric machinery and drive systems. Piscatawy, NJ: Wiley-IEEE Press, 2013. 640 p.
100. Mahmaud S., Elsheri M., Mansaur H., Sami E. Field Orientation Control of Stepper Motors // Engineering Research Journal. 2012. Vol. 35. No. 1. P. 25-31.
101. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе [Электронный ресурс]. URL: http://privod.news/files/nabludateli_10.16_1.pdf (дата обращения: 17.07.2020).
102. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82 (1). P. 35-45.

103. Дубаренко В.В., Артёменко Ю.Н., Кучмин А.Ю. Управление динамическими объектами на основе гексаподов // В сборнике: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 2015. С. 1229-1231.

104. Саяпин С.Н., Артеменко Ю.Н., Мышонкова Н.В. Проблемы прецизионности криогенного космического телескопа обсерватории «Миллиметрон» // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2014. № 2 (53). С. 50-76.

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

106. Lambrechts P., Boerlage M., Steinbuch M. Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems // Control Engineering Practice. 2005. Vol. 13. No. 2. P. 145-157.

107. Артеменко Ю.Н., Агапов В.А., Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4 (59). С. 2-9.

108. Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Мороз А. В. Кинематическое управление гексаподом космического применения // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника — 2018: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 67-71.

109. Beiki M., Irani-Rahaghi M. Optimal trajectory planning of a six DOF parallel Stewart manipulator // 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM). 2018. P. 120-125.

110. Khalil W., Ibrahim O. General solution for the dynamic modeling of parallel robots // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. P. 3665-3670.

111. Harib K., Srinivasan K. Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures // Robotica. 2003. Vol. 21. P. 541-554.

112. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 736 с.

113. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Часть 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат: Учеб. пособие для вузов. — Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. — 279 с.

114. 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 университета. 2018. Т. 18. № 4. С. 18-21.

115. Zhang D., Wang J., Qian L., Yi J. Stepper motor open-loop control system modeling and control strategy optimization // Archives of Electrical Engineering. 2019. Vol. 68. P. 63-75.

116. Wu S. M., Ni J. Precision Machining without Precise Machinery // Annals of the CIRP. 1989. Vol. 38. No. 1. P. 533-536.

117. Fan K.-Ch., Liang M.-W. Development of an automatic cumulative-lead error measurement system for ballscrew nuts // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 72. P. 1-7.

118. Берлинер Э.М. Повышение точности обработки заготовок на станках с ЧПУ // ГИАБ. 2012. №6. С. 219-222.

119. Серков Н.А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: теория, эксперимент, практика: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.18 / Серков Николай Алексеевич; [Место защиты: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН - Учреждение РАН]. — Москва, 2017. — 335 с.

120. Матвеев С.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Прецизионное управление линейными приводами механизмов с параллельной кинематикой // Труды II научно-технической конференции "Перспективные разработки ракетно-космической техники". 2019. С. 196-201.

121. Слободзян Н.С. Оценка точности разомкнутого линейного привода, достижимой методом калибровки и компенсации линейного теплового расширения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 54-61.
122. Slobodzyan N.S. Methods of improving hexapod' linear actuators accuracy in space application // Extreme Robotics. 2019. Т. 1. № 1. С. 373-381.
123. 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.
124. Вержбицкий В. М. Основы численных методов: Учебник для вузов. — М.: Дирскт-Медиа, 2013. — 847 стр.
125. Cybenko G. V. Approximation by superpositions of a sigmoidal function // Mathematics of control signals and systems. 1989. Vol. 2. No 4. P. 303-314.
126. Controlling Thermal Expansion [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zaber.com/technical-articles/controlling-thermal-expansion> (дата обращения: 17.07.2020).
127. Accuracy of Feed Axes [Электронный ресурс]. URL: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdb/media/img/349843-01-A-02_Genauigkeit_von_Vorschubachsen_en.pdf (дата обращения: 17.07.2020).
128. Pajor M., Zaplata J. Compensation of thermal deformations of the feed screw in a CNC machine tool // Advances in manufacturing science and technology. 2011. Vol. 35. No 4. P. 9-17.
129. Chapman M.A.V. Environmental compensation of linear laser interferometer readings [Электронный ресурс]. URL: <https://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-environmental-compensation-of-linear-laser-interferometer-readings--94445> (дата обращения: 17.07.2020).
130. Физические величины: Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.; Под. ред. И. С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.; Эпергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

131. Кузнецов А.П. Тепловые процессы в металлорежущих станках. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 488 стр.
132. Егорова В.Д., Колесников А.П., Шендалев Д.О. Анализ влияния температурных деформаций штанг на точность наведения крупногабаритных антенн космических аппаратов // Решетневские чтения. 2016. №20. С. 111-113.
133. Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю., Артеменко Ю.Н. Управление адаптивной поверхностью большого наземного полноповоротного радиотелескопа // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. 2019. С. 201-203.
134. Легаев В. П., Генералов Л. К., Мойсеянчик М. И. Повышение точности линейного привода манипулятора путем использования корректирующих моделей в контуре управления // Труды МАИ [Электронный ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2018/fimm/ryzhaev/library/5.pdf> (дата обращения: 17.07.2020).
135. Xiang H., Wang S., Zhang C., Li X., Liu J. Compensation of friction and elastic deformation for ball screw drive system. // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2015. P. 1031-1035.
136. Huang H.-W., Tsai M.-S., Huang Y.-C. Modeling and elastic deformation compensation of flexural feed drive system // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2018. Vol. 132. P. 96-112.
137. Bolognani S., Zigliotto L. M., Zordan M. Extended-Range PMSM sensorless speed drive based on stochastic filtering // IEEE Trans. Power Electron. 2001. Vol. 16. No. 1. P. 110-117.
138. Salvatore N., Caponio A., Neri F., Stasi S., Cascella G. Optimization of delayed-state Kalman-filter-based algorithm via differential evolution for sensorless control of induction motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. No. 1. P. 385-394.
139. Dhaouadi R., Mohan N., Norum L., Design and implementation of an extended Kalman filter for the state estimation of a permanent magnet synchronous motor // IEEE Trans. Power Electron. 1991. Vol. 6. P. 491-497.

140. Walambe R., Joshi V. Closed Loop Stability of a PMSM-EKF Controller-Observer Structure // IFAC-Papers. 2018. Vol. 51. Iss. 1. P. 249-254.

141. Горбунов А.В., Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Леканов А.В., Порпылев В.Г., Слободзян Н.С. Автономная система обеспечения теплового режима электронных блоков космических аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 72-78.

142. 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.

143. 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.

Свидетельства о регистрации программного обеспечения

144. Свидетельство РФ № 2020666080. Программное обеспечение системы управления вентильным приводом с наблюдателем состояния / Слободзян Н.С., Кузнецова З.А., Гончаров В.О., Киселев А.А.; заявитель и правообладатель АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва». Заявка № 2020665368 от 26.11.2020. Оpubл. 04.12.2020.

145. Свидетельство РФ № 2018661587. Программное обеспечение системы управления гексаподом / Жуков Ю.А., Киселев А.А., Надежин М.И., Слободзян Н.С.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова». Заявка № 2018618378 от 06.08.2018. Оpubл. 10.09.2018.

146. Свидетельство РФ № 2018660149. Программное обеспечение стенда для испытаний линейных приводов / Акулов О.И., Целищев И.А., Комаров С.А., Слободзян Н.С.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО

«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова». Заявка № 2018618066 от 17.08.2018. Оpubл. 17.08.2018.

147. Свидетельство РФ № 2020663044. Программное обеспечение аппаратного комплекса для калибровки линейных приводов / Слободзян Н.С. Коротков Е.Б.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова». Заявка № 2020618417 от 31.07.2020. Оpubл. 22.10.2020.

Нормативные ссылки

148. ГОСТ Р 60.0.0.2-2016. Роботы и робототехнические устройства. Классификация. — Введ. 01.01.2018. — М.: Стандартиформ, 2016. — 11 с.

149. ОСТ 2 Р31-4-88. Станки металлорежущие. Шариковые винтовые передачи. Технические условия. — Введ. 01.07.1990. — М.: Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР, 1990. 45 с.

150. DIN 69051-2-1989. Станки металлорежущие. Шариковые ходовые винты. Номинальный диаметр и номинальный шаг резьбы. — Deutsches Institut für Normung. 1989.

151. ISO 3408-2:1991. Ball screws — Part 2: Nominal diameters and nominal leads — Metric series. — International Organization for Standardization. 1991.

152. JIS B1192-1997. Ball screws. — Japanese Standards Association. 2008.

153. ГОСТ 27843-2006. Испытания станков. Определение точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением. — Введ. 01.01.2008. — М.: Стандартиформ, 2007. — 14 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 — Результаты проверки точности линейного привода без коррекции при $T_{лп} = 15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения x_{ij} , мкм	$j = 1$	-0,15	-0,53	-4,88	-5,19	-7,83	-8,2	-14,23	-13,82	-13,59	-13,26
	2	-0,16	-0,5	-4,94	-5,22	-8,41	-8,81	-13,6	-13,17	-13,26	-12,96
	3	-0,12	-0,46	-4,83	-5,13	-8,35	-8,77	-13,6	-13,2	-13,09	-12,75
	4	-0,2	-0,61	-4,81	-5,19	-8,12	-8,44	-13,53	-13,17	-13,34	-13,01
	5	-0,27	-0,61	-5,07	-5,43	-8,49	-8,85	-13,59	-13,18	-13,39	-13,08
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		-0,18	-0,54	-4,9	-5,23	-8,24	-8,61	-13,71	-13,31	-13,34	-13,01
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,06	0,06	0,1	0,12	0,27	0,28	0,29	0,29	0,18	0,18
$2s_i$, мкм		0,12	0,13	0,21	0,23	0,54	0,57	0,59	0,57	0,37	0,37
$x_i - 2s_i$, мкм		-0,3	-0,67	-5,11	-5,47	-8,78	-9,18	-14,3	-13,88	-13,7	-13,38
$x_i + 2s_i$, мкм		-0,06	-0,41	-4,7	-5	-7,7	-8,04	-13,12	-12,73	-12,97	-12,64
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,23	0,26	0,41	0,46	1,08	1,14	1,18	1,15	0,73	0,74
Зона нечувствительности B_i , мкм		-0,36		-0,33		-0,37		0,4		0,33	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,61		0,77		1,48		1,57		1,06	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		-0,36		-5,07		-8,43		-13,51		-13,17	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,4			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			-0,07			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			13,15			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		13,53			12,77			13,53			
Повторяемость позиционирования R , мкм		1,18			1,15			1,57			
Точность A , мкм		14,24			13,47			14,24			

Таблица А2 — Результаты проверки точности линейного привода без коррекции при $T_{\text{лп}} = 21,4^\circ\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения x_{ij} , мкм	$j = 1$	0,72	0,05	0,27	-0,33	0,48	0,38	2,17	2,16	3,98	3,64
	2	0,74	0,14	0,24	-0,34	-0,2	-0,32	2,73	2,69	4,38	4,05
	3	0,75	0,1	0,23	-0,42	-0,21	-0,32	2,62	2,66	4,4	4,03
	4	0,71	0,09	0,09	-0,46	-0,1	-0,24	2,69	2,68	4,22	3,87
	5	0,75	0,1	0,19	-0,42	-0,14	-0,22	2,72	2,69	4,27	3,94
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		0,74	0,09	0,21	-0,39	-0,03	-0,14	2,58	2,57	4,25	3,91
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,02	0,03	0,07	0,06	0,29	0,3	0,24	0,23	0,17	0,16
$2s_i$, мкм		0,04	0,06	0,14	0,11	0,59	0,59	0,48	0,47	0,34	0,33
$x_i - 2s_i$, мкм		0,7	0,03	0,07	-0,5	-0,62	-0,73	2,11	2,11	3,91	3,58
$x_i + 2s_i$, мкм		0,77	0,16	0,34	-0,28	0,55	0,45	3,06	3,04	4,59	4,23
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,07	0,12	0,27	0,22	1,17	1,18	0,95	0,93	0,69	0,66
Зона нечувствительности B_i , мкм		-0,64		-0,6		-0,11		-0,01		-0,34	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,74		0,85		1,28		0,95		1,01	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		0,41		-0,09		-0,09		2,58		4,08	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,64			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			-0,34			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			4,17			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		4,28			4,3			4,64			
Повторяемость позиционирования R , мкм		1,17			1,18			1,28			
Точность A , мкм		5,21			4,97			5,33			

Таблица АЗ — Результаты проверки точности линейного привода без коррекции при $T_{\text{лп}} = 25,1^\circ\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения x_{ij} , мкм	$j = 1$	0	0,05	1,61	2,15	4,15	3,92	9,45	9,56	12,06	11,72
	2	0	0,03	1,58	2,13	3,62	3,35	9,96	10,02	12,34	12,02
	3	0,05	0,13	1,44	2,04	3,85	3,56	9,85	9,9	12,49	12,1
	4	0,06	0,15	1,44	1,98	3,83	3,56	9,88	10	12,41	12,03
	5	-0,05	0,03	1,51	2,04	3,53	3,28	9,97	10,03	12,28	11,91
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		0,01	0,08	1,52	2,07	3,79	3,54	9,82	9,9	12,32	11,96
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,05	0,06	0,08	0,07	0,24	0,25	0,22	0,2	0,16	0,15
$2s_i$, мкм		0,1	0,11	0,15	0,14	0,48	0,5	0,43	0,4	0,32	0,3
$x_i - 2s_i$, мкм		-0,08	-0,04	1,36	1,93	3,31	3,04	9,39	9,5	11,99	11,65
$x_i + 2s_i$, мкм		0,11	0,19	1,67	2,21	4,28	4,03	10,25	10,3	12,64	12,26
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,19	0,23	0,31	0,28	0,97	0,99	0,86	0,8	0,65	0,61
Зона нечувствительности B_i , мкм		0,06		0,55		-0,26		0,08		-0,36	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,27		0,84		1,24		0,91		0,98	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		0,04		1,79		3,66		9,86		12,14	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,55			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			0,02			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			12,09			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		12,3			11,88			12,3			
Повторяемость позиционирования R , мкм		0,97			0,99			1,24			
Точность A , мкм		12,72			12,3			12,72			

Таблица А4 — Результаты проверки точности линейного привода без коррекции при $T_{\text{лп}} = 28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения x_{ij} , мкм	$j = 1$	0,24	0,34	4,74	4,25	8,27	8,14	16,67	16,46	20,09	19,75
	2	0,23	0,39	4,79	4,34	7,66	7,55	17,17	16,95	20,39	19,96
	3	0,16	0,32	4,74	4,24	7,79	7,7	17,19	17,01	20,65	20,19
	4	0,2	0,37	4,7	4,29	7,79	7,68	17,06	16,9	20,43	19,93
	5	0,33	0,48	4,39	3,95	7,64	7,49	17,24	17,02	20,59	20,17
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		0,23	0,38	4,67	4,21	7,83	7,71	17,07	16,87	20,43	20
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,06	0,06	0,16	0,15	0,25	0,25	0,23	0,23	0,22	0,18
$2s_i$, мкм		0,13	0,12	0,32	0,31	0,51	0,5	0,46	0,47	0,44	0,37
$x_i - 2s_i$, мкм		0,1	0,26	4,35	3,9	7,32	7,21	16,6	16,4	20	19,63
$x_i + 2s_i$, мкм		0,36	0,5	4,99	4,52	8,34	8,22	17,53	17,33	20,87	20,37
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,26	0,24	0,64	0,62	1,01	1,01	0,92	0,94	0,87	0,73
Зона нечувствительности B_i , мкм		0,15		-0,46		-0,12		-0,2		-0,43	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,4		1,09		1,13		1,13		1,23	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$, мкм		0,31		4,44		7,77		16,97		20,22	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,46			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			-0,21			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			19,91			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		20,2			19,62			20,2			
Повторяемость позиционирования R , мкм		1,01			1,01			1,23			
Точность A , мкм		20,76			20,11			20,76			

Таблица А5 — Результаты проверки точности линейного привода без коррекции при $T_{\text{лп}} = 33,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения χ_{ij} , мкм	$j = 1$	0,15	0,58	8,37	8,4	14,66	14,95	29,97	30,02	33,6	34,24
	2	0,05	0,53	8,37	8,35	14,15	14,44	30,44	30,49	33,79	34,43
	3	-0,03	0,46	8,27	8,24	14,04	14,29	30,57	30,65	33,8	34,43
	4	0,21	0,65	8,19	8,15	13,96	14,28	30,44	30,48	33,78	34,38
	5	0,16	0,62	8,3	8,32	14,11	14,35	30,5	30,54	33,95	34,56
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		0,11	0,57	8,3	8,29	14,19	14,46	30,39	30,44	33,78	34,41
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,1	0,08	0,08	0,1	0,28	0,28	0,24	0,24	0,12	0,12
$2s_i$, мкм		0,2	0,15	0,16	0,19	0,55	0,56	0,48	0,48	0,24	0,23
$\chi_i - 2s_i$, мкм		-0,09	0,42	8,14	8,1	13,63	13,9	29,91	29,95	33,54	34,17
$\chi_i + 2s_i$, мкм		0,31	0,72	8,46	8,48	14,74	15,02	30,86	30,92	34,03	34,64
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,4	0,31	0,31	0,39	1,11	1,13	0,95	0,96	0,49	0,47
Зона нечувствительности B_i , мкм		0,46		-0,01		0,27		0,05		0,62	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,81		0,39		1,39		1,01		1,1	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		0,34		8,29		14,32		30,41		34,1	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,62			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			0,28			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			33,76			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		33,68			33,84			34,3			
Повторяемость позиционирования R , мкм		1,11			1,13			1,39			
Точность A , мкм		34,12			34,23			34,73			

Таблица А6 — Результаты проверки точности линейного привода с коррекцией при $T_{\text{лп}} = 15,1$ °С.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения χ_{ij} , мкм	$j = 1$	0,29	0	-0,01	-0,49	0,35	0,48	-2,28	-2,02	-1,43	-1,26
	2	0,11	-0,07	0,3	-0,15	0,11	0,17	-1,88	-1,53	-1,21	-1,07
	3	0,24	-0,03	0,3	-0,24	0,01	0,03	-2,08	-1,77	-0,97	-0,81
	4	0,11	-0,11	0,09	-0,38	-0,1	0,01	-1,83	-1,54	-1,19	-1,02
	5	0,07	-0,15	0,32	-0,17	-0,02	-0,01	-1,93	-1,6	-0,97	-0,8
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		0,17	-0,07	0,2	-0,29	0,07	0,13	-2	-1,69	-1,15	-0,99
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,09	0,06	0,15	0,15	0,17	0,21	0,18	0,21	0,19	0,19
$2s_i$, мкм		0,19	0,12	0,3	0,29	0,34	0,41	0,36	0,41	0,39	0,39
$\chi_i - 2s_i$, мкм		-0,02	-0,19	-0,1	-0,58	-0,27	-0,28	-2,36	-2,11	-1,54	-1,38
$\chi_i + 2s_i$, мкм		0,35	0,05	0,49	0	0,41	0,55	-1,64	-1,28	-0,77	-0,61
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,38	0,24	0,59	0,58	0,69	0,83	0,72	0,83	0,77	0,77
Зона нечувствительности B_i , мкм		-0,24		-0,49		0,06		0,31		0,16	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,54		1,07		0,83		1,08		0,93	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		0,05		-0,04		0,1		-1,85		-1,07	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,49			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			-0,04			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			1,95			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		2,2			1,83			2,2			
Повторяемость позиционирования R , мкм		0,77			0,83			1,08			
Точность A , мкм		2,85			2,65			2,91			

Таблица А7 — Результаты проверки точности линейного привода с коррекцией при $T_{\text{лп}} = 21,4^\circ\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения χ_{ij} , мкм	$j = 1$	0,14	0,08	-0,92	-0,48	0,85	1,07	-0,08	-0,1	0,46	0,32
	2	-0,02	-0,18	-0,47	-0,05	0,6	0,93	0,24	0,26	1,01	0,86
	3	-0,12	-0,3	-0,4	0,11	0,61	0,84	0,04	0,1	0,95	0,8
	4	-0,12	-0,27	-0,49	-0,06	0,46	0,69	0,04	0	0,92	0,73
	5	-0,19	-0,37	-0,51	-0,1	0,74	1,06	0,23	0,22	0,99	0,9
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,06	-0,21	-0,56	-0,11	0,65	0,92	0,09	0,1	0,87	0,72
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,13	0,18	0,21	0,22	0,15	0,16	0,14	0,15	0,23	0,23
$2s_i$, мкм		0,25	0,35	0,41	0,44	0,3	0,32	0,27	0,31	0,46	0,47
$\chi_i - 2s_i$, мкм		-0,31	-0,56	-0,97	-0,55	0,36	0,6	-0,18	-0,21	0,41	0,25
$\chi_i + 2s_i$, мкм		0,2	0,15	-0,15	0,32	0,95	1,23	0,37	0,4	1,33	1,19
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,51	0,7	0,82	0,88	0,59	0,63	0,55	0,62	0,92	0,94
Зона нечувствительности B_i , мкм		-0,15		0,44		0,26		0		-0,14	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,75		1,29		0,88		0,62		1,07	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,13		-0,34		0,79		0,09		0,79	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,44			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			0,08			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			1,13			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		1,42			1,12			1,47			
Повторяемость позиционирования R , мкм		0,92			0,94			1,29			
Точность A , мкм		2,29			1,79			2,29			

Таблица А8 — Результаты проверки точности линейного привода с коррекцией при $T_{\text{лп}} = 25,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения χ_{ij} , мкм	$j = 1$	-0,42	-0,25	-0,36	-0,21	-0,04	-0,06	0,16	0,51	0,95	0,69
	2	-0,18	0,01	-0,52	-0,35	-0,14	-0,15	-0,01	0,37	0,81	0,55
	3	-0,29	-0,12	-0,23	-0,13	-0,38	-0,41	0,16	0,54	0,85	0,57
	4	-0,14	0,01	-0,38	-0,29	-0,31	-0,28	-0,02	0,34	0,79	0,51
	5	-0,27	-0,16	-0,33	-0,18	-0,28	-0,26	0,02	0,36	0,9	0,58
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,26	-0,1	-0,36	-0,23	-0,23	-0,23	0,06	0,42	0,86	0,58
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,11	0,11	0,1	0,08	0,14	0,13	0,09	0,09	0,07	0,07
$2s_i$, мкм		0,22	0,22	0,2	0,17	0,27	0,26	0,18	0,18	0,13	0,14
$\chi_i - 2s_i$, мкм		-0,48	-0,32	-0,57	-0,4	-0,5	-0,5	-0,12	0,24	0,73	0,44
$\chi_i + 2s_i$, мкм		-0,04	0,12	-0,16	-0,06	0,04	0,03	0,24	0,61	0,99	0,72
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,44	0,45	0,41	0,34	0,54	0,53	0,36	0,37	0,27	0,28
Зона нечувствительности B_i , мкм		0,16		0,13		0		0,36		-0,28	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,6		0,5		0,54		0,73		0,55	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,18		-0,3		-0,23		0,24		0,72	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,36			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			0,07			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			1,02			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		1,22			0,81			1,22			
Повторяемость позиционирования R , мкм		0,54			0,53			0,73			
Точность A , мкм		1,56			1,21			1,56			

Таблица А9 — Результаты проверки точности линейного привода с коррекцией при $T_{\text{лп}} = 28,0$ °С.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения χ_{ij} , мкм	$j = 1$	-0,45	-0,05	0,45	-0,1	0,92	1,16	-0,29	-0,52	0,71	0,4
	2	-0,7	-0,27	0,14	-0,34	0,45	0,66	-0,09	-0,39	1,31	0,99
	3	-0,62	-0,13	0,42	-0,1	0,47	0,67	0,01	-0,26	1,19	0,85
	4	-0,69	-0,19	0,34	-0,15	0,47	0,63	0,08	-0,21	1,25	0,85
	5	-0,91	-0,43	0,26	-0,16	0,48	0,7	0,08	-0,26	1,33	0,93
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,67	-0,21	0,32	-0,17	0,56	0,76	-0,04	-0,33	1,16	0,8
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,17	0,15	0,13	0,1	0,2	0,22	0,16	0,13	0,26	0,23
$2s_i$, мкм		0,33	0,29	0,26	0,2	0,41	0,44	0,31	0,25	0,52	0,46
$\chi_i - 2s_i$, мкм		-1,01	-0,5	0,06	-0,37	0,15	0,32	-0,36	-0,58	0,64	0,34
$\chi_i + 2s_i$, мкм		-0,34	0,08	0,58	0,02	0,96	1,21	0,27	-0,08	1,68	1,27
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,67	0,58	0,51	0,39	0,81	0,89	0,63	0,51	1,04	0,92
Зона нечувствительности B_i , мкм		0,46		-0,49		0,21		-0,29		-0,35	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		1,09		0,94		1,06		0,85		1,33	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,44		0,08		0,66		-0,18		0,98	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,49			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			-0,09			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			1,43			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		1,83			1,13			1,83			
Повторяемость позиционирования R , мкм		1,04			0,92			1,33			
Точность A , мкм		2,69			1,85			2,69			

Таблица А10 — Результаты проверки точности линейного привода с коррекцией при $T_{\text{лп}} = 33,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Номер заданной позиции i		1		2		3		4		5	
Целевая позиция P_i , мм		5,34		55,5		93,8		177,12		192,8	
Направление подхода		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Позиционные отклонения χ_{ij} , мкм	$j = 1$	-0,12	-0,12	0,15	0,28	1,47	1,25	0,38	0,71	1,57	1,52
	2	-0,47	-0,28	0,48	0,52	1,51	1,16	0,7	1,04	1,85	1,78
	3	-0,5	-0,35	0,49	0,5	1,31	0,94	0,66	0,98	1,75	1,66
	4	-0,59	-0,41	0,35	0,42	1,22	0,81	0,62	0,92	1,72	1,64
	5	-0,53	-0,35	0,3	0,26	1,47	1,07	0,5	0,83	1,74	1,61
Среднее одностороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,44	-0,3	0,36	0,4	1,4	1,04	0,57	0,9	1,73	1,64
Среднеквадратическое отклонение s_i , мкм		0,19	0,11	0,14	0,12	0,12	0,17	0,13	0,13	0,1	0,1
$2s_i$, мкм		0,37	0,22	0,28	0,24	0,25	0,35	0,26	0,26	0,2	0,19
$\chi_i - 2s_i$, мкм		-0,82	-0,52	0,08	0,16	1,15	0,7	0,31	0,64	1,52	1,45
$\chi_i + 2s_i$, мкм		-0,07	-0,08	0,64	0,63	1,65	1,39	0,84	1,15	1,93	1,84
Повторяемость в одном направлении R_i , мкм		0,75	0,44	0,56	0,47	0,5	0,7	0,53	0,51	0,4	0,39
Зона нечувствительности B_i , мкм		0,14		0,04		-0,35		0,32		-0,08	
Повторяемость в двух направлениях R_i , мкм		0,75		0,56		0,95		0,84		0,48	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{\chi}_i$, мкм		-0,37		0,38		1,22		0,74		1,68	
Направление подхода		Одностороннее ↓			Одностороннее ↑			Двустороннее			
Зона нечувствительности B , мкм		—			—			0,35			
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$, мкм		—			—			0,01			
Среднее двустор. позиц. отклонение M , мкм		—			—			2,06			
Систематическое позиц. отклонение E , мкм		2,17			1,94			2,17			
Повторяемость позиционирования R , мкм		0,75			0,7			0,95			
Точность A , мкм		2,74			2,36			2,74			