

Отзыв

официального оппонента

на диссертацию Слободзяна Никиты Сергеевича

«Прецизионное управление линейным приводом механизма

с параллельной структурой космического применения»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук

по специальности 05.11.16 — Информационно-измерительные и

управляющие системы (в машиностроении)

Актуальность темы диссертации. Задача разработки и создания систем, обеспечивающих в процессе орбитального функционирования относительное перемещение и взаимное позиционирование космических объектов различного назначения, становится все более актуальной. Успешный опыт эксплуатации орбитальных станций, транспортных систем многоразового использования подтверждает эффективность применения прецизионных механизмов с целенаправленно изменяемой конфигурацией. Диктуемое потребностями прикладного назначения конструктивное усложнение перспективных космических систем, способных автономно и длительно функционировать в экстремальных условиях космической среды, естественным образом определяет потребность в новых конструкторских решениях, основанных на применении современных интеллектуальных систем и устройств. Особенно остро встают вопросы обеспечения прецизионной точности работы механизмов в случае жестких требований к режимам работы объектов наведения. Актуальным примером, подробно рассмотренным в диссертационной работе Слободзяна Н.С., является механизм наведения, ориентации и стабилизации главного зеркала и контррефлектора отечественных космических радиотелескопов.

Для решения поставленных в диссертации Слободзяна Н.С. задач создания прецизионных механизмов относительного перемещения и взаимного позиционирования элементов перспективных космических систем весьма целесообразным является использование механизмов параллельной структуры, эффективность которых многократно подтверждена результатами использования в технологических, манипулирующих, испытательных, измерительных, медицинских приложениях. При этом опыт разработки и эксплуатации подобных систем космического назначения, и, прежде всего, их важных элементов — линейных электромеханических приводов — фактически отсутствует, а уникальность разрабатываемых электромеханических устройств и специфика их орбитальной эксплуатации

определяют несомненную актуальность выполненных в диссертационной работе Слободзяна Н.С. научных исследований.

Обоснованность научных положений и выводов обеспечена при исследовании строгостью использованных методов анализа и применением фундаментальных положений теоретической и аналитической механики, дилатометрии, теории управления. Необходимо отметить комплексный системный подход автора как к вопросу постановки задач исследований, так и к поиску решений. При этом в равной степени значительное внимание уделено и теоретическому обоснованию полученных результатов, и организации вычислительного эксперимента. Обоснованность выводов подтверждается результатами численного моделирования на основе методов компьютерной математической обработки современными программными средствами ANSYS и Matlab, а также значительным объемом полученных автором экспериментальных данных.

Достоверность полученных результатов подтверждается достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований линейного привода (ЛП), выполненных в соответствии с общепризнанным стандартом определения точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением (ГОСТ 27843-2006) с использованием специально созданного автором программно-аппаратного комплекса. В диссертации приведено подробное описание стендового оборудования, методики экспериментальных исследований и их результаты.

Диссертационная работа прошла широкую апробацию в открытой печати, сформулированные автором научные положения, выводы и рекомендации логичны и обоснованы, полностью согласуются с результатами проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна исследований. Автором диссертационной работы получен ряд новых результатов, обеспечивающих повышение точности исполнительных механизмов параллельной структуры, предназначенных для применения в жестких условиях на борту космического аппарата.

Необходимо отметить обстоятельный комплексный анализ факторов, оказывающих влияние на точность позиционирования подвижной платформы, перемещаемой относительно основания при помощи рассматриваемого в работе механизма параллельной структуры. Рассмотрен как механизм в целом, так и линейный привод. Результаты данного анализа, послужившие основой дальнейших исследований, содержат элементы научной новизны и представляют самостоятельную ценность.

Автором обоснована структура линейного привода космического применения с косвенной обратной связью по положению. Подробно проанализированы составляющие суммарной ошибки позиционирования штока линейного привода, дана оценка их максимальных значений, а также представлены возможные методы их уменьшения.

Следует отметить системный подход, позволивший автору предложить алгоритм прецизионного управления линейным приводом, весьма полно и комплексно учитывающий особенности его конструктивной реализации, обоснованно выбранной с учетом целевого назначения системы.

Для повышения точности привода предложено использование программной компенсации некоторых типов ошибок. Соискателем разработаны методы, алгоритм и система управления линейным приводом, позволяющие с учетом отсутствия датчика главной обратной связи и работы в широком диапазоне температур снизить погрешность работы привода до нескольких микрометров. При этом предложенный алгоритм управления одновременно компенсирует систематическую ошибку механической части, температурные и упругие деформаций элементов привода.

Особо следует отметить предложенную и теоретически обоснованную автором совокупность режимов управления, обеспечивающих работоспособность системы в случае аппаратных сбоев.

Автором предложено построение системы управления гексапода в пространстве обобщенных координат линейных приводов. Предложена технически реализуемая структурная схема такой системы управления, а также алгоритм планирования траектории движения полезной нагрузки, обеспечивающий выполнение требований к статической и динамической точности гексапода и ограничению динамических возмущений на объект управления и космический аппарат.

Полученные теоретические результаты были протестированы автором с использованием средств компьютерного моделирования и апробированы в ходе лабораторных исследований. Для узкого диапазона температур экспериментально продемонстрировано снижение погрешности линейного привода до 2,5 мкм. На имитационной модели гексапода с учетом динамики приводов, элементов гексапода и нагрузки, а также ряда ограничений на рывки, ускорения, скорости и перемещения в режиме планирования траекторий продемонстрированы динамические ошибки наведения объекта управления не более 10 угловых секунд и 40 мкм по соответствующим угловыми линейным координатам.

Теоретическая и практическая значимость. В диссертации разработаны и исследованы методы, алгоритм, система управления

линейным приводом, позволяющие существенно повысить точность его работы в составе механизма параллельной структуры космического применения.

Теоретическая и практическая значимость заключается также в предложенном способе задания движения подвижной платформы гексапода с нагрузкой по синтезированным законам. Алгоритм управления МПС позволяет осуществлять управление по оптимальным траекториям с минимальными динамическими возмущениями.

На основе полученных результатов при участии автора диссертации в рамках выполненной совместно с одним из ведущих предприятий ракетно-космической отрасли научно-исследовательской и опытно конструкторской работы разработан экспериментальный образец гексапода, в котором реализованы технические решения, основанные на результатах диссертации, что подтверждает практическую применимость и значимость полученных результатов.

Полученные результаты теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены применительно к конкретной конструкции механизма параллельной структуры, что обеспечивает возможность их непосредственного практического использования в составе рассматриваемой космической системы.

При этом комплексный характер выполненных исследований определяет самостоятельную теоретическую ценность полученных результатов.

Результаты работы могут быть непосредственно использованы применительно к широкому классу механизмов параллельной структуры космического назначения, конструктивно подобных рассмотренному, а также послужить методической основой дальнейших теоретических исследований при решении аналогичных задач.

Структура и объем диссертации. Соответствие содержания автореферата тексту диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, одного приложения.

Во введении автором обоснована актуальность выбранной темы исследований, степень ее разработанности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследований, положения, выносимые на защиту. Приводятся примененные автором методы исследований, обосновывается достоверность результатов, описывается их внедрение, апробация, а также личный вклад автора.

В первой главе приведен анализ опыта применения механизмов параллельной структуры в промышленности и космической технике. Автором обосновывается необходимость выполнения исследований и разработки МПС космического применения, поскольку на рынке практически отсутствуют механизмы, отвечающие высоким требованиям по точности, и одновременно специальным требованиям условий эксплуатации.

Рассмотрены возможные схемы построения системы информационного обеспечения гексапода космического применения, сделан вывод о необходимости исследования путей повышения точности МПС, не имеющих системы измерения положения платформы ввиду ограниченности доступной компонентной базы. Далее автором анализируются и классифицируются ошибки исполнительных механизмов параллельной структуры.

Вторая глава посвящена исследованию линейного привода МПС типа гексапода. Указано, что для обеспечения точного позиционирования и наведения объекта управления, установленного на гексапode, ошибки приводов МПС должны составлять не более ± 2 микрометров.

В соответствии с таким требованием, а также учетом особенностей эксплуатации и доступности соответствующей компонентной базы автором обосновывается структура исполнительной, измерительной и управляющей подсистем, конструкция линейного привода. В заключении главы автором приведены исследование, оценка и классификация основных источников погрешности линейного привода, предложены пути повышения точности линейных приводов и гексапода на их основе.

Третья глава посвящена разработке методов и алгоритма управления линейным приводом, обеспечивающих снижение его погрешности. Линейный привод рассматривается автором как объект управления, приводится его математическая модель без учета влияния источников погрешности.

Автором дана общая постановка проблемы формирования и планирования траектории движения объекта управления, обоснован и формализован алгоритм траекторного управления гексаподом с учетом оценки величин составляющих усилий в приводах гексапода. Показано, что схема системы управления (СУ) гексаподом в пространстве декартовых координат на практике трудно реализуема, т.к. в общем случае требует значительных вычислительных ресурсов, точных данных о массо-инерционных свойствах и упругостях элементов МПС, наличия системы измерения выходных координат подвижной платформы гексапода. Поэтому далее в разделе обоснованы, разработаны и приведены структурные схемы системы управления линейным приводом и системы управления гексаподом

в пространстве обобщенных координат (удлинений линейных приводов), позволяющие реализовать предложенный алгоритм с учетом ограниченной производительности микропроцессорных устройств, а также отсутствия датчиков положения ЛП и платформы МПС космического применения.

В третьей главе автором также выполнен синтез системы управления линейным приводом с учетом требований к минимизации ошибки в статических и динамических режимах на основе принципа подчиненного регулирования координат. Рассмотрены особенности применения шагового двигателя в качестве приводного в составе линейного привода, обосновано применение наблюдателя состояния в составе системы управления ЛП. Отдельно автором даны рекомендации по реализации режима разомкнутого управления шаговым двигателем. Далее автором выполнены исследования методов повышения точности ЛП путем компенсации влияния некоторых источников погрешностей. Исследован метод компенсации систематической ошибки механической части линейного привода – шарико-винтовой передачи и других элементов, имеющих систематическую ошибку.

Предложена калибровка ЛП на основе предварительного измерения систематических ошибок линейного положения и формирования таблицы поправок. Обоснован метод кусочно-линейной аппроксимации с учетом реализации на микропроцессорной системе управления.

Автором, с учетом чувствительности исполнительного механизма к изменению его тепловых полей, предложен метод программного расчета и компенсации температурных деформаций. Отделено приведены и обоснованы методы для случаев однородного и неоднородного температурных полей ЛП, даны рекомендации и формулы для экспериментального определения параметров (коэффициентов), необходимых для вычисления поправок.

С учетом конечной жесткости конструкции линейного привода автором предложен метод компенсации упругой деформации на основе оценки осевого усилия с помощью применяемого в системе управления наблюдателя состояния линейного привода.

На основе приведенных методов компенсации основных ошибок автором разработан общий алгоритм прецизионного управления линейным приводом, в соответствующей последовательности обеспечивающий вычисление необходимых поправок, а также траекторное управление.

В четвертой главе автором приводятся результаты имитационного моделирования и экспериментальных исследований. Для исследования предложенной системы управления линейным приводом с подчиненным регулированием координат на основе наблюдателя состояния разработана

имитационная компьютерная модель. Выполнены и приведены необходимые расчеты и обоснования параметров модели линейного привода. Даны и обоснованы критерии устойчивости системы управления на основе наблюдателя состояния, показана устойчивость для различных режимов работы. Автором показано, что для устойчивости необходимо в первую очередь ограничить координату скорости привода. Выполнено моделирование работы линейного привода в режиме слежения при отработке заданной траектории движения. Представлены результаты моделирования метода оценки осевого усилия и идентификации некоторых параметров привода.

Для анализа разработанной системы управления гексаподом в пространстве обобщенных координат линейных приводов выполнено моделирование динамики МПС с учетом конкретных массо-инерционных параметров объекта управления, упругих свойств элементов ЛП, постоянных времени системы управления ЛП. По результатам моделирования получены малые значения статических и динамических ошибок по всем координатам подвижной платформы. Автором диссертации разработан и изготовлен макет электронного модуля системы управления линейным приводом, а также программное обеспечение, предназначенные для проведения экспериментальных исследований точностных параметров ЛП.

В соответствии с ГОСТ 27843-2006 на стендовом оборудовании, построенном на базе специально изготовленного макета ЛП, автором выполнены экспериментальные исследования точности ЛП для различных температурных условий, оснащенного датчиками положения и температуры.

В результате экспериментальных исследований наглядно показано существенное повышение точности, достижимое благодаря применению разработанного алгоритма и системы прецизионного управления линейным приводом. В целом все выполненные автором исследования, предложенные методы и алгоритмы управления обоснованы и подкреплены результатами конечно-элементного, и численного моделирования, а также экспериментальными исследованиями. В заключение диссертации приводятся выводы, перспективы дальнейшей разработки темы и приложение с численными результатами экспериментов.

В автореферате диссертации достаточно полно изложены основные положения и выводы выполненных исследований. Основные положения диссертации отражены также в опубликованных автором печатных работах.

Замечания по диссертации.

1. В работе недостаточно конкретно определены ограничения на применяемые при проектировании системы управления гексаподом

комплектующие, обусловленные особенностями эксплуатации гексапода в условиях космического пространства и задачами импортозамещения.

2. Выводы по 4 разделу носят характер качественного обобщения результатов моделирования и экспериментальных исследований. Целесообразно проиллюстрировать данные выводы количественными показателями.

3. В работе целесообразно было бы привести технико-экономические расчеты, подкрепляющие обоснованность предложенных автором технических решений по структуре линейного привода, системы управления ЛП и СУ гексапода космического применения.

4. На графике рис. 2.12, иллюстрирующем типовую зависимость кинематической погрешности винтовой пары от номинального осевого перемещения гайки, не указаны численные значения, что не позволяет соотнести величины перемещения и ошибки.

5. В пункте 2.4.2 «Температурные ошибки» указан диапазон возможного изменения температуры, но не оговаривается характер изменения. Предполагаются ли скачкообразные изменения суммарного теплового потока при переходе с освещенного участка орбиты на не освещенный?

6. В пункте 2.4.3 «Ошибки, вызванные механическими нагрузками» возможность пренебречь силами инерции обосновывается ограничениями, накладываемыми на кинематические характеристики движения. Подразумеваются ли также ограничения на массо-инерционные характеристики космического аппарата и радиотелескопа?

7. В работе рассматривается движение платформы относительно неподвижного основания. Рассматривался ли вопрос о движении платформы относительно подвижного основания?

Заключение.

Отмеченные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы Слободзяна Н.С.. Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-исследовательском уровне. К ее достоинствам следует отнести использование автором широкого арсенала методов исследования, общую логику и четкость изложения материала. Автор продемонстрировал хорошие навыки самостоятельной научной работы, показал глубокие знания, умения и навыки работы в современных программных пакетах для научных и прикладных инженерных исследований, проявил себя сформировавшимся

исследователем, способным решать сложные научно-исследовательские задачи.

Диссертация Слободзяна Н.С. соответствует паспорту специальности 05.11.16 — Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении). По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, выводам и рекомендациям диссертация соответствует критериям, указанным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013. Автор диссертации Слободзян Никита Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 — Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении).

Официальный оппонент: доцент кафедры РК-6 «Системы автоматизированного проектирования» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук, старший научный сотрудник



Белоножко Павел Петрович

30.08

2021 г.

Место работы: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)». **Адрес:** 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1. **Тел.:** +7 (499) 263-69-71, e-mail: byelonozhko@bmstu.ru.

