



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого

чл.-корр. РАН, д. т. н., профессор
В.В. Сергеев



«10» октября 2017 г

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертационную работу Несмиянова Ивана Алексеевича «Структурный и параметрический синтез и оптимизация программных движений манипуляторов на основе трипода», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.18 — Теория механизмов и машин.

Актуальность темы диссертационной работы

Большинство промышленных манипуляторов, в том числе и манипуляторов роботов построены в виде последовательно связанных кинематическими парами функциональных звеньев. Такие манипуляторы обладают рядом достоинств, однако консольность таких конструкций не позволяют реализовать перемещения больших масс, особенно на больших скоростях. Большой интерес в различных сферах представляют манипуляционные механизмы параллельной структуры, обладающие лучшей грузоподъемностью, повышенной жесткостью системы, достижении высоких скоростей и ускорений грузозахватного устройства.

Учитывая недостатки манипуляторов параллельной структуры, к которым относятся ограниченность рабочей зоны, относительно небольшая маневренность, автор диссертационной работы Несмиянов И.А. делает акцент на необходимость

разработки манипуляторов параллельно – последовательной структуры, которые объединяли бы преимущества обеих структурных схем манипуляционных систем.

Одно из основных требований, определяющих работоспособность манипуляторов, является обеспечение подхода рабочего органа манипулятора к требуемым точкам объекта обслуживания с заданной ориентацией рабочего органа. В связи с чем обоснованно поставлен вопрос об оценке функциональных возможностей манипулятора в зоне обслуживания. Часто число обобщенных координат манипулятора превышает число обобщенных координат захвата и заданному конечному положению объекта соответствует множество конфигураций системы. Такая неопределенность обуславливает формулировку и решение оптимизационной задачи позиционирования манипулятора.

Работы по исследованию механизмов манипуляторов параллельной структуры в основном стали проводиться в конце XX века, но до сих пор актуальными являются исследования, посвященные оптимизации геометрических, кинематических и силовых параметров манипуляторов с механизмами параллельной структуры, разработка методик их расчета и проектирования, а также задача обоснованного выбора конструктивных параметров манипулятора на этапе проектирования. Актуальными являются разработка методов синтеза и оптимизации параметров управляемого перемещения манипуляционных робототехнических систем параллельно – последовательной структуры при выполнении различных технологических операций.

В связи с этим, поставленная автором диссертационной работы задача синтеза программных движений выходного звена манипулятора с избыточными степенями подвижности, при совместном решении обратной задачи определения обобщенных координат манипулятора и прямой задачи манипулятора-трипода на подвижном основании из условия минимума нагрева приводных электродвигателей из-за инерционных нагрузок, является актуальной.

Наличие самотормозящейся передачи в приводном механизме требует аналитического описания ее влияния на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания. Поэтому разработка аналитических методов исследования кинематики и динамики приводов манипулятора-трипода с самотормозящейся пе-

редачей и упругими звеньями, является дальнейшим развитием методов управления перемещением выходных звеньев.

Таким образом, тема диссертационной работы Несмиянова И.А., посвященная решению проблем структурного синтеза, механики и управления манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода, является актуальной научной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение.

Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 311 страниц, в тексте имеется 5 таблиц и 129 рисунков. Список литературы представлен на 50 страницах, содержит 398 наименований, из которых 85 иностранных источников.

Автором работы выполнен достаточно обширный анализ опыта применения манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода в промышленности, сельском хозяйстве, непромышленных отраслях, а также анализ и классификация показателей качества погрузочных манипуляторов параллельной и параллельно-последовательной структуры. Обоснована необходимость развития теории структурного синтеза и оптимизации законов управления для таких манипуляторов.

На основе структурного анализа диссертантом сформулирована схема эволюционного развития кинематических схем механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры. Разработан алгоритм синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода, позволяющий значительно сузить границы поиска рациональных структурных схем манипуляторов. Задача структурного синтеза сформулирована как задача условной оптимизации и решается методами линейного программирования. Представлена методика и алгоритм геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода.

В основной части диссертационной работы решена прямая и обратная задачи кинематики манипуляторов параллельно-последовательной структуры, пред-

ставлен алгоритм формирования рабочей зоны. По разработанной автором методике определены коэффициенты нагруженности приводов манипулятора в зависимости от положения захвата. Сформулирована и решена задача формирования и планирования траекторий. Решена оптимизационная задача позиционирования манипулятора последовательно-параллельной структуры из условия минимума критерия обобщенных энергозатрат с ограничениями на принадлежность конфигурации манипулятора рабочей зоне. Исследованы параметры манипулятора при программных перемещениях захвата по прямолинейной траектории и по заранее неизвестной траектории при заданных законах изменения обобщенных координат манипулятора. Выведены условия знакопостоянства относительных скоростей исполнительных звеньев манипулятора параллельно-последовательной структуры при движении выходного звена по прямой. Представлены результаты моделирования программных движений вдоль различных траекторий.

Разработаны математические модели динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода на поворотном основании с двумя и тремя сосредоточенными массами. Приведена методика определения приведенных масс из условия равенства кинетических энергий реальной конструкции манипулятора и его расчетной схемы на парциальных движениях. Автором разработана математическая модель динамики привода с самотормозящейся передачей с учетом упругостей ее звеньев. Получены аналитические условия возникновения силового и динамического заклинивания передачи. Математические модели параллельно-последовательного манипулятора с двумя и тремя сосредоточенными массами, позволили решить оптимизационные задачи траекторного синтеза программных движений его исполнительных звеньев, методами современного вариационного исчисления. Проведено сравнение результатов численного и натурального моделирования полученных методом параметрического задания траектории и закона программных движений по оптимальным законам.

Для реализации полученных законом программных движений автором разработана экспериментальная установка, представляющая натуральный образец манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода, описаны разработанные архитектуры централизованной и распределенной систем управле-

ния манипулятором-триподом на подвижном основании для реализации синтезированных траекторий и программных движений исполнительных звеньев. Приводится описание программного обеспечения системы управления. Описан метод идентификации параметров математической модели по результатам экспериментальных исследований парциальных движений манипулятора. Определены собственные частоты манипулятора на основе спектрального анализа экспериментальных результатов. Приведены результаты численных и экспериментальных исследований динамики привода манипулятора.

Научная новизна, достоверность и степень обоснованности полученных результатов

Автору диссертационной работы, в целом, удалось решить поставленные задачи в соответствии с заявленной целью и получить ряд новых результатов:

1. Установлены закономерности эволюции структурных схем механизмов погрузочных манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода.

2. Разработаны метод и алгоритмы оптимального синтеза рациональных структурных схем механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода, позволяющие значительно сузить границы поиска целочисленных решений. Разработан метод геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов - триподов с четырьмя исполнительными линейными приводами и поворотным основанием, обеспечивающий соответствие значений показателей качества, сформулированных в техническом задании на выполнение погрузочно-разгрузочных работ.

3. Решена задача определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно-последовательной структуры, для задаваемого положения захвата, нахождением локального минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев. Решена задача формирования траекторий, выведены условия существования прямолинейной траектории в пределах зоны обслуживания и условий знакопостоянства линейных скоростей исполнительных

звеньев при движении выходного звена манипулятора-трипода по прямолинейной траектории.

4. Разработаны динамические модели манипулятора-трипода, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющие проводить расчеты динамики управляемого движения манипулятора. Сформулированы условия отсутствия силового и динамического заклинивания исполнительного привода с самотормозящейся передачей, учитывающие податливость звеньев и необратимые потери.

5. Получено решение задачи динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора-трипода из условия минимума ускорения захвата. Получены аналитические выражения условий устойчивости оптимальных траекторий захвата.

6. Разработана аналитическая методика параметрической идентификации жесткостных параметров звеньев привода манипулятора, основанная на спектральном анализе экспериментальных результатов. Разработаны программные средства для оператора и бортовой системы, обеспечивающие позиционирование захвата манипулятора при задании различных программных законов движения.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением фундаментальных положений механики, проведением параметрической идентификации по значениям динамических ошибок реальной электромеханической системы и принятой модели, а также сопоставлением и достаточной сходимостью результатов численного и натурного моделирования.

Выводы по главам работы соответствуют результатам исследований, а обобщенное заключение по проведенным исследованиям соответствует поставленной цели и задачам исследований.

Значимость полученных результатов научных исследований

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы Несмиянова И.А. заключается в разработанных методах структурного синтеза параллельно-последовательных механизмов, развитии геометрического синтеза ма-

нипуляторов параллельно-последовательной структуры, позволяющих на этапе проектирования создавать рациональные конструкции без избыточных связей и лишних подвижностей. Предложенные подходы к заданию траекторий выходного звена манипулятора параллельно-последовательной структуры по синтезированным законам позволяют осуществлять управление рабочим органом манипулятора по оптимальным траекториям и с минимальными инерционными нагрузками. Предложенный метод идентификации математической модели по результатам экспериментальных исследований парциальных движений манипулятора может использоваться для широкого спектра пространственных механизмов с электро-механическим приводом.

На основе полученных результатов автором разработан опытный образец манипулятор-трипода грузоподъемностью 2000 Н с системой контурного управления, позволяющей определять законы изменения управляющих сигналов, которые обеспечивают реализацию синтезированных законов изменения обобщенных координат манипулятора. Опытная эксплуатация манипулятора-трипода в составе робототехнического комплекса РШ-7 на базе шагающего шасси, а также погрузочный агрегат на базе самоходного колесного шасси Т-16МГ подтверждают практическую применимость полученных диссертантом результатов прежде всего в сельском хозяйстве и строительстве, а также в других отраслях народного хозяйства,.

Замечания по диссертационной работе

1. Терминология. В современной научной литературе строго определены термины «звено», «зона обслуживания» и «рабочая зона». Однако, на стр. 130 автор пишет: «... рабочую зону обслуживания...». На стр. 103 написано: «... звенья переменной длины считаются за два звена», на стр. 135 «... усилия в линейных звеньях...», на стр. 136 «... при предварительно выдвинутом штоке звена 3 и вдвинутом штоке звена 2».

2. Система уравнений (3.2) на стр. 128 является одним из решений нелинейной системы (3.1), однако, автор не указал, почему выбрано именно это решение.

3. При решении задачи позиционирования минимизируется квадратичная функция (3.20) на стр. 149, содержащая перемещения наиболее нагруженных исполнительных звеньев манипулятора. Сказано, что весовые коэффициенты являются отношением веса груза к усилиям в приводах, то есть величинами переменными, однако, в дальнейшем они полагаются постоянными.

4. В разделе 4.3.3 на стр. 193 при исследовании устойчивости манипулятора не учтены параметры системы управления с обратными связями и взаимовлияние приводов. Отбрасывание слагаемых с производными высших порядков должно быть более обоснованным.

5. В работе обнаружен ряд опечаток. Во втором уравнении системы (3.2) на стр. 128 в третьем слагаемом пропущен показатель степени. В равенствах (3.5) и (3.6) на стр. 129 в обозначениях одного и того же угла используются то маленькие, то большие буквы ϕ . На стр. 130 в системе уравнений (3.7) в функции $\phi(t)$ имеется опечатка, так как при $DK^2 + Ok^2 = OA^2$ и $l_4 = 0$ оказывается, что $\phi(t) > \pi/2$. Эта система получена на основе рис. 3.1 (стр. 127), однако, в уравнениях вместо букв O и O_1 используются буквы K и O , что затрудняет понимание. На рис. 3.2 в отличие от рис. 3.1 глобальная ось y не пересекает ось вращения поворотного основания BC . На стр. 132 в табл. 3.1 в строках M_1M_3 и M_2M_3 показаны движения одновременно двух приводов, однако, на рабочей зоне на рис. 3.2 этим движениям соответствуют не сферические площадки, а кривые M_1M_3 и M_2M_3 .

Заключение

Отмеченные замечания не снижают общих достоинств диссертационной работы, не требуют дополнительных исследований или доработки. Диссертация Несмиянова И.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлены результаты решения научной проблемы структурного синтеза, механики, синтеза и реализации программных траекторий выходного звена манипуляторов параллельно – последовательной структуры на основе трипода, имеющих важное значение для проектирования и создания перспективных манипуляционных систем.

Области науки исследований диссертационной работы, его научная новизна и результаты соответствуют паспорту специальности 05.02.18 – Теория механизмов и машин.

Материалы диссертации опубликованы более чем в семидесяти научных работах, включая работы по перечню ВАК и индексируемых в базах данных РИНЦ и Scopus. Техническая новизна предлагаемых решений защищена патентами на изобретения, на полезную модель и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Содержание автореферата соответствует диссертации, ее структуре и удовлетворяет всем пунктам «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На основании ознакомления с содержанием диссертации, автореферата и опубликованных автором работ можно сделать заключение, что представленная диссертация представляет собой законченную научно – исследовательскую работу, обладает внутренним единством, содержит новые результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку. В диссертационной работе Несмиянова Ивана Алексеевича решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (п. 9 – 14), утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, которые предъявляются к диссертациям на соискание доктора наук, а ее автор, Несмиянов Иван Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.18 – Теория механизмов и машин .

Отзыв на диссертационную работу рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Теория механизмов и машин» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» 10 октября 2017 г., протокол № 2.

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Почтовый адрес: Россия, 195251, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая, дом 29.

Телефон/факс: +7 (812) 297-20-95

E-mail: office@spbstu.ru

Заведующий кафедрой

«Теория механизмов и машин»,

к.т.н., доцент



Евграфов Александр Николаевич

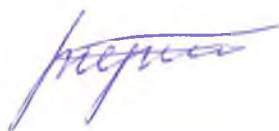
Отзыв составили:

Д.т.н., профессор



Каразин Владимир Игоревич

к.т.н., доцент



Терешин Валерий Алексеевич

Подписи заверяю

Подпись Евграфова А.Н., Каразина В.И., Терешина В.
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам Киселева Л.А.
«10» ОКТ. 2017 г. 