

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования

«Московский политехнический университет»,

к.т.н.



/ А.Ю. Наливайко /

07.09

2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Ларюшкина Павла Андреевича

«Синтез и анализ механизмов параллельной структуры с использованием технически обоснованных условий близости к особым положениям», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2 – «Машиноведение»

Актуальность темы диссертационной работы

Машиностроение, для решения новых задач в различных отраслях народного хозяйства с целью качественного изменения и повышения конкурентоспособности продукции, нуждается в развитии современных и разработке новых методов проектирования механизмов, обладающих более широким диапазоном функциональных характеристик, повышенными быстродействием, точностью, надежностью. Манипуляционные роботы параллельной структуры и системы на их основе способны обеспечить решение таких задач. Однако показатели эффективности работы известных механизмов данного класса существенно зависят от особенностей движения механизмов вблизи т.н. особых положений, что сопряжено с высокой вероятностью появления нежелательных эффектов, вызывающих ухудшение характеристик. Это, в частности, частичная или полная потеря степеней

свободы, неконтролируемое движение отдельных кинематических цепей или всего механизма. Как следствие, вблизи особых положений неконтролируемо растут динамические нагрузки на структурные элементы кинематических цепей, снижаются их жесткость и устойчивость. Для решения указанных и других проблем проектирования и практического использования механизмов параллельной структуры требуются новые, научно обоснованные подходы качественных и количественных оценок работы вблизи особых положений.

Тема диссертационной работа актуальна, поскольку посвящена решению малоизученной научной проблемы и разработке методов моделирования и исследования условий работы механизмов данного класса вблизи особых положений. Методы могут быть использованы при решении задач синтеза и анализа широкой линейки реальных механизмов. Актуальность темы также подтверждается анализом результатов научных исследований и публикаций, посвященных перспективным разработкам в данной области.

Содержание диссертации

Диссертация включает введение, восемь глав, заключение, список литературы из 278 публикаций. Объем диссертации составляет 304 страницы, содержащих 6 таблиц и 121 рисунок.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и решаемые задачи, показаны научная новизна и практическая значимость выполненной диссертационной работы.

Первая глава посвящена изучению практики применения, достижений в проектировании и исследовании движения механизмов параллельной структуры вблизи особых положений. Изучены известные подходы для снижения негативного влияния особых положений, показаны их достоинства и недостатки, а также ограничения при применении на практике.

Во второй главе разработана классификация особых положений по типу изменения подвижности механизмов. Для ряда основных видов особых положений сформулированы теоретические условия, применительно к

винтовому исчислению, предложены методы расчета значений критериев близости. Разработаны и реализованы алгоритмы расчетов, использующие винтовое исчисление и анализ матрицы Якоби манипулятора. Особое внимание уделено неочевидным особенностям, которые могут проявляться при расчетах в зависимости от изменения структуры механизмов. Одной из главных особенностей является то, что, в качестве критериев близости к особым положениям, предложено использовать максимальные скорости перемещения и изменения динамических нагрузок на выходные звенья. Использование новых критериев позволяет сформулировать условия недопустимой близости реальных механизмов к особым положениям, при достижении которых значения функциональных характеристик механизмов снижаются до уровня, неприемлемого для эффективной работы.

В третьей главе выполнен структурный анализ механизмов типа Delta с четырьмя и шестью степенями свободы, для которых применение расчетных методов представляется наиболее рациональным. На основе результатов анализа структуры кинематической цепи подобного механизма параллельной структуры, сформулированы уравнения связей. Для анализа особых положений применен алгоритм перебора точек пространства с заданным шагом. В каждой точке, в зависимости от решаемой задачи, рассчитаны значения определителя одной из W матриц механизма, наличие особых положений определено по изменению знака определителя между соседними точками. Для некоторого сечения рабочей зоны приведен пример расчета критериев близости к особым положениям видов «ПС» и «ПУ», согласно классификации автора. Валидность алгоритма подтверждена результатами сравнительного решения данной группы задач двумя другими (известными) методами. Особенность анализа механизмов данного типа с четырьмя степенями свободы заключалась в усложнении структуры дополнительной кинематической цепью. При этом, система силовых винтов таких механизмов становится более сложной. Достоверность результатов также подтверждена

результатами решения задач другими методами, что позволяет говорить о корректности подхода и адекватности расчетных оценок.

Четвертая глава посвящена исследованию поступательно-направляющих механизмов. Изучена структура, выполнен анализ рабочей зоны и особых положений. Рассмотрено движение механизмов вблизи особых положений видов «ПС» и «ПУ». Затем проанализированы особые положения, характеризующиеся вырождением связей. В частности, при расчете критериев близости к особому положению вида «ПУ», наблюдается рост данных значений как вблизи ожидаемых областей, так и в зонах особых положений другого вида. Ранее, во второй главе, автор прогнозирует возможность данного нежелательного эффекта вследствие особенностей методик расчета координат силовых винтов в механизмах, кинематические цепи которых имеют различные виды ограничений (связей) на движение выходного звена. В четвертой главе, используя предложенный во второй главе подход, автор устраняет данный эффект, что хорошо коррелируется с расчетными прогнозными ожиданиями. Подход наглядно демонстрирует возможность его эффективного использования для анализа движения реальных механизмов данного типа вблизи особых положений, при условии вырождения структурных связей.

В пятой главе исследовано семейство сферических механизмов с круговой рельсовой направляющей. Базовый механизм данного типа имеет три вращательных степени свободы. Другие схемы механизмов семейства получены за счет введения дополнительной кинематической цепи. В качестве примера показано, что, в наиболее общем случае, может быть получен механизм с четырьмя степенями свободы. При исследовании движения механизмов вблизи особых положений, дан детальный анализ результатов расчетов, с учетом особенностей математических моделей, использованных для описания ориентации выходного звена подвижной платформы. Если ориентация задается углами поворота, то при дифференцировании уравнений связей необходимо выполнить переход от производных данных углов к

угловым скоростям выходного звена. Показано также, что, если данный переход не будет осуществлен, то возможны ошибки в определении зон особых положений. При использовании матрицы перехода, проблема устраняется, однако остается возможность вырождения самой матрицы перехода. Данный эффект может проявляться в виде резкого роста значения критериев близости к особым положениям. При этом, для устранения проблемы, достаточно изменить шаг перебора.

В шестой главе, на примерах шарнирного пятизвенного и сферического механизмов, показано, что в одной точке траектории движения возможно возникновение двух особых положений различных видов одновременно. При этом установлено, что в подобных случаях рост значений динамических реакций в подвижных соединениях имеет место не для всех направлений действия внешней нагрузки. Для устранения нежелательного эффекта, предложено использовать, вместо общепринятого силового, скоростное условие оценки близости механизма к таким особым точкам.

В седьмой главе представлены алгоритм, методика и результаты экспериментального исследования механизмов параллельной структуры. Одним из объектов эксперимента стал механизм типа Delta с четырьмя степенями свободы. Исследован процесс передачи внешней нагрузки, приложенной к выходному звену, на привод механизма, для точки, удаленной от особых положений движения. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими моделями и результатами расчетов. Рассмотрено также влияние изменения нагрузки на привод при приближении к особому положению. Кроме того, исследовано влияние жесткости структурных элементов механизма на погрешность расчетов. Установлена и сформулирована обратная корреляция между изменением жесткости и погрешностью. Показано, что, в сравнении с экспериментом, результаты теоретического моделирования дают диапазон изменения нагрузок на привод с определенным запасом по перегрузке. Предложен также подход коррекции расчетных данных с использованием матрицы жесткости.

Восьмая глава демонстрирует применение предложенных методов и алгоритмов к проектированию реальных манипуляционных роботов на основе механизмов типа Delta с четырьмя степенями свободы. Выполнен синтез с учетом заданных ограничений конструктивных параметров. Скоростные и силовые критерии использованы для валидации оценок размеров рабочей зоны в соответствии с техническим заданием. Обоснован выбор типа приводов (шаговых двигателей и передач винт-гайка качения), рассчитаны нагрузки, действующие в подвижных соединениях. По результатам расчетов спроектирован механизм, сначала в виде трехмерной масштабной модели, затем – в виде опытного образца.

В заключении обобщены результаты проведенных исследований, сделаны выводы, имеющие научное и практическое значение.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Синтезированы новые схемы механизмов параллельной структуры различных типов, в частности, сферических с круговой направляющей, поступательно-направляющих и Delta.

2. На основе теории винтов, разработана классификация видов особых положений для четырех типов механизмов параллельной структуры, для случаев изменения подвижности при анализе рабочей зоны.

3. Предложены и апробированы методики численных оценок близости к особым положениям механизмов параллельной структуры различных типов на основе анализа скоростей приводов, изменений активных сил и динамических реакций, позволяющих, при проектировании, варьировать и оптимизировать функциональные характеристики механизмов.

4. Разработаны математические модели кинематики механизмов параллельной структуры с различным числом степеней свободы, на основе теории винтов и с использованием матрицы Якоби. Модели позволяют проводить корректный сравнительный анализ кинематических характеристик проектируемых механизмов различными методами.

Обоснованность и достоверность научных положений и результатов исследования основывается на применении фундаментальных положений и апробированных методов теории механизмов и машин, других научных дисциплин, современных алгоритмических методов, методик и прикладных программ автоматизированного моделирования объектов, валидация которых осуществлена путем экспериментального проектирования и исследования моделей и образцов новых механизмов.

Практическая значимость исследования:

1. Разработаны и апробированы методики проектирования реальных механизмов параллельной структуры на основе валидных математических моделей, интегрированных в прикладные компьютерные программы.

2. Разработаны алгоритмы расчета особых положений синтезированных механизмов, основанные на теории винтового исчисления и реализованные с помощью компьютерных прикладных программ.

3. Разработана модель нового механизма типа Delta с четырьмя степенями свободы для экспериментального исследования и анализа функциональных характеристик механизма вблизи особых положений.

4. Разработана и апробирована методика расчетов диапазонов нагружения реальных механизмов параллельной структуры типа Delta с четырьмя степенями свободы с помощью шаговых двигателей.

5. Обоснована и подтверждена экспериментальными данными зависимость изменения жесткости структурных элементов механизмов при движении вблизи особых положений.

Замечания по работе

1. В научном обзоре литературы практически нет ссылок на отечественные разработки, за исключением упоминания нескольких прототипов.

2. Не вполне ясно, как были выбраны исследуемые срезы рабочих зон при анализе движения проектируемых механизмов?

3. В третьей главе, на с. 162 указано, что итерационный анализ выполнен путем вычисления определителя матрицы W , хотя ранее написано, что, для

определения особых положений, например, типа «BC», требуется рассмотрение величины $\det(A)\det(W)$.

4. В шестой главе речь идет о точках особых положений типа 3 по классификации Госслена–Анджелеса. Тогда почему для решения этой задачи не используется предложенная в работе классификация?

5. Зачем на выходном звене экспериментальной модели механизма используются телескопически установленные латунные трубки (см. седьмую главу, рис. 7.4)?

6. В тексте не приводятся листинги разработанных прикладных программ, которые могли бы быть полезны другим исследователям, желающим использовать и развивать результаты исследования автора. Их можно было бы привести в виде отдельного приложения.

Приведенные замечания не снижают ценности выполненного исследования и полученных результатов, и поэтому они не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертация П.А. Ларюшкина «Синтез и анализ механизмов параллельной структуры с использованием технически обоснованных условий близости к особым положениям», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2 – «Машиноведение», является законченной научно-квалификационной работой. В работе сформулирована и решена научная проблема, имеющая важное значение для развития методов проектирования и практического использования в народном хозяйстве механизмов параллельной структуры и роботизированных систем на их основе.

Диссертация хорошо структурирована и написана грамотным научным языком, ее содержание соответствует заявленным пунктам паспорта научной специальности. Автореферат диссертации составлен по установленной форме и полностью отражает основное содержание диссертации. Результаты

исследования представлены в 47 публикациях, из них 35 статей в изданиях, включенных в Перечень ВАК, а также индексируемых в международных базах данных. Кроме того, получено 5 патентов на изобретения и одно свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертация «Синтез и анализ механизмов параллельной структуры с использованием технически обоснованных условий близости к особым положениям» соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор – Ларюшкин Павел Андреевич, безусловно, заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2 – «Машиноведение».

Отзыв принят по результатам обсуждения диссертационного исследования на заседании кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», протокол № 1 от 31.08. 2023 г.

Профессор кафедры
«Техническая механика
и компьютерное моделирование»,
д.т.н., доц.

В.Н. Говердовский

Заведующая кафедрой
«Техническая механика
и компьютерное моделирование»,
к.т.н., доц.

Ю.И. Бровкина

Контакты ведущей организации:
Московский политехнический университет
Адрес: 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38
Телефон: +7 495 223 05 23
Электронная почта: mospolytech@mospolytech.ru

подпись Говердовского В.Н.
Бровкиной Ю.И. заверяю

ДЕЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬ
ПОГОРЕЛОВА А.В.

