

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.075.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА МАШИНОВЕДЕНИЯ  
ИМ. А.А. БЛАГОНРАВОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 24.10.2023 г. № 10

О присуждении Ларюшкину Павлу Андреевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Синтез и анализ механизмов параллельной структуры с использованием технически обоснованных условий близости к особым положениям» по специальности 2.5.2. Машиноведение принята к защите 11 июля 2023 г. (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.1.075.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, почтовый адрес: 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации о выдаче разрешения на создание совета от 22.03.2022 г. № 264/нк.

**Соискатель** Ларюшкин Павел Андреевич, 7 августа 1988 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка и исследование пространственного манипулятора параллельной структуры с тремя поступательными степенями свободы для робототехнических систем предприятий текстильной и лёгкой промышленности» защитил в 2013 году в диссертационном совете, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет

дизайна и технологии», работает доцентом кафедры основ конструирования машин в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на кафедре основ конструирования машин.

**Научный консультант** – доктор технических наук, профессор **Захаров Михаил Николаевич**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой основ конструирования машин.

**Официальные оппоненты:**

**Жога Виктор Викторович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», профессор кафедры «Динамика и прочность машин»;

**Лагерев Игорь Александрович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, и.о. ректора;

**Марковец Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», заведующий кафедрой машиностроения **дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет» в своем **положительном отзыве**, подписанном Говердовским Владимиром Николаевичем, доктором технических наук, доцентом, профессором кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование» и Бровкиной Юлией Игоревной, кандидатом технических наук, доцентом, заведующей кафедрой Техническая механика и компьютерное моделирование», обсужденном на заседании кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование» (протокол № 1 от 31.08.2023 г.) и утвержденном кандидатом технических наук, проректором по научной работе Наливайко Антоном Юрьевичем, **указала**, что 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 публикациях в изданиях, включенных в Перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных; получены патенты на изобретения и полезные модели, а также свидетельство о 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.

В отзыве ведущей организации в качестве замечаний отмечено следующее:

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 исследователями, желающим использовать и развивать результаты исследования автора. Их можно было бы привести в виде отдельного приложения.

Соискатель имеет 48 **опубликованных работ**, в том числе по теме диссертации опубликовано 47 работ, из них - в рецензируемых научных изданиях 35 работ. Кроме того, соискателем получено 3 патента РФ на изобретения, 2 патента РФ на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В диссертации **отсутствуют недостоверные сведения** об опубликованных соискателем работах.

Общий объем опубликованных работ составляет 21,34 п.л., в том числе личный вклад автора 14,91 п.л. Объем работ, опубликованных в рецензируемых изданиях, составляет 17,71 п.л., в том числе личный вклад автора 12,20 п.л.

**Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:**

1. Laryushkin P., Fomin A., Antonov A. Kinematic and Singularity Analysis of a 4-DOF Delta-Type Parallel Robot // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2023. Vol. 45, №4. Article 218. (1,06 п.л. / 0,7 п.л., в работе лично соискателем проведен анализ подвижности кинематики, рабочей зоны и особых положений механизма);

2. Ларюшкин П.А. Определение обобщенных реакций в механизмах параллельной структуры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. №9 (750). С. 54–62. (0,38 п.л.);

3. Ларюшкин П.А. Исследование особых положений механизма параллельной структуры с шестью степенями свободы типа гексаглайд // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 3 (303). С. 31–37. (0,44 п.л.);

4. Ларюшкин П.А. Об углах между подпространствами силовых винтов в механизмах параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. №6. С. 10–20. (0,69 п.л.);

5. Novel Reconfigurable Spherical Parallel Mechanisms with a Circular Rail / P. Laryushkin [et al.] // Robotics. 2022. Vol. 11, №2. Article 30. (0,56 п.л. / 0,3 п.л., в работе лично соискателем проанализирована подвижность семейства механизмов);

6. Ларюшкин П.А. Экспериментальное исследование передачи усилия в механизме типа Delta, с четырьмя степенями свободы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. №5. С. 3–13. (0,69 п.л.);

7. Ларюшкин П.А. Оценка близости к особым положениям механизмов параллельной структуры путем дифференцирования уравнений связи // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2019. №1. С. 71–83. (0,81 п.л.);

8. Исследование особых положений механизма параллельной структуры семейства Delta с четырьмя степенями свободы / П.А. Ларюшкин [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. №6. С. 34–41. (0,5 п.л. / 0,4 п.л., в работе лично соискателем создана математическая модель кинематики механизма и алгоритмы построения рабочей зоны и поиска особых положений);

9. К расчету механизмов типа Delta с линейными приводами и различным числом степеней свободы / П.А. Ларюшкин [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. №3. С. 19–26. (0,5 п.л. / 0,4 п.л., в работе лично соискателем созданы математические модели различных механизмов и исследована их кинематика);

10. Laryushkin P., Glazunov V., Erastova K. On the Maximization of Joint Velocities and Generalized Reactions in the Workspace and Singularity Analysis of Parallel Mechanisms // Robotica. 2019. Vol. 37, №4. P. 675–690. (1,0 п.л. / 0,8 п.л. в работе лично соискателем теоретически обоснованы методы оценки близости к особым положениям, предложены алгоритмы вычисления соответствующих критериев и проведены расчеты механизмов);

11. Эрстова К.Г., Ларюшкин П.А. Рабочие зоны механизмов параллельной структуры и способы определения их формы и размеров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. №8 (689). С. 78–87. (0,63 п.л. / 0,31 п.л., в работе лично соискателем разработаны математические модели механизмов и алгоритмы построения рабочих зон);

12. Ларюшкин П.А. Классификация и условия возникновения особых положений в механизмах параллельной структуры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. №1 (682). С. 16–23. (0,5 п.л.);

13. Ларюшкин П.А., Рашоян Г.В., Эрстова К.Г. Об особенностях применения винтового исчисления для оценки близости к особым положениям механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. №4. С. 39–45. (0,44 п.л. / 0,33 п.л., в работе лично

соискателем теоретически обоснован способ оценки близости к особым положениям механизма с применением винтового исчисления);

14. Структурный анализ и решение обратной задачи о положениях сферического механизма параллельной структуры / П.А. Ларюшкин [и др.] // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 34–36. (0,19 п.л. / 0,1 п.л., в работе лично соискателем выведены уравнения связи и аналитически решена обратная задача о положениях);

15. Ларюшкин П.А., Глазунов В.А., Эрастова К.Г. Определение максимальных усилий в приводах манипуляторов параллельной структуры по заданной величине внешней нагрузки // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 2 (47). С. 40–46. (0,44 п.л. / 0,3 п.л., в работе лично соискателем предложен метод и алгоритмы определения приводных усилий);

16. Laryushkin P.A., Glazunov V.A. A New 3-DOF Translational Parallel Manipulator: Kinematics, Dynamics, Workspace Analysis // Romansy 19 - Robot Design, Dynamics and Control. Proceedings of the 19th CISM-Iftomm Symposium. 2012. P. 11–18. (0,5 п.л. / 0,4 п.л. в работе лично соискателем созданы математические модели кинематики и динамики механизма и проанализирована его рабочая зона);

#### **На диссертацию и автореферат поступили отзывы:**

**1.** От официального оппонента Жюги Виктора Викторовича. **Отзыв положительный.** В качестве замечаний отмечено следующее:

– на странице 91 указано, что для статически определимых механизмов обобщенные реакции можно вычислить с использованием уравнений равновесия, учитывающих все внешние силы и реакции в механизме (классический силовой анализ). При этом отмечено, что большее количество уравнений не является проблемой при современном развитии вычислительной техники, за исключением случая, когда расчеты производятся на встраиваемых системах. Можно предположить, что речь идет о расчетах в реальном масштабе времени в процессе работы механизма. Но существует ли реальная необходимость проводить подобные вычисления в таких условиях?

– рисунок 3.13.б, по сути, дублирует рисунок 3.13.а, т.к. на последнем показаны все винты, и не имеет смысла выносить одну кинематическую цепь на отдельный рисунок;

– определение матриц Грама (страница 165) можно было бы упростить, записав  $\mathbf{G} = \mathbf{W}^T\mathbf{W}$ . Также имеются опечатки в индексах;

– на странице 236 написано, что во всех экспериментах наблюдался срыв только одной из кареток. При этом в таблице 7.2. для нескольких направлений внешней силы значения критической силы близки для двух кареток. Логично было бы предположить, что в таком случае срыв должен наблюдаться для обеих кареток с несколько разной вероятностью;

– на рисунке 7.6, судя по всему, перевернута шкала;

– в работе не рассматриваются механизмы с гибридной структурой.

Применимы ли к ним предложенные критерии и методы?

– в последней главе диссертации желательно было бы привести результаты технико-экономических расчетов.

**2. От официального оппонента Лагерева Игоря Александровича. Отзыв положительный.** В качестве замечаний отмечено следующее:

– во введении при описании реализации результатов работы следовало бы указать в каких именно научно-исследовательских проектах автор был участником, а в каких – руководителем;

– в заголовке таблицы 1 приведенный в пример робот назван механизмом SCARA с параллельной кинематической структурой, что не совсем корректно, т.к. робот, подразумеваемый под аббревиатурой SCARA, имеет вполне конкретную последовательную структуру;

– обратная матрица Якоби по тексту диссертации обозначена  $\mathbf{J}_{об}$ , и автор отмечает, что в общем случае данная матрица не квадратная. Но при анализе механизмов рассматриваются только случаи с квадратной матрицей, поэтому автор мог бы использовать более привычное обозначение  $\mathbf{J}^{-1}$ ;

– неясно, почему при анализе механизмов винты приводятся к выходному звену, а не к началу неподвижной системы координат;



– в качестве примеров представлены расчеты для механизмов с шестью, четырьмя, тремя и двумя степенями свободы. Пример механизма с пятью степенями свободы не рассмотрен;

– восьмая глава посвящена конструированию механизма для установки трехмерной печати, при этом сама установка в главе не показана.

**3. От официального оппонента Марковца Алексея Владимировича. Отзыв положительный.** В качестве замечаний отмечено следующее:

– в первой главе, при обзоре литературных источников, большинство ссылок приходится на работы зарубежных авторов, что может создавать ложное впечатление об отсутствии исследований данной проблемы отечественными учеными;

– во второй главе вызывают некоторую сложность восприятия отдельные формулы и математические выражения ввиду использования большого количества верхних и нижних индексов. Также термин «Плюккерovy координаты» следует писать с маленькой буквы;

– в третьей главе, при рассмотрении примеров механизмов, приводится процент потери объема рабочего пространства из-за особых положений. При этом не совсем понятно, почему автор указывает результаты для наклона платформы в 45 градусов, а не для максимального исследованного в главе значения, равного 60 градусам (стр. 128 и стр. 143);

– в четвертой главе при анализе возможности вырождения связей на примере разработанного автором механизма с тремя степенями свободы и поступательно-направляющим типом движения следовало бы учесть, что большинство его промежуточных звеньев скорее всего испытывают изгибную нагрузку. Данный недостаток, однако, не снижает научной ценности рассмотрения подобного механизма в рамках исследования явления вырождения связей;

– в пятой главе при описании рисунка 5.19 (стр. 203) говорится о некоторых «отдельных» точках и о том, что можно видеть, что это точки особых

положений типа «ПУ», но при этом не совсем понятно о каких именно точках речь, и как это можно видеть;

– в тексте шестой главы было бы уместнее придерживаться авторской классификации особых положений, а не прибегать к одной из известных классификаций, а именно Анджелеса-Госслена;

– в седьмой главе особое внимание уделяется чистоте эксперимента и мерам по снижению соответствующих погрешностей, однако погрешность измерений динамометра и то, как она влияет на результаты измерений нигде не приводится;

– в восьмой главе, на стр. 256 указано, что размеры рабочей зоны составляют  $300 \times 300 \times 300$  мм при диаметре буртика, равном 7 мм. Вызывает определенные сомнения точность размеров рабочей зоны вплоть до 1 мм.

**Также на автореферат диссертации поступило 11 (одиннадцать) отзывов (все отзывы положительные):**

1. От доктора технических наук, профессора Волкова Глеба Юрьевича, профессора кафедры «Машиностроение» ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет». В качестве замечаний отмечено следующее:

– это замечание относится не столько к данной работе, сколько к общей, уже сложившейся традиции использования термина «механизмы параллельной структуры». Вы сравниваете манипуляторы с манипуляторами. Достаточно корректным представляется выражение «манипуляторы (роботы) параллельной структуры». Механизм же – понятие более общее. Все цикловые механизмы характеризуются замкнутыми кинематическими цепями, которые часто являются многоконтурными;

– в автореферате отсутствует нумерация формул;

– автор не поясняет что за операция обозначена символом « $\circ$ ».

2. От доктора физико-математических наук, профессора Косенко Ивана Ивановича, профессора кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». В качестве замечания отмечено следующее:

– для оценки близости к особым положениям одного из типов предлагается использовать значения скоростей в активных парах механизма. При этом очевидно, что скорости в пассивных парах также могут быть ограничены, например, типом используемых подшипников. Из текста автореферата не понятно, позволяет ли предлагаемая методика каким-либо образом учитывать скорости в пассивных кинематических парах.

**3.** От кандидата технических наук, доцента Терешина Валерия Алексеевича, доцента кафедры теории машин и механизмов ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». В качестве замечаний отмечено следующее:

– приближение скоростей и реакций к допустимым значениям может происходить далеко от особых положений;

– в работе нет оценок влияния геометрических погрешностей и сил трения на формы критических областей;

– автор справедливо указывает, что в особой точке Якобиан меняет знак, однако существуют механизмы, в которых особыми являются не точки, а конечные интервалы с большими перемещениями звеньев.

**4.** От кандидата технических наук Приходько Александра Александровича, доцента кафедры технической механики и специальных машин им. профессора А.А. Петрика ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». В качестве замечаний отмечено следующее:

– автором проводится исследование кинематики новых, оригинальных механизмов параллельной структуры. Однако, прежде чем проводить кинематический анализ новых механизмов, необходимо определить его подвижность для выявления обобщенных координат. Из текста автореферата непонятно, с помощью каких методов и структурных формул автор определял подвижность разработанных механизмов;

– в восьмой главе проводится разработка реального устройства на базе синтезированных механизмов. Диссертант исследует усилия и нагрузки на элементы конструкции, утверждает о достаточной прочности ее деталей, при

этом не показывается расчетная схема нагружения звеньев механизма, а также не приводятся математические методы или программные пакеты конечно-элементного моделирования, используемые при расчете конструкции на прочность.

**5.** От доктора технических наук, профессора Яцуна Сергея Федоровича, заведующего кафедрой механики, мехатроники и робототехники ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет». В качестве замечаний отмечено следующее:

– не понятно, являются ли вектора и винты, упоминаемые в автореферате, столбцами или строками, что затрудняет понимание некоторых формул, в которых применяются матричные операции;

– автор никак не обосновывает выбор критерия Андерсона-Дарлингга для проверки принадлежности выборок нормальному распределению.

**6.** От доктора технических наук, профессора Рыжковой Елены Александровны, заведующей кафедрой автоматики и промышленной электроники ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)». В качестве замечания отмечено следующее:

– в качестве замечания можно отметить, что в автореферате не объясняется почему в изготовленных прототипах использовались шаговые двигатели, а не какой-либо другой тип двигателя.

**7.** От доктора технических наук, профессора Пожбелко Владимира Ивановича, главного научного сотрудника кафедры «Техническая механика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». В качестве замечаний отмечено следующее:

– добавленный в теории четвертый критерий «ПП» (представляющий широко известное в ТММ свободное вращение вокруг своей оси какого-либо звена рычажного механизма) вообще не влияет на возникновение исследуемых в данной работе особых положений выходной платформы и его следует исключить

из предлагаемой классификации особых положений манипулятора (оставив в ней только три – «ПС», «ПУ» и «ВС»);

– как влияют на возникающие особые положения платформы манипулятора и его рабочее пространство наличие в реальном приводе механизмов параллельной структуры: а) избыточных связей в его структуре; б) упругости рычажных звеньев; в) трения во всех кинематических парах; г) связанной кинематики движений входных звеньев?

– целесообразно расширить применение первых трех критериев классификации особых положений на примерах рычажных механизмов параллельной структуры, в которых вообще нет никаких особых положений.

**8.** От доктора технических наук, профессора Прейса Владимира Викторовича, профессора кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». В качестве замечаний отмечено следующее:

– из автореферата не ясно, чем предложенная автором классификация особых положений лучше существующих;

– на стр. 13 автореферата автор пишет, что исследовано пять разных значений угла наклона, но на рис. 3 приведены результаты расчета только для 60 градусов;

– автор не указывает, почему было выбрано значение  $z = 0,3$  м для анализа среза рабочей зоны механизма 6-PUS, а также аналогичные значения для других рассмотренных механизмов;

– в заключении не сформулированы рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы;

– низкое качество большинства представленных графиков. В ряде случаев для числовых значений не указаны единицы измерений. На одном и том же графике (например, рис. 7) часть графика представлена в цвете, а часть – в оттенках серого цвета.

**9.** От доктора технических наук, доцента Несмиянова Ивана Алексеевича, профессора кафедры «Механика», проректора по учебной работе и доктора

технических наук, доцента Воробьевой Натальи Сергеевны, заведующей кафедрой «Механика» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет». В качестве замечания отмечено следующее:

– на стр. 15, 19, 21 и 22 автореферата автор приводит результаты относительного отклонения (погрешностей в расчетах) итерационного анализа, порядок величин очень мал, от  $10^{-12}$  до  $10^{-9}$ . Не совсем ясно только как были получены такие отклонения и насколько такая точность оправдана с точки зрения применимости для практических расчетов при проектировании механизма.

**10.** От доктора технических наук, профессора Подураева Юрия Викторовича, заведующего кафедрой робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». В качестве замечаний отмечено следующее:

– на стр. 10 автор пишет, из значения обобщенной реакции можно вычислить максимальное значение усилия в приводе, но не приводит методики данного расчета;

– не расшифрованы обозначения структуры кинематических цепей: PUS, P(UU)<sub>2</sub>, RRRRR и т.д.

**11.** От доктора технических наук, профессора Хомченко Василия Герасимовича, профессора кафедры «Автоматизация и робототехника» ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет». В качестве замечаний отмечено следующее:

– из текста автореферата не ясно, что понимает автор под словосочетанием «технически обоснованные условия близости к особым положениям». Поскольку этот термин вынесен в название диссертации и является, по сути, ключевым, ему следовало в автореферате уделить большее внимание. Функционирование любого механизма, в том числе и рассматриваемых в диссертации, вполне можно обеспечить, исключая приближение к особым положениям. Если есть опасность приближения к особым положениям, то, по

нашему мнению, надо изменить конструкцию манипулятора, считая рассматриваемую конструкцию не совсем подходящей;

– не пояснено, с чем связано и при каких условиях приближение к особым положениям вызывает увеличение приводной скорости. Только ли приближение к особым положениям является причиной увеличения приводной скорости? Может определенное влияние оказывает и заданная траекторная скорость? Не переставлены ли здесь местами причина и следствие?

– вряд ли с инженерной точки зрения можно говорить об отклонениях порядка  $(10^{-9} - 10^{-12})\%$ . Это, по сути, нулевые отклонения. А приведенные в автореферате цифры – это, скорее всего, отклонения (округления) вычислительной машины.

**На замечания** из отзывов ведущей организации и официальных оппонентов, а также отзывов, поступивших на автореферат диссертации, соискателем при выступлении на защите диссертации **даны аргументированные ответы.**

**Выбор оппонентов и ведущей организации** обосновывается их высокой компетентностью и научными разработками в области машиноведения, а также значительным числом научных трудов, в том числе, по рассматриваемым в диссертации проблемам.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** методология оценки близости к особым положениям механизмов параллельной структуры с применением технически обоснованных условий, использующих в качестве критериев физически измеримые величины (скорости и силы), которая позволяет повысить точность и достоверность инженерных расчетов устройств, создаваемых на базе указанных механизмов;

**предложены** оригинальные методы и алгоритмы, базирующиеся на применении винтового исчисления и анализе матрицы Якоби механизма, и позволяющие определять наилучшие направления векторов скорости выходного звена и внешней нагрузки, для которых, соответственно, скорости в приводных

кинематических парах или реакции в кинематических цепях будут максимально возможными;

**доказана** применимость предложенных методов и алгоритмов к широкому классу механизмов параллельной структуры с различным числом степеней свободы и типом движения выходного звена, что обуславливает перспективность использования указанных методов и алгоритмов в науке и практике;

**введена** новая классификация особых положений механизмов параллельной структуры, включающая четыре их типа, соответствующих различным возможным вариантам изменения подвижности механизма.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** возможность отдельного рассмотрения угловых и линейных компонентов скорости выходного звена или внешней нагрузки и, соответственно, их вклада в рост значений приводных скоростей или реакций в кинематических цепях при приближении к особым положениям, что решает проблему нормализации векторов и винтов с различными по своей природе компонентами, и тем самым расширяет границы применимости предлагаемых методов;

**применительно к проблематике диссертации результативно использован** комплекс современных научных методов теории механизмов и машин, в том числе базирующихся на использовании винтового исчисления и анализе матрицы Якоби механизмов;

**изложены** аргументы в пользу рассмотрения кинематических и силовых винтов в качестве элементов шестимерного векторного пространства, что позволяет использовать при расчетах понятия и методы линейной алгебры, а также приведено теоретическое обоснование такой возможности;

**раскрыты** ранее неизвестные проблемы практического анализа особых положений механизмов параллельной структуры, а именно возможность вырождения матрицы Якоби в механизмах с вращательными степенями свободы вне особых положений и влияние приводных силовых винтов на значение



обобщенных реакций, соответствующих силовым винтам связей, а также предложены способы решения указанных проблем;

**изучена** взаимосвязь между погрешностью расчета усилий в приводных кинематических парах и изменением жесткости механизма в направлении действующей внешней нагрузки при приближении к особому положению, а также предложен способ корректировки расчетных значений усилий путем введения матрицы, учитывающей относительную жесткость кинематических цепей механизма;

**проведена модернизация** существующих математических моделей механизмов параллельной структуры, а также разработаны математические модели новых, ранее не изученных механизмов, позволяющие применять предложенные расчетные методы.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены:**

– методы определения рабочего пространства механизмов параллельной структуры с учетом близости к особым положениям, математическая модель кинематики нового механизма Delta с четырьмя степенями свободы, алгоритм решения обратной задачи о положениях нового механизма Delta с четырьмя степенями свободы и его программная реализация для микроконтроллера типа ARM Cortex-M в ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, при разработке программного обеспечения и в процессе эксплуатации экспериментальной установки, предназначенной для реализации аддитивных технологий в технологическом процессе изготовления печатных плат;

– методы расчета максимальных значений нагрузок на приводы механических устройств с параллельной кинематикой в АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий», г. Смоленск, для расчетов систем приводов мобильных и

стационарных систем ориентации, необходимых для обоснования выбора электродвигателей и назначения параметров механических передач приводов;

– методы определения эффективного рабочего пространства и оценки максимальных нагрузок на несущие элементы параллельных манипуляторов в ООО «Московский центр лазерных технологий» при проектировании механизма перемещения лазерной головки перспективной малогабаритной установки прямого лазерного выращивания;

– расчетные методики в АО «Композит», г. Королев, при определении требуемой эффективной зоны пробития каркасов, а также усилия пробития материалов вблизи особых положений, в зависимости от расположения области пробития в рабочей зоне станка для изготовления каркасов сложнопрофильных деталей из углерод-углеродных композиционных материалов на основе технологии иглопробития;

– результаты, полученные в диссертации, в учебный процесс ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре основ конструирования машин в рамках курса «Общая теория приводов» при подготовке магистров по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» и курса «Машиноведение» при подготовке аспирантов по научной специальности 2.5.2 «Машиноведение» при обосновании выбора исходных данных для проводимых студентами и аспирантами расчетов приводов и конструктивных элементов устройств на базе механизмов параллельной структуры;

**определены** перспективы практического использования предложенных расчетных методов при проектировании систем перемещения, позиционирования и ориентации, являющихся составной частью различного технологического оборудования;

**представлен** пример практического применения предлагаемых расчетных методов в инженерных расчетах при проектировании и конструировании

устройства перемещения печатных головок лабораторной установки для 3D-печати микроэлектроники.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** измерения проводились с применением сертифицированных измерительных устройств в соответствии с общепринятыми научными подходами к планированию и проведению эксперимента, после чего проводилась статистическая обработка полученных результатов;

**теория** построена на использовании общепринятых допущений, строгости математических выкладок, основанных на фундаментальных положениях механики и теории механизмов и машин, а также применении современных аналитических методов, основанных на винтовом исчислении и анализе матрицы Якоби механизма;

**идея базируется** на использовании современных знаний и обобщении передового опыта отечественной и зарубежной науки и техники в области синтеза и анализа механизмов параллельной структуры, а также анализе практического применения таких механизмов;

**использованы** полученные ранее результаты в области анализа особых положений механизмов параллельной структуры, в частности, аналитические данные о кривых особых положений плоских механизмов, совпавшие с авторскими данными, полученными в процессе итерационного анализа;

**установлено** наличие качественного совпадения авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, в частности, подтверждено наличие роста скоростей и усилий в приводах при приближении к особым положениям;

**использованы** современные методики компьютерного моделирования и методы объектно-ориентированного программирования для создания программных реализаций математических моделей механизмов и верификации аналитических зависимостей, полученных при их анализе.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

- разработке новой классификации особых положений, характеризующей тип изменения подвижности механизма;
- создании новых методов оценки близости к особым положениям различных типов на основе технически обоснованных условий, использующих физически измеримые критерии;
- создании математических моделей механизмов (в том числе новых) с различным числом степеней свободы, а также разработке практических алгоритмов и прикладных программ, позволяющих применять предложенные расчетные методики;
- разработке конструкции, сборке и отладке реальных устройств, предназначенных для экспериментальных исследований и использования в установке для 3D-печати микроэлектроники;
- проведении экспериментов, включая обработку и интерпретацию результатов.

**Основные результаты диссертационной работы** были доложены автором на следующих **научных конференциях:**

- 23я, 28я, 29я, 30я Международные инновационные конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС). Москва, 2011, 2016 – 2018;
- 19th, 20th, 23rd, 24th CISM-IFTToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY). Paris (France), 2012, Moscow, 2014, Sapporo (Japan), 2020, Udine (Italy) 2022;
- 4th European Conference on Mechanism Science (EuCoMeS). Santander (Spain), 2012;
- 14th IFTToMM World Congress. Taipei (Taiwan) 2015;
- 2nd International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education (AIMEE). Moscow, 2018;
- International Conference on Artificial Intelligence, Robotics and Control (AIRC). Cairo (Egypt) 2019;

– 15th International Conference “Intelligent Systems” (INTELS). Moscow, 2022.

**В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:**

1. Албагачиев А.Ю.: Вы измеряли статическую жесткость, но процесс работы механизма не статический: при изменении температуры жесткость будет меняться.

2. Албагачиев А.Ю.: С каких пор классификация является научной новизной?

3. Рашоян Г.В.: В докладе Вы говорите о точках. Все-таки, речь о точках или о положениях? Это разные вещи.

**Соискатель Ларюшкин П.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:**

1. Основная идея была показать концепцию. Жесткость может зависеть от температуры, но в первую очередь зависит от того, как и из чего изготовлено устройство. Учет подобных дополнительных факторов – это уже следующий этап развития данной работы.

2. Научная новизна классификации заключается в том, что впервые разделены все различные возможные типы изменения подвижности механизма, и, что самое важное, для них с использованием винтового исчисления получены четкие математические условия.

3. Речь идет о точках в рабочей зоне, которые соответствуют конфигурациям механизма, называемым особыми положениями.

**На заседании 24 октября 2023 года диссертационный совет принял решение** за решение научной проблемы совершенствования машин на базе механизмов параллельной структуры и расширения их функциональных возможностей за счет предложенных технически обоснованных критериев близости к особым положениям, имеющей важное хозяйственное значение, **присудить** Ларюшкину П.А. ученую степень доктора технических наук.

Диссертация охватывает основные вопросы решения поставленных научных задач и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается структурой содержания работы и полученными результатами.

Диссертация отвечает требованиям, установленным пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 16 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета

д.т.н., проф.



Глазунов Виктор Аркадьевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.т.н.

Ращоян Гагик Володяевич

Дата оформления заключения «26» октября 2023 года.