

На правах рукописи

УДК 621.01

Эрастова Ксения Георгиевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАШИН НА БАЗЕ МЕХАНИЗМОВ  
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЗА СЧЁТ КОРРЕКЦИИ ИХ  
РАБОЧИХ ЗОН**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Handwritten signature in blue ink, reading "Эрастова К.Г."

Москва, 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный руководитель: **Ларюшкин Павел Андреевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры основ конструирования машин  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Волков Глеб Юрьевич**  
доктор технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Машиностроение» ФГБОУ ВО  
«Курганский государственный университет»

**Карпов Валерий Эдуардович**  
кандидат технических наук, доцент, вице-  
президент РАИИ, начальник лаборатории  
робототехники НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва.**

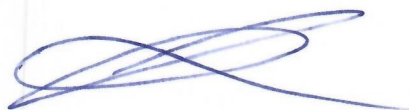
Защита диссертации состоится «1» июля 2022 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, корп. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, корп. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н.



Косицын Б.Б.

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время широкое распространение в различных областях техники и промышленности получили машины с параллельной кинематикой, основанные на механизмах с замкнутыми кинематическими цепями. Они находят применение в технологическом оборудовании, манипуляционных комплексах, установках, работающих в агрессивных средах, медицинском оборудовании, благодаря таким достоинствам, как повышенная жесткость, грузоподъемность и скорость манипулирования.

Однако механизмы параллельной структуры (МПС) обладают существенным недостатком: в некоторых положениях, называемых особыми, кинематическая структура механизма вырождается, и его выходное звено (или отдельные промежуточные звенья) могут потерять управляемость или подвижность. Кроме того, при приближении к особым положениям наблюдается снижение жёсткости механизма, повышение нагрузки на его приводы, что обуславливает необходимость тщательного анализа данных явлений на первых этапах конструирования. Также необходимо осуществлять подбор значений геометрических и других параметров механизма, обеспечивающих минимально возможные размеры областей, в которых влияние близости особых положений приводит к перегрузке привода или недопустимому снижению жесткости.

Помимо скорости манипулирования и грузоподъемности важным параметром любого устройства на базе МПС является размер его рабочей зоны. Форма и размер рабочей зоны зависит не только от геометрии механизма, но и различных конструктивных ограничений (предельных углов поворота шарниров, необходимости избегать опасного сближения подвижных частей и пр.). При этом часть рабочей зоны, в которой возможно поддержание в определяемых технологическим процессом пределах различных параметров движения выходного звена (скорости, ускорения, максимальной перемещаемой массы и т.д.), зачастую оказывается ещё меньше. Кроме того, при изменении технологических процессов, в которых используются устройства на базе МПС, изменяются и требования к таким устройствам, а значит и размер их рабочей зоны, которую можно использовать, не нарушая указанных требований. При этом основным фактором, влияющим на размер и форму такой рабочей зоны, в большинстве случаев является наличие или отсутствие особых положений внутри нее.

Таким образом, актуальной становится разработка новых методов, позволяющих более точно определять форму и размеры рабочих зон МПС за счёт учёта конструктивных особенностей машины, её динамики и жёсткости конструкции.

**Область исследований диссертации** соответствует пунктам 5 и 6 паспорта специальности 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин»: «Повышение точности и достоверности расчетов объектов машиностроения»; «Развитие фундаментальных положений родственных и смежных областей науки применительно к исследованию, проектированию и расчетам объектов машиностроения».

**Цель работы:** совершенствование машин на базе механизмов параллельной структуры за счет повышения точности определения их рабочих зон.

### **Задачи исследования:**

1. Обзор и анализ типовых конструкций, сфер и ограничений применения МПС в составе различных машин и устройств, существующих методов определения рабочих зон, преимуществ и недостатков этих методов.
2. Оценка влияния геометрических параметров МПС и дополнительной подвижности (наличие дополнительной вспомогательной подвижности или дополнительного привода) на форму и размеры рабочей зоны, разработка методов определения рабочей зоны с учетом требований к жесткости, скорости перемещения рабочего органа и грузоподъемности.
3. Экспериментальная проверка разработанных расчетных методов на макете робота-манипулятора с целью их верификации.
4. Оптимизация конструктивных параметров реального производственного оборудования с МПС, требующего перепрофилирования, при условии обеспечения требуемых характеристик устройства с учётом заданных ограничений (конструктивных, эксплуатационных, экономических и др.).

### **Научная новизна:**

1. Для устройств на базе механизмов параллельной структуры разработаны методы расчета размеров рабочих зон, предусматривающие определение наихудших направлений движения выходного звена и внешней силы на основе анализа близкой к вырождению матрицы Якоби, и последующее сравнение определённых для этих нагрузок моментов, скоростей и жёсткости с номинальными параметрами привода.
2. Предложен экспериментальный метод уточнения свободных от резонансных явлений рабочих зон машин с параллельной кинематикой с шаговыми двигателями по результатам мониторинга спектрограмм в процессе движения с разными скоростями.
3. Получены новые результаты в части оптимизации эффективных рабочих зон устройств на базе МПС, позволяющие усовершенствовать подходы к их конструированию (выбор размеров и формы звеньев, расположения приводов, конструкции шарниров, типа двигателей) при условии обеспечения требуемой жесткости конструкции, мощности двигателей и стоимости отдельных узлов.

### **Практическая значимость работы:**

1. Разработаны прикладные программы, реализующие расчеты кинематики и статики МПС (в том числе с избыточностью), алгоритмы расчета рабочих зон, а также алгоритмы оптимизационного параметрического синтеза (подбора геометрических параметров МПС).
2. Создана натурная модель-прототип манипулятора для сборки дистанционирующих решеток энергетических реакторов на базе плоского пятизвенного механизма, позволяющая проводить различные экспериментальные исследования по определению параметров движения и усилий в механизме, а также отработана методика опытной проверки результатов теоретических расчетов данных параметров.
3. Решены практические задачи коррекции и расширения рабочих зон устройств на базе МПС.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Методы проектирования МПС, в том числе использующие многокритериальную оптимизацию, позволяющие получать схемы механизмов с максимально возможными размерами рабочей зоны требуемой формы.
- Метод определения допустимых значений параметров движения МПС из условия отсутствия резонансных явлений.
- Результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающие возможность применения разработанных методов.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием современных средств измерений при проведении экспериментальных исследований, применением апробированных методов математического моделирования и согласованностью результатов проведённых экспериментов и теоретических расчётов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы прошли положительную апробацию на конференциях МИКМУС-2016–МИКМУС-2019, МИКМУС-2021. Москва. 2016–2019, 2021.; Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященной 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Москва. 2018.; 8th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM 2019). Токио, Япония. 2019.; 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control. Саппоро, Япония. 2020.

**Реализация результатов работы.** По результатам работы получены патенты на полезные модели: «Пространственный механизм с тремя степенями свободы» (RUS 174484) и «Робот-манипулятор параллельной структуры для сборки дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок ядерных реакторов» (RU 204926). Результаты работы были использованы при выполнении госзадания 9.5309.2017/БЧ «Разработка методов структурного синтеза и анализа манипуляторов параллельной структуры с учетом влияния близости к особым положениям на их кинематические и прочностные характеристики» на 2017-2019 гг., а также при выполнении проекта «Разработка робота-манипулятора параллельной структуры для оптимизации производства дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок энергетических ядерных реакторов» для ПАО «Машиностроительный завод» в рамках гранта УМНИК на 2017-2019 гг.

Разработанные подходы к синтезу и адаптации параллельных механизмов были применены в ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, а также приняты к использованию в образовательной деятельности кафедры основ конструирования машин при работе с магистрами в рамках курса «Общая теория приводов» и выполнения научно-исследовательской работы студентов в МГТУ им. Н. Э. Баумана, что подтверждено соответствующими актами.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 34 печатных изданиях, 13 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК (общим объёмом 6,44 п.л.), 14 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 7 — в тезисах докладов.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав

и заключения. Полный объём диссертации составляет 142 страницы, включая 71 рисунок и 12 таблиц. Список литературы содержит 141 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** посвящена обзору и анализу применения МПС в машиностроении, существующим проблемам их синтеза и практического применения, связанных с ограниченностью рабочих зон.

МПС находят применение в роботах и робототехнических комплексах, в которых важно обеспечение высокой точности и грузоподъёмности при высокой скорости позиционирования, возможности работы выходного звена в агрессивных средах и доступности приводов механизма для обслуживания вне рабочей зоны, а также высокой жёсткости конструкции. Таковыми, например, являются медицинские роботы, платформы сверхточного позиционирования, роботы, занимающиеся микросборкой, упаковщики, металлообрабатывающие станки, 3D-принтеры и прочее оборудование.

Существенным недостатком МПС является ограниченность их рабочих зон, связанная с наличием особых положений – конфигураций, в которых структура механизма вырождается. В работе рассматриваются особые положения типа ПС («потеря степени свободы») и типа ПУ («потеря управляемости» при остановленных приводах). Проблемы, связанные с особыми положениями, возникают уже при приближении к ним. Например, при приближении к особому положению типа ПС для поддержания постоянных параметров движения требуется повышать скорости в приводных парах. При приближении к особому положению типа ПУ возрастают усилия в приводных парах и нагрузки на звенья механизма, снижается жёсткость и точность позиционирования. Таким образом, работа реального робота вблизи особых положений без дополнительных мер, связанных с управлением или вводом избыточной подвижности, невозможна.

Существует множество подходов к определению близости к особым положениям, среди которых показатель манипулируемости (Yoshikawa T.), обратное число обусловленности матрицы Якоби механизма (Lynch K.), передаточный индекс (Funabashi H) и наименьший угол давления (Y. Takeda, Демидов С.), однако эти критерии не являются универсальными и применимыми ко всем типам механизмов, а также не имеют ясного физического смысла, особенно при наличии одновременно и поступательных, и вращательных степеней свободы у выходного звена механизма. Логичным шагом является выбор критериев, связанных непосредственно с основными рабочими параметрами манипулятора, поддающимися измерению: момент в приводе, скорости в приводах, жёсткость.

Введение критериев близости к особым положениям, связанных с эксплуатационными характеристиками, позволяет использовать их для определения формы и размеров рабочей зоны механизма, в которой эти характеристики могут быть обеспечены. В свою очередь методы определения форм

и размеров таких рабочих зон позволяют выработать подходы по параметрическому синтезу и адаптации МПС под конкретные задачи производства.

В монографии Глазунова В. А., Палочкина С. В., Хейло С. В. рабочая зона определяется как пространство из множества точек, которых достигает выходное звено МПС. Это определение не учитывает особенности конструкции манипулятора, а также невозможность его эксплуатации на требуемых режимах в определенных зонах. Широко применяемая классификация рабочих зон, предложенная Merlet J.-P. включает в себя такие понятия как «рабочая зона постоянной ориентации» (множество точек, в которых может находиться выходное звено, сохраняя заданную ориентацию), «максимальная рабочая зона» (множество точек, в которых может находиться выходное звено хотя бы с одной его ориентацией) и «полная рабочая зона» (множество точек, в которых может находиться выходное звено во всех возможных ориентациях), которые также не учитывают особенности реальных манипуляторов. Схожая классификация рабочих зон представлена в ГОСТ Р 60.0.0.4-2019. Так, например, термин «рабочее пространство» соответствует термину «полная рабочая зона».

В ГОСТ 25686-85 определяется практико-ориентированное понятие «зона обслуживания манипулятора» как «пространство, в котором рабочий орган выполняет свои функции в соответствии с назначением манипулятора и установленными значениями характеристик». Однако не приводится примеров таких характеристик, а также не учитываются возможные ограничения конструкции механизма.

Для определения формы и размеров рабочей зоны МПС применяют итерационный способ, который основан на разбиении некой области на точки и решении в каждой из них обратной задачи о положениях. Этот способ является наиболее точным и универсальным, и потому нашёл широкое применение. В математических моделях, полученных с использованием данного метода, учитывается, как правило, только кинематика механизма. В работах Скворцова С. А., Рашояна Г. В., Глазунова В. А. вводились дополнительные ограничения на рабочую зону, связанные с особыми положениями. Однако данные ограничения основывались на анализе матриц координат винтов осей механизма и углов давления, что затрудняет практическое применение этих подходов, поскольку они не имеют ясного физического смысла и не поддаются непосредственному измерению.

Таким образом, применяемая на настоящий момент классификация и основанные на ней методы определения рабочих зон являются либо сугубо теоретическими и дают завышенные результаты по сравнению с реальной рабочей зоной робота-манипулятора, либо связаны с параметрами, не имеющими ясного физического смысла.

**Глава 2** посвящена разработке оригинальных методов определения рабочих зон, подходов к синтезу МПС и их адаптации к изменившимся условиям производства на основе этих методов.

Для учёта перечисленных выше явлений предлагается следующая уточнённая классификация рабочих зон:

- Теоретическая рабочая зона – множество точек, в которых может находиться выходное звено механизма, т. е. точек, в которых обратная задача о положениях имеет решение. Данное понятие включает в себя традиционное понимание рабочей зоны механизма.
- Конструктивная рабочая зона – множество точек, в которых может находиться выходное звено механизма согласно конструктивным ограничениям реального механизма, таким как, например, ограничение на минимальный угол между звеньями и т. п.
- Эффективная рабочая зона – множество точек, в которых может находиться выходное звено механизма согласно конструктивным ограничениям реального механизма при условии возможности поддержания в этих точках некоторых параметров движения и эксплуатационных характеристик, не превышающих критические.

Определение конструктивной и эффективной рабочей зоны на стадии синтеза робота-манипулятора позволяет более точно оценивать потенциал его практического применения. В основе определения конструктивной и эффективной рабочих зон лежит итерационный алгоритм. Основным его достоинством является то, что, изменяя условия алгоритма, можно вычислить рабочую зону с любыми заданными ограничениями (связанными, например, с конструктивными особенностями механизма или со спецификой его применения), максимально приблизив ее к рабочей зоне реального манипулятора.

Эффективная рабочая зона механизма связана с параметрами движения или эксплуатационными характеристиками, являющимися определяющими для данного механизма. Такими параметрами могут выступать момент в приводе, скорость в приводе, жёсткость механизма и пр. В этом случае в каждой точке в рамках цикла необходимо определить значение параметра, и, если его значение не превышает критическое, узел добавляется в массив точек рабочей зоны. На практике для наглядности удобно строить распределение параметра по площади рабочей зоны — в этом случае эти параметры могут выполнять роль своеобразных критериев близости механизма к особому положению.

В качестве первого рассмотренного параметра выступают **моменты в приводе механизма**. Практически для любого механизма параллельной структуры с  $n$  степенями свободы можно получить аналитические уравнения связи в виде  $n$  неявных функций  $F_i(x_1, \dots, x_n, q_i)$  ( $i = 1 \dots n$ ) от координат выходного звена  $x_1, \dots, x_n$  и перемещений в активных парах  $q_1, \dots, q_n$ . Тогда, дифференцируя по времени указанные функции, получим систему линейных уравнений вида:

$$\frac{\partial F_i}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial F_i}{\partial x_2} \dot{x}_2 \dots + \frac{\partial F_i}{\partial x_n} \dot{x}_n + \frac{\partial F_i}{\partial q_i} \dot{q}_i = 0 \text{ или } \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{x}}, \quad (1)$$

связывающих между собой входные ( $\dot{q}_i$ ) и выходные ( $\dot{x}_j$ ) скорости.  $\mathbf{J}$  называется матрицей Якоби механизма.

Пусть к выходному звену механизма приложена некоторая внешняя нагрузка, задаваемая вектором  $\mathbf{P}$ . Воспользуемся принципом Д'Аламбера-Лагранжа:

$$\sum_{i=1}^n T_i \frac{\partial q_i}{\partial x_k} \delta x_k = -P_{x_k} \delta x_k \text{ или } \mathbf{J}^T \cdot \mathbf{T} = -\mathbf{P}, \quad (2)$$



где  $T_i$  – усилие в приводной паре  $i$ -той кинематической цепи.

При  $|\mathbf{P}| = P = \text{const}$  максимальное значение  $T_i$  соответствует ситуации, при которой векторы  $\mathbf{j}_i^T$  и  $\mathbf{P}$  являются коллинеарными:

$$|T_i^{\max}| = |\mathbf{j}_i^T| \cdot |\mathbf{P}|. \quad (3)$$

Таким образом, метод определения эффективной рабочей зоны по моменту в приводе следующий: в каждой точке рабочей области определяется максимальное усилие в приводе, которое соответствует наихудшему направлению внешней силы при известном по модулю значении этой силы. Если в точке максимальное усилие для каждого из приводов не превышает максимально допустимое, то данная точка относится к эффективной рабочей зоне.

В качестве второго рассмотренного параметра выступает минимальная **жѐсткость**. Известно, что вектор перемещений узлов конструкции  $\mathbf{d}$  связан с силами  $\mathbf{F}$ , приложенными к ним, при помощи обратной матрицы жѐсткости  $\mathbf{K}^{-1}$ :

$$\mathbf{d} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{F}. \quad (4)$$

Направление вектора внешних усилий, вызывающее максимальный момент в  $i$ -ом приводе, совпадает с направлением внешнего усилия, вызывающего максимальную упругую деформацию  $i$ -ой цепи. Пусть выходному звену соответствует  $k$ -ый узел конструкции. Тогда вектор внешних усилий  $\mathbf{F}$  равен:

$$\mathbf{F} = P \cdot (0 \dots j_{i1} \dots j_{in} \dots 0)^T.$$

Тогда максимальное перемещение точки выходного звена определяется как максимальное из перемещений, вызванных внешним усилием с наихудшего для  $i$ -ой цепи направления, определённых по формуле (4):  $|d^{\max}| = \max(|d_i^{\max}|)$ .

Таким образом, метод определения эффективной рабочей зоны по жѐсткости включает в себя оценку смещения выходного звена (и промежуточных шарниров) под действием внешней нагрузки в наихудшем направлении во всех точках рабочей зоны и сравнения этого смещения с максимально допустимым. При его превышении точка удаляется из эффективной рабочей зоны.

В качестве третьего рассмотренного параметра выступает максимально допустимая **скорость в приводных парах**. Рассмотрим обратную задачу о скоростях, представленную выражением (1). Видно, что значение скорости в  $i$ -й активной паре представляет собой скалярное произведение вектора  $\mathbf{j}_i^{-1}$  и вектора  $\dot{\mathbf{x}}$ . Если два данных вектора коллинеарны, то абсолютное значение соответствующей скорости в активной паре будет максимально возможным для некоторой заданной нормы вектора  $\dot{\mathbf{x}}$  и равно произведению евклидовых норм данных векторов.

Таким образом, становится возможным сформулировать метод определения эффективной рабочей зоны по скорости. В каждой точке предполагаемой рабочей зоны может быть найдена максимальная скорость в каждой приводной паре, которая сравнивается с заранее заданной максимально допустимой скоростью (определяемой, например, через допустимые частоты шагового двигателя или зубцовые частоты редуктора). Если скорость в любом приводе в некоторой точке превысила допустимую – точка исключается из рабочей зоны.

В общем случае представленные критерии являются взаимосвязанными и должны рассматриваться совместно. При синтезе МПС или коррекции к изменившимся условиям производства, для обеспечения оптимальной

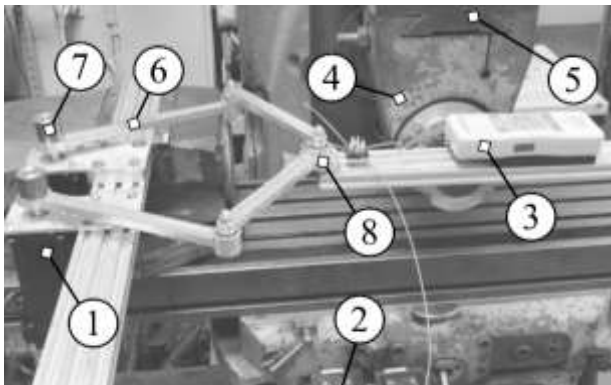


Рис. 1. Экспериментальная установка конструкции.

эффективной рабочей зоны (по одному или нескольким критериям) целесообразно применять следующие методы:

- оптимальный синтез конструкции, т. е. подбор геометрических размеров и компонентов робота-манипулятора;
- применение избыточности (кинематической или приводной);
- многокритериальная оптимизация

**Глава 3** посвящена экспериментальному исследованию эффективной рабочей зоны параллельного манипулятора по двум параметрам. В качестве первого параметра было рассмотрено усилие в приводах механизма. Экспериментальная установка представлена на Рис. 1 и включает в себя пятизвенный механизм (6) с серводвигателями 130ST-M6025 с номинальным моментом 6,0 Н·м (1), питаемыми от драйверов (управляющих блоков) (2), на выходном звене которого (8) закреплён трос. Вторым концом трос закреплён на динамометре (3), закреплённом в серье (4) горизонтально-фрезерного станка (5). Механизм может быть нагружен внешней силой при помощи смещения стола станка, а значение моментов в приводе может быть снято с драйверов приводов или с динамометрических ключей, закреплённых на входных парах (7).

На первом этапе исследования была построена теоретическая и эффективная рабочие зоны механизма, после чего в рабочей зоне были выбраны три отрезка, в которых проверялась работоспособность механизма (Рис. 2).

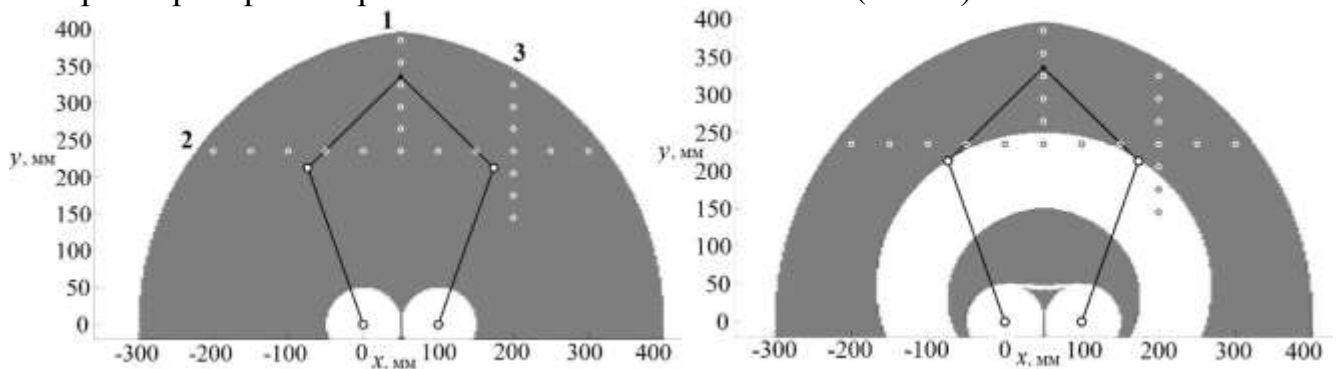


Рис. 2. Теоретическая (слева) и эффективная (справа) рабочие зоны

Механизм выводится в исследуемую точку при помощи серводвигателей, далее при помощи продольного перемещения стола механизм нагружается силой, равной 50 Н, после чего показания моментов в приводах снимаются с драйверов серводвигателей. Если двигатели отключаются по причине перегрузки, момент снимается при помощи динамометрических ключей.

Для каждого из трех исследуемых отрезков были построены графики распределения моментов в обоих приводах по соответствующей координате (Рис. 3). Точки на графике соответствуют результатам эксперимента по замеру моментов двигателей, а кривые – результатам расчетов по формулам, представленным ранее. В некоторых точках рассчитанное теоретически значение выходит за рамки

доверительного интервала ( $\pm 3\sigma$ ), это особенно заметно при приближении механизма к особому положению: в начале отрезков 1 и 3 и в середине отрезка 2.

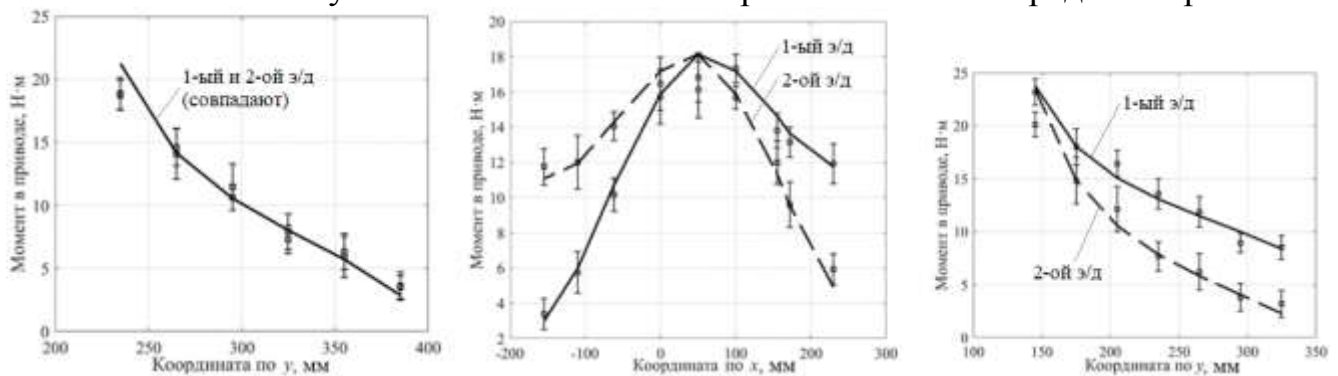


Рис. 3. Результаты эксперимента для 1-го, 2-го и 3-го отрезков

Вблизи особых положений реальное значение момента в приводе почти всегда оказывается ниже рассчитанного теоретически, что может быть связано с неточностью изготовления манипулятора, вследствие чего при чрезмерном нагружении одной цепи происходит перераспределение жёсткости между цепями.

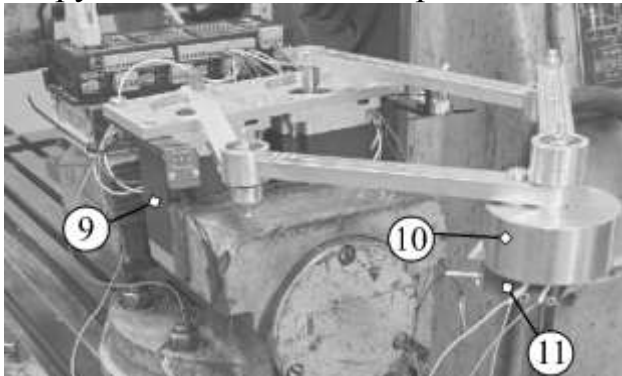


Рис. 4. Экспериментальная установка. Реальная рабочая зона механизма оказалась больше рассчитанной теоретически приблизительно на 5%, благодаря чему достигается дополнительный запас. Во втором эксперименте рассматривалась эффективная рабочая зона по скорости. Серводвигатели в экспериментальной установке (Рис. 4) были заменены на шаговые двигатели SY85STH118-6004A (NEMA 34) с номинальным моментом 8,5 Н·м (9). На выходном звене механизма был закреплён груз массой 1 кг. На грузе закреплены два акселерометра EVAL-ADXL1005: один измеряет колебания в вертикальном направлении, другой – в горизонтальном. Датчики подключены к одноплатному контроллеру, который передаёт данные на ПК при помощи системы LabView.

На предварительном этапе исследования был произведён замер вибраций от привода в режиме удержания. Выявлено, что привод является источником вибраций на частотах, приблизительно равных 50 Гц, 350 Гц, 450 Гц и 900 Гц.

Для первого этапа исследования в качестве тестовой траектории было выбрано 4 окружности радиусом 60 мм, расположенных с шагом в 15 мм (Рис. 5). Первая окружность расположена так, что её верхняя часть находится на расстоянии 15 мм от области особых положений типа ПС. Движение осуществляется по часовой стрелке. Выходное звено двигалось со скоростью 3000 мм/мин.

По результатам эксперимента были построены виброграммы и спектрограммы. На виброграммах заметны серьёзные (от  $-2g$  до  $2g$ ) скачки ускорений, которые соответствуют наложению шаговых частот электродвигателя на частоты привода в диапазоне 350–450 Гц, что вызывает резонанс. На виброграммах заметно снижение шаговой частоты электродвигателей при

удалении от особых положений, наибольшая частота наблюдается при прохождении первой окружности вплотную к особым положениям типа ПС.

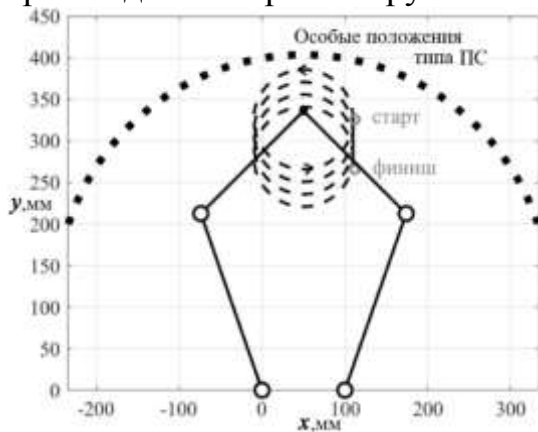


Рис. 5. Траектория движения выходного звена

Вторая часть эксперимента была проведена только для первого отрезка траектории – для первой окружности, т. к. она располагается непосредственно вблизи особых положений. Было рассмотрено 3 скорости движения выходного звена: 3000 мм/мин, 2000 мм/мин и 1000 мм/мин. Для каждой из скоростей были сняты виброграммы, построены спектрограммы и вычислены теоретические шаговые частоты электродвигателей. Виброграммы, полученные с датчиков в горизонтальной и вертикальной

плоскостях, практически идентичны: они повторяют форму друг друга, но амплитуда колебаний в горизонтальной плоскости немного выше. По этой причине приведены виброграммы и спектрограммы только для датчика, измеряющего колебания в горизонтальной плоскости (Рис. 6). Правая сторона графиков соответствует наиболее близкой к особым положениям типа ПС областям.

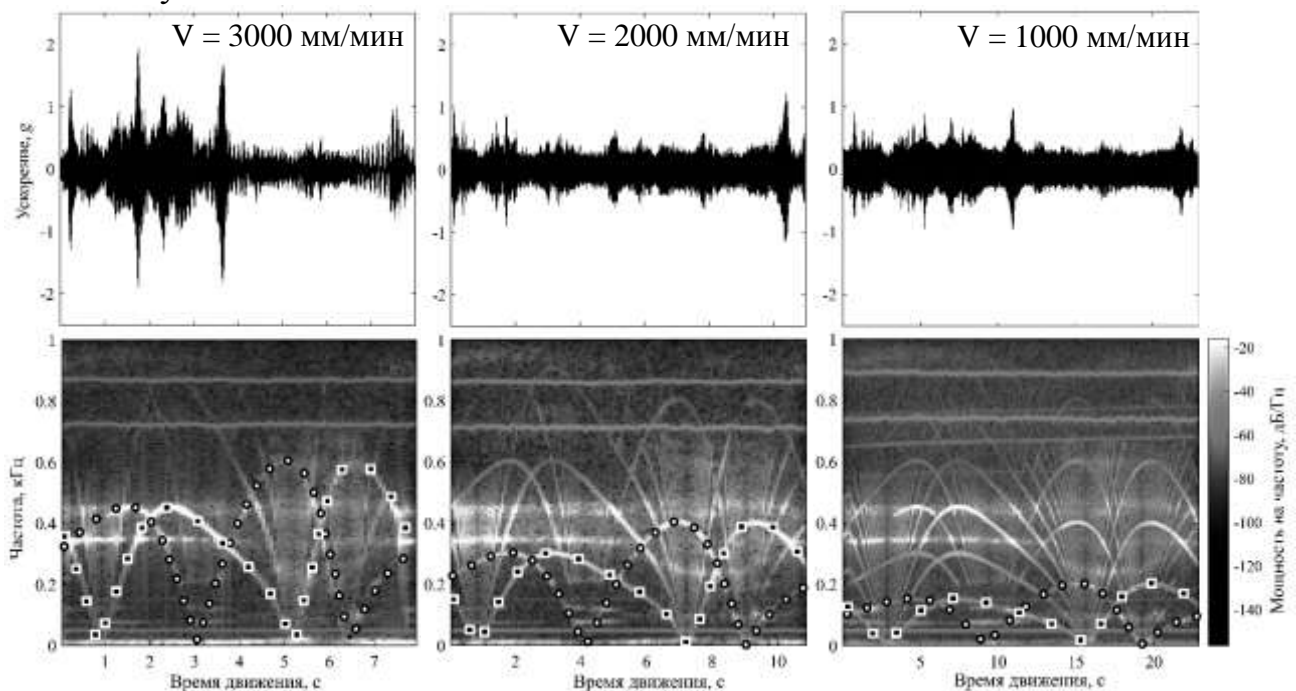


Рис. 6. Результаты эксперимента по определению вибраций при движении

На основании экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что эксплуатация механизма на расстоянии менее чем 15 мм от особых положений типа ПС возможна только на низких скоростях (1000 мм/мин), на расстоянии менее чем 75 мм – на умеренных скоростях (2000 мм/мин). Построенные по представленным ранее алгоритмам эффективные рабочие зоны по скорости представлены на Рис. 7. Для скорости в 3000 мм/мин эффективная рабочая зона равна нулю. Таким образом, были апробированы и экспериментально подтверждены методы определения эффективных рабочих зоны по моменту и скоростях в приводе.

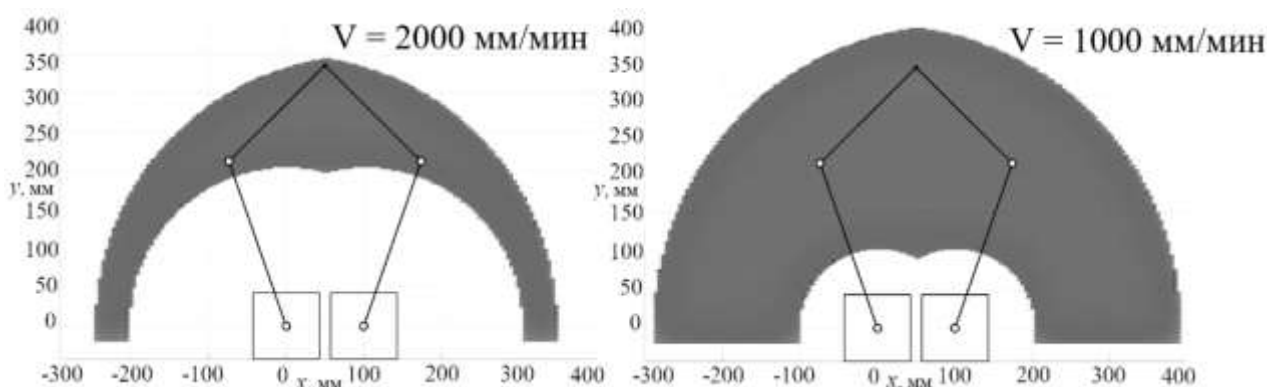


Рис. 7. Эффективные рабочие зоны для скоростей 2000 мм/мин и 1000 мм/мин

**Глава 4** посвящена решению различных реальных практических задач синтеза и адаптации параллельных механизмов на основе представленных методов.

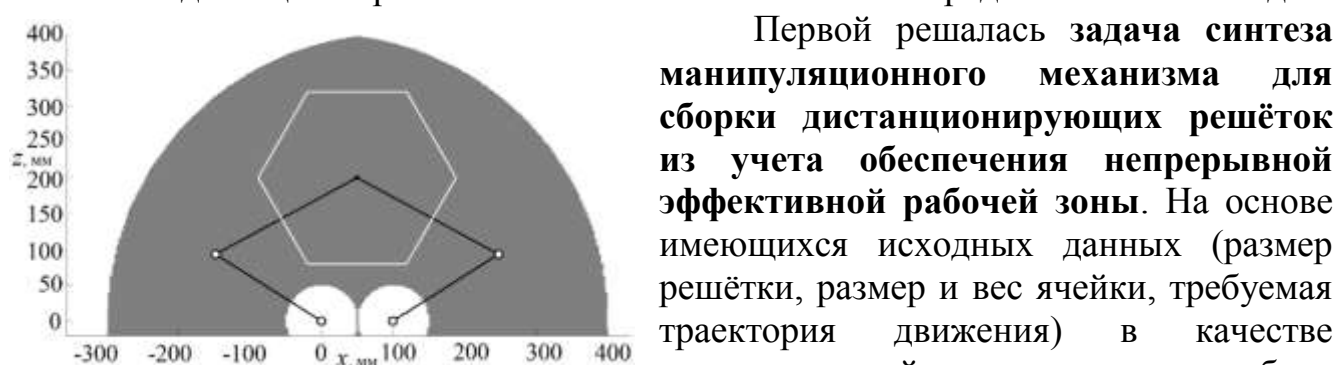


Рис. 8. Эффективная рабочая зона по моменту в приводе

Первой решалась **задача синтеза манипуляционного механизма для сборки дистанционирующих решёток из учета обеспечения непрерывной эффективной рабочей зоны**. На основе имеющихся исходных данных (размер решётки, размер и вес ячейки, требуемая траектория движения) в качестве кинематической схемы выбран пятизвенный механизм, для которого была разработана математическая модель

статики с учётом жёсткости. Далее при помощи вариации геометрических параметров оценено их влияние на размер зон особых положений. Для решения данной задачи оптимальными являются: расстояние между входными парами  $l=100$  мм, длина первого звена каждой цепи  $l_1=175$  мм, длина второго звена каждой цепи  $l_2=225$  мм.

Для определения требуемого номинального крутящего момента привода построено распределение момента по эффективной рабочей зоне при внешней силе, равной 5 Н. Выбор внешней силы продиктован в первую очередь ориентировочной массой схвата, располагающегося на выходном звене (500 граммов). В любой точке рабочей зоны момент в приводе не превышает 1 Н·м, поэтому в качестве приводов были выбраны серводвигатели 60CST-M01330 с номинальным крутящим моментом, равным 1,27 Н·м. Эффективная рабочая зона по моменту в приводе представлена на Рис. 8. Белым шестиугольником отмечен размер дистанционирующей решётки.

После была рассмотрена эффективная рабочая зона по жёсткости. Основываясь на полученных результатах, был смоделирован первый прототип манипулятора (рис. 9), для которого была сформирована матрица жёсткости. В первой итерации рассматривалась жёсткость только в плоскости работы механизма, форма сечения звена была принята прямоугольной с параметрами:  $I_y = 3410 \text{ мм}^4$ ,  $I_z = 1330 \text{ мм}^4$ ,  $I_p = 3260 \text{ мм}^4$ ,  $E = 68900 \text{ МПа}$ ,  $G = 25900 \text{ МПа}$ ,  $\mu = 0,3$ .

Выбранные в предыдущем расчёте геометрические параметры являются

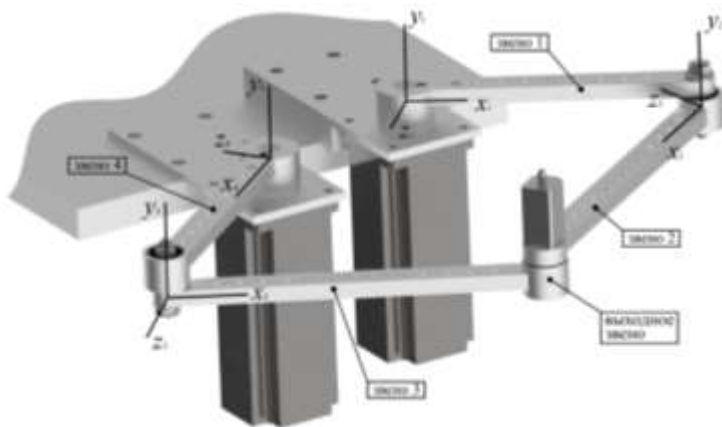


Рис. 9. 3D-визуализация манипулятора

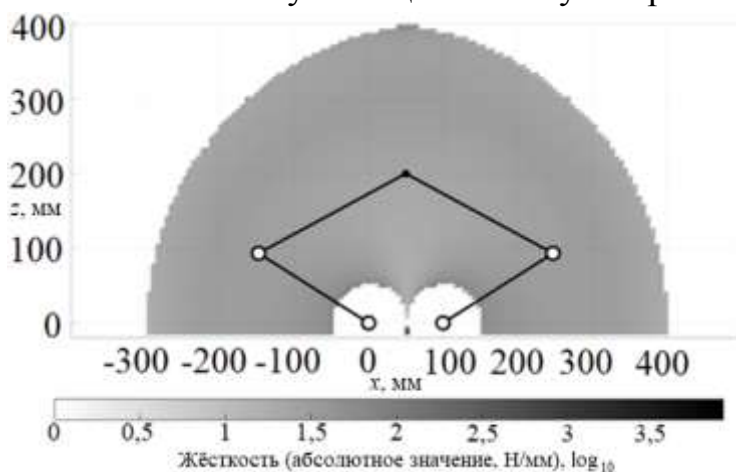


Рис. 10. Распределение жёсткости по рабочей зоне в плоскости механизма

швеллерного сечения по ГОСТ 13623-90. Звенья выполнены из алюминия. Были рассмотрены сечения площадью от 100 до 350 мм<sup>2</sup>. Результат оптимизации представлен на Рис. 11.

Наибольшую суммарную рабочую зону обеспечивает механизм со звеньями, выполненными в форме двутавров, полученных при сварке двух швеллеров 440058 с суммарным поперечным сечением, равным 261,2 мм<sup>2</sup>. Формы и площади эффективных рабочих зон по усилию в приводе и жёсткости в этом случае совпадают и составляют 0,1972 м<sup>2</sup>, но изготовление таких звеньев связано с трудностями. Близкий результат даёт применение круглых стержней (размер эффективной рабочей зоны при этом снижается на 3,22%). Существенно худший результат даёт применение прямоугольного сечения и тонкостенной трубки: -16,89% и -45,73% к размеру рабочей зоны,

оптимальными и с точки зрения наихудшей жёсткости: её распределение по рабочей зоне достаточно однородно (разброс не более 10%) (Рис. 10).

Эффективная рабочая зона по жёсткости при максимально допустимом прогибе выходного звена, равным 0,25 мм, и при внешней силе, равной 5 Н, равна эффективной рабочей зоне по моменту в приводе.

Далее стояла задача определения оптимального сечения звена, для этого исследовалась жёсткость в направлении y. Было рассмотрено четыре варианта сечений: прямоугольное с отношением ширины к высоте, равным 1,5; круглое; тонкостенная трубка с толщиной стенки, равной 0,05 от диаметра; двутавр, полученный путём сварки двух прямоугольных профилей

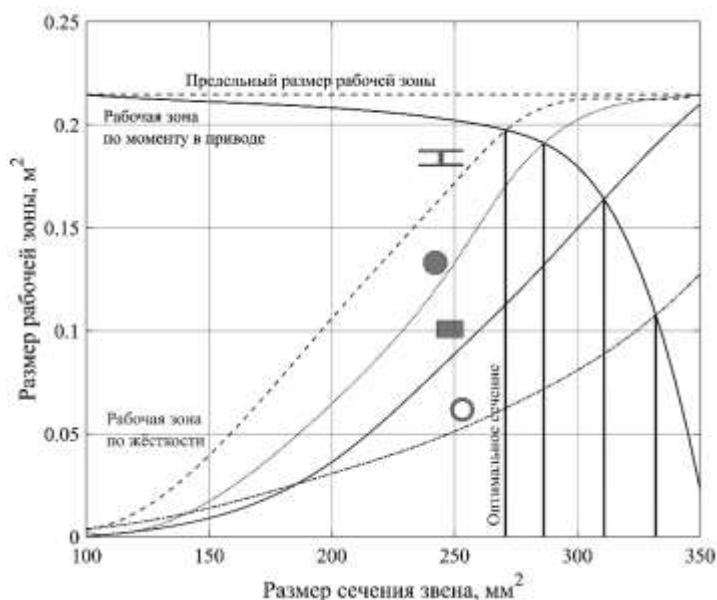


Рис. 11. Выбор сечения звена



соответственно. Таким образом, для робота-сборщика был обоснован выбор геометрических параметров звеньев и их сечений, а также приводов.

Второй решалась задача расширения рабочей зоны многокоординатного станка «Tetra», разработанного в МИП «Модульная механика МГТУ им. Н. Э. Баумана». В качестве исполнительный части системы позиционирования инструмента и заготовки в этом станке используется плоский механизм параллельной структуры, для которого была разработана математическая модель, позволяющая ввести различные типы избыточности. Прототип станка состоит из двух идентичных модулей с тремя степенями свободы, реализующих движение в плоскости. Модуль представляет собой одну из вариаций плоского 3-PRR механизма (Рис. 12).

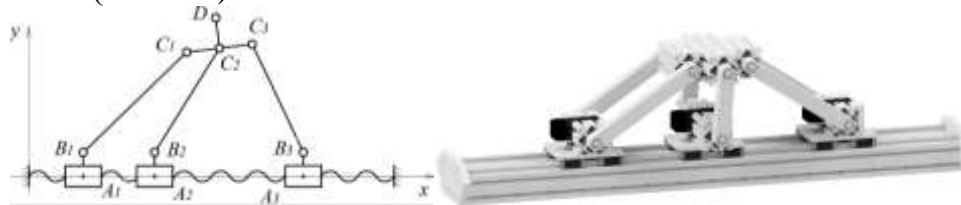


Рис. 12. Модуль станка «Tetra»

В процессе тестирования построенного прототипа было установлено, что в некоторых положениях механизм попадает в особое положение типа ПУ. При этом наличие погрешностей при изготовлении и сборке модуля увеличивает зоны таких положений, существенно уменьшая общую рабочую зону механизма. Эта проблема имеет фундаментальные причины, связанные с кинематикой механизма, поэтому была начата проработка различных вариантов её модифицирования.

Для решения этой проблемы предлагается использовать 4-PRR механизм с измененной геометрией звеньев, схема которого представлена на Рис. 13.

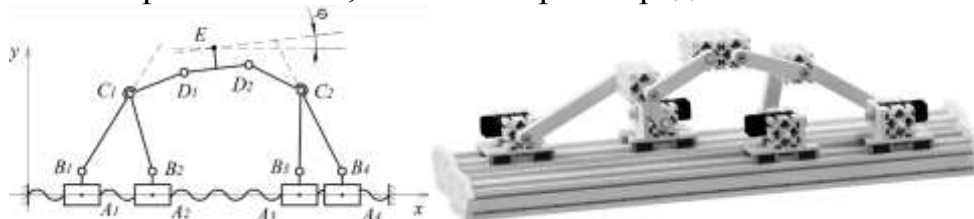


Рис. 93. Предлагаемая модернизация модуля

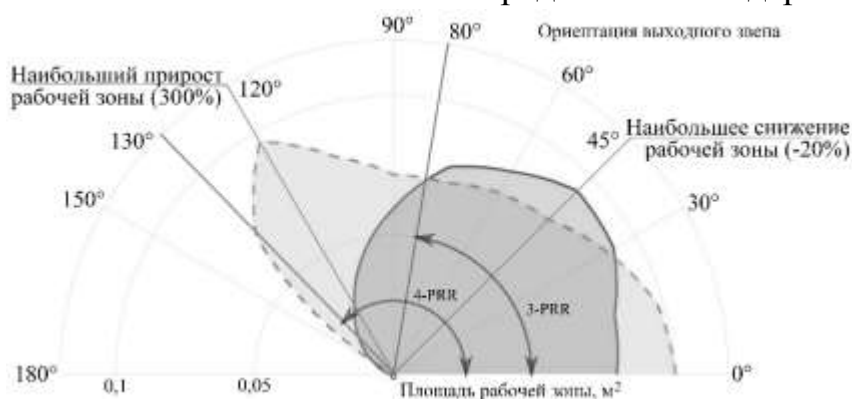


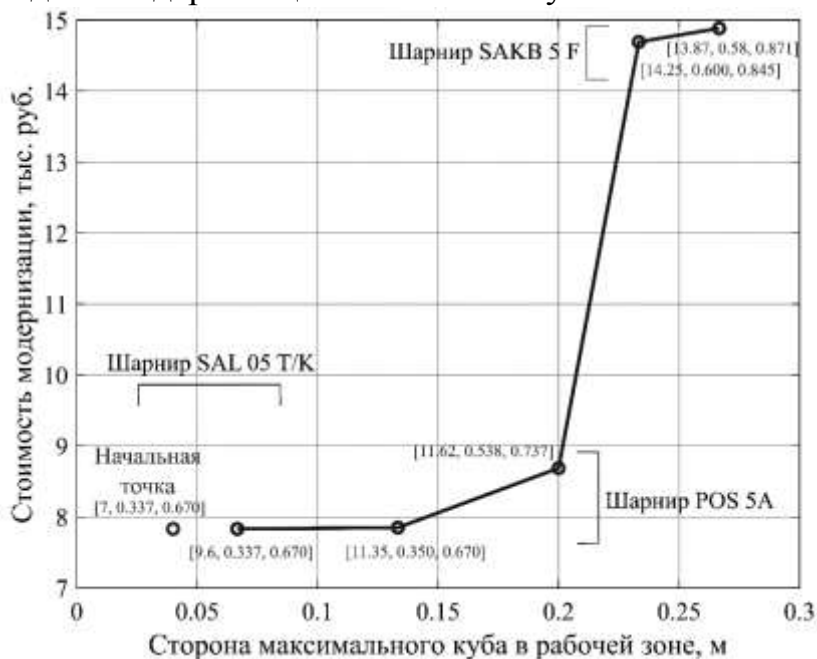
Рис. 14. Площади эффективных рабочих зон механизмов в зависимости от ориентации

механизмов при различных ориентациях выходного звена. Для некоторых ориентаций выходного звена рабочая зона рассматриваемого механизма снизилась,

Для предлагаемого механизма была решена задача о положениях и были определены конструктивная и эффективная рабочие зоны. На Рис. 14 представлен полярный график, сравнивающий площади эффективных рабочих зон двух

Третьей решалась задача модернизации дельта-робота из учёта **максимизации рабочей зоны и минимизации затрат**. Рассматриваемый робот имеет четыре степени свободы и предназначен для перемещения объектов небольшого веса (до 1 кг).

Рис. 105. Исследуемый дельта-робот. Основные геометрические параметры следующие:  $l_{AB} = 0,0365$  м,  $l_{BC} = 0,337$  м,  $l_{DE} = 0,004$  м,  $[h_{min}; h_{max}] = [0,27; 0,67]$  м. Площадь конструктивной рабочей зоны в этом случае составляет всего  $0,0024$  м<sup>3</sup>, при этом она является сильно вытянутой вдоль оси  $z$ . Таким образом, задача модернизации является актуальной.



14



разработанной математической модели механизма. Было получено 5 точек множества парето-оптимальных решений, представленных в виде графика на Рис. 16. Для точек представлены значения оптимизируемых параметров в виде  $[\varphi, l_{BC}, h_{max}]$ . Важнейшим параметром при данной оптимизации стал допускаемый угол наклона сферических шарниров. Кубическая рабочая зона для параметров  $[11,62, 0,538, 0,737]$  представлена на Рис. 17. Таким образом, была решена поставленная задача оптимизации.



Рис 17.

### Основные результаты и выводы:

1. Уточнена научная классификация рабочих зон параллельных механизмов, учитывающая конструктивные параметры и рабочие характеристики манипулятора.
2. Разработаны методы определения эффективной рабочей зоны по усилиям в приводах, скоростям в приводных парах и жёсткости МПС, базирующиеся на определении наихудшего направления внешней нагрузки или вектора скорости выходного звена, рассчитываемых с использованием матрицы Якоби механизма.
3. Разработана и изготовлена экспериментальная установка на базе плоского пятизвенного МПС. Показано, что результаты расчетов усилий и скоростей в приводах, проведенных с помощью предложенных методов, согласуются с результатами проведенных экспериментальных исследований (погрешность от 2% до 15% в зависимости от близости к особым положениям).
4. Разработаны математические модели манипулятора для сборки дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок энергетических ядерных реакторов, многокоординатного станка «Tetra» и дельта-робота с поворотной платформой. С использованием разработанных методов для указанных устройств решены задачи параметрического синтеза, расширения рабочей зоны путем использования приводной избыточности и коррекции формы и размеров рабочей зоны из условия минимизации стоимости модернизации соответственно.
5. Разработанные методы определения эффективной рабочей зоны по усилиям в приводах, скоростям в приводных парах и жёсткости механизма, позволяют на этапе проектирования обеспечить постоянство данных характеристик по всей рабочей зоне (разброс не более 10%).
6. Разработанные методы позволяют прогнозировать и предотвращать резонансные явления в рабочей зоне манипулятора, связанные с частотами привода. Экспериментально установлено снижение значений виброускорения в два раза за счет ограничения скорости выходного звена одновременно с увеличением эффективной рабочей зоны в 1,8 раз.
7. Разработанный метод определения эффективной рабочей зоны по усилиям в приводах позволяет повысить достоверность расчетов по сравнению с существующим методом, использующим статическое направление внешней нагрузки (погрешности расчетных и экспериментальных данных составляют 5% и 20% соответственно для разработанного и известного методов соответственно).

### **Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Манипулятор параллельной структуры с вращательными степенями свободы для возможного применения в медицинской робототехнике / К. Г. Эрастова [и др.] // Качество. Инновации. Образование. 2016. Т. 2, № 2. С. 110-116. (0,44 п.л./0,2 п.л.).
2. Ларюшкин П. А., Глазунов В. Г., Эрастова К. Г. Определение максимальных усилий в приводах манипуляторов параллельной структуры по заданной величине внешней нагрузки // Машиностроение и инженерное образование. 2016. Т. 2. С. 40-46. (0,44 п.л./0,2 п.л.).
3. Структурный анализ и решение обратной задачи о положениях сферического механизма параллельной структуры / К. Г. Эрастова [и др.] // Вестник машиностроения. 2017. № 4. С. 34-36. (0,19 п.л./0,1 п.л.).
4. Выбор схемы и решение обратной задачи о положениях для системы позиционирования на базе плоского механизма параллельной структуры / К. Г. Эрастова [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 7. С. 87-101. (0,75 п.л./0,2 п.л.).
5. Ларюшкин П. А., Рашоян Г. В., Эрастова, 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. (0,375 п.л./0,15 п.л.).
6. Ларюшкин П. А., Захаров М. Н., Эрастова, К. Г. Определение геометрических параметров плоского пятизвенного механизма из условия обеспечения его устойчивой работы в заданной области // Вестник машиностроения. 2017. № 11. С. 10-13. (0,19 п.л./0,15 п.л.).
7. Эрастова, К. Г., Ларюшкин П. А. Рабочие зоны механизмов параллельной структуры и способы определения их формы и размеров // Вестник машиностроения. 2017. № 8. С. 78-87. (0,56 п.л./0,5 п.л.).
8. Ларюшкин П. А., Захаров М. Н., Эрастова, К. Г. Оптимизация геометрических параметров плоского механизма параллельной структуры методом SQP из условия максимизации эффективной рабочей зоны // Вестник машиностроения. 2018. № 8. С. 24-28. (0,19 п.л./0,15 п.л.).
9. К расчету механизмов типа Delta с линейными приводами и различным числом степеней свободы / К. Г. Эрастова [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 3. С. 19-29. (0,43 п.л./0,1 п.л.).
10. Исследование особых положений механизма параллельной структуры семейства Delta с четырьмя степенями свободы / К. Г. Эрастова [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 6. С. 34-41. (0,15 п.л./0,5 п.л.).
11. Эрастова К. Г. Влияние особых положений на жесткость механизмов параллельной структуры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 8. С. 21-28. (0,5 п.л./0,5 п.л.).
12. Исследование конструктивной рабочей зоны плоского лямбда-подобного механизма с учетом особых положений / К. Г. Эрастова [и др.] // Вестник машиностроения. 2021. № 3. С. 36-40. (0,375 п.л./0,3 п.л.).
13. Палочкин С. В., Сеницына Ю. В., Эрастова, К. Г. Влияние точности изготовления планетарно-цевочного редуктора на точность позиционирования

робота параллельной структуры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 11. С. 13-21. (0,56 п.л./0,25 п.л.).

14. Эрастова, К. Г., Ларюшкин П. А. Многокритериальная оптимизация конструкции дельта-робота с четырьмя степенями свободы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 1(742). – С. 10-19. (0,56 п.л./0,45 п.л.).

15. P. Laryushkin, V. Glazunov, K. Erastova On the Maximization of Joint Velocities and Generalized Reactions in the Workspace and Singularity Analysis of Parallel Mechanisms // Robotica. 2019. Vol. 37, no. 4. P. 675-690. (0,94 п.л./0,25 п.л.).

16. Laryushkin, P., Pukhova, E., Erastova, K. Experimental Study of Force Transmission in 4-DOF Parallel Manipulator and Its Educational Applications // CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures, 2021, 601, pp. 162–169. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

17. Erastova K. G., Laryushkin P. A. An Extended Approach to Estimating Closeness to Singularity in Parallel Manipulators based on Actuating Efforts Values // AIRC '19: Proceedings of the 2019 International Conference on Artificial Intelligence, Robotics and Control, pp. 23-26. (0,15 п.л./0,1 п.л.).

18. Erastova K.G. Increasing the effective workspace of the planar 3-RRR mechanism by using kinematic redundancy // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 747 (2020) (0,15 п.л./0,15 п.л.).