

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке и инновациям  
федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Российский государственный  
университет им. А. Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)»

Д.Э.Н., доцент

/А.В. Силаков/

«29»



2024г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

**Киселева Сергея Валерьевича**

«Разработка и исследование складных механизмов параллельной структуры, включающих круговую направляющую», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение

### Актуальность темы диссертационной работы

Для повышения эффективности многих технологических процессов в различных отраслях промышленности используются специализированные устройства и машины. Они позволяют автоматизировать производственные процессы и минимизировать операции, выполняемые человеком. На сегодня существенное количество технологических устройств и машин проектируется на основе механизмов параллельной структуры. Такие механизмы обладают усовершенствованными характеристиками, к которым относится повышенная жесткость, маневренность, высокие нагрузочные способности, точность и др. При этом стоит отметить, что для решения многих задач требуется обеспечение достаточно большого (в том числе неограниченного) угла поворота исполнительного органа вокруг некоторых осей, а также увеличенные габариты рабочей зоны.

Неограниченный угол поворота обеспечивается в механизмах параллельной структуры с круговой направляющей. Однако такие механизмы имеют весьма большие габаритные размеры, ограниченные параметры

рабочей зоны, кроме этого они неспособны трансформироваться из трехмерных конфигураций в элегантные двумерные.

Тема диссертационной работы посвящена синтезу и анализу складных механизмов параллельной структуры с круговой направляющей. В работе решаются задачи по устранению основных недостатков механизмов с круговой направляющей, указанных выше. Устранение данных недостатков обеспечивает не только усовершенствование функциональных характеристик данных механизмов, но и позволяет расширить области их практического применения. В связи с этим тематика данной диссертационной работы является весьма актуальной.

### Содержание диссертации

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 144 публикаций, восемь приложений. Объем диссертации составляет 144 страницы, включая 69 рисунков.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и решаемые задачи, представлена научная новизна и практическая значимость, указаны методы исследования, применяемые в работе, обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации работы и сведения о личном вкладе автора.

Первая глава посвящена аналитическому обзору известных механизмов с круговой направляющей. Все рассмотренные механизмы классифицированы по количеству степеней свободы, а также по количеству кинематических цепей, входящих в их состав. Представлен обзор известных методов структурного и параметрического синтеза, а также алгоритмов комплексного анализа кинематики и динамики, построения рабочих зон и определения особых положений. В главе проведен анализ работ известных отечественных и зарубежных исследователей.

По результатам анализа данных работ выявляются главные недостатки механизмов параллельной структуры с круговой направляющей. К ним относятся крайне небольшие размеры рабочей зоны, кроме этого конструктивное исполнение таких механизмов делает их весьма громоздкими. На основании этого делается вывод об актуальности проведения исследований, направленных на разработку аналогов механизмов данной группы, в которых отсутствуют указанные недостатки.

Во второй главе с применением структурных формул подвижности представлен структурный анализ механизмов, рассмотренных в первой главе. Определяется число степеней свободы механизмов. Также структурная формула А. П. Малышева используется для поиска параметров новой складной кинематической цепи. На основе найденного решения предлагается дизайн данной цепи. Она состоит из круговой направляющей, каретки, промежуточного звена, криволинейной штанги и платформы, соединенных

между собой тремя вращательными и одним сферическим шарнирами. Далее на основе синтезированной цепи разрабатывается семейство новых складных механизмов с разным количеством кинематических цепей. Применение синтезированной цепи в представленных механизмах позволяет увеличить размеры их рабочей зоны и обеспечить компактность их конструкций за счет возможности трансформации в плоскую двумерную структуру.

За счет складной конструкции, во всех механизмах обеспечивается значительный вертикальный габарит рабочей зоны. Немаловажным фактом является и то, что в синтезируемых механизмах обеспечивается реконфигурация сферического движения – изменение габаритов сферы, по которой смещается платформа. Управление механизмом в этом случае обеспечивается каретками при заблокированных приводах криволинейных штанг. На основе разработанного механизма с тремя кинематическими цепями были предложены двухмодульные системы, в которых разработанный механизм используется в качестве сферического. Двухмодульная система главным образом позволяет устранить основной недостаток механизмов параллельной структуры – увеличить габариты рабочей зоны.

В третьей главе проведен кинематический анализ разработанного шестиподвижного механизма с тремя кинематическими цепями. Прежде всего, разработаны алгоритмы решения обратной и прямой кинематических задач о положениях, позволяющих установить взаимосвязи между координатами выходных звеньев и управляемыми перемещениями во входных звеньях. Установлено, что в каждой кинематической цепи необходимо одновременно использовать два привода. Решение обратной и прямой кинематических задач подтверждено численными результатами, полученными в программе MATLAB.

С использованием инструментов САПР, был разработан геометрический алгоритм для определения параметров рабочей зоны. В частности, рассмотрены случаи построения рабочей зоны при нулевой ориентации платформы, когда она в любом положении она расположена параллельно плоскости круговой направляющей, а также при наклонной постоянной ориентации, когда на всем смещении платформы сохраняется ее постоянный наклон. Предложенный алгоритм универсален и для остальных механизмов данной группы, имеющих иное число кинематических цепей.

Для разработанного механизма определены особые положения, в которых выходное звено может терять или приобретать дополнительные степени свободы. Конфигурации данных положений представлены в виде отдельных сборок кинематических цепей.

В четвертой главе на основе синтезированного механизма разрабатывается его виртуальный прототип, с учетом которого изготавливается его физическая модель. Виртуальный прототип синтезированного механизма разработан с использованием САПР Solidworks

и Autodesk Inventor. Выполнено моделирование обратной задачи динамики механизма с учетом свойств материалов, массы звеньев и трения между всеми контактирующими поверхностями.

На основе разработанного виртуального прототипа, был изготовлен его физический аналог. Приводы механизма были подобраны с учетом расчета моментов для шестерен кареток и криволинейных штанг. Для изготовления модели применялись технологии 3D печати и лазерной резки. Проведен эксперимент, на основании которого установлено полное соответствие всех параметров физической модели виртуальному прототипу.

**В заключении** обобщены результаты, подведены общие итоги исследования и сделаны выводы, имеющие научное и практическое значение.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. Разработана складная кинематическая цепь, обеспечивающая неограниченный угол вращения выходного звена вокруг оси, перпендикулярной плоскости круговой направляющей. На основе разработанной цепи синтезировано новое семейство механизмов параллельной структуры с числом кинематических цепей от трех до шести.

2. Разработаны оригинальные алгоритмы аналитического решения обратной и прямой кинематических задач для нового механизма с тремя цепями. Алгоритм обратной кинематической задачи универсален и для остальных механизмов данного типа.

3. Сформирован геометрический алгоритм определения параметров рабочей зоны и найдены особые положения синтезированного механизма с тремя кинематическими цепями. Данные алгоритмы могут применяться для механизмов данного типа, имеющих большее число кинематических цепей.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов исследования** обеспечивается использованием классических положений теории механизмов и машин, теоретической механики, робототехники и машиностроения, а также подтверждается применением общепринятых допущений и апробированных методик анализа, применением современного программного обеспечения (MATLAB, САПР Solidworks и Autodesk Inventor), верификацией полученных результатов через численные и натурные эксперименты.

**Практическая значимость исследования:**

1. Разработано семейство новых складных механизмов параллельной структуры для применения в различных отраслях, таких как медицина, промышленность и обучающие технологии. При этом в механизме реализована возможность получения неограниченного угла поворота вокруг оси, перпендикулярной плоскости основания, возможность трансформации

между сложенной и разложенной конфигурациями и увеличенные габариты рабочей зоны.

2. Разработана трехмерная компьютерная модель (виртуальный прототип) механизма параллельной структуры с тремя кинематическими цепями, на основе которой создан физический прототип, снабженный системой управления. Разработаны алгоритмы решения задач кинематики и динамики с применением САПР.

3. Результаты, полученные в работе, приняты к использованию на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ООО «Шахта Алардинская», а также внедрены в учебный процесс при подготовке обучающихся в МГТУ им. Н. Э. Баумана и ИМАШ РАН. Результаты диссертации также используются в исследовательской работе научных сотрудников ИМАШ РАН.

### **Замечания по работе**

1. В работе упоминаются реконфигурируемые механизмы, но нет четкого определения класса таких механизмов.

2. В главе 2 на рисунке 2.1 сложно отличить промежуточное звено от криволинейной штанги. На рисунке данные звенья выглядят как единое звено.

3. В главе 3 приведено решение обратной задачи кинематики для трех различных траекторий движения, но не представлены аналитические уравнения, описывающие данные траектории.

4. В работе представлен эксперимент с исследованием изготовленного физического прототипа механизма, посредством которого подтверждаются результаты аналитического расчета и компьютерного моделирования. Однако не представлены экспериментальные результаты, подтверждающие форму полученной рабочей зоны механизма.

5. В главе 4 в разделе практических применений недостаточно обоснована целесообразность использования данного механизма в медицинских приложениях.

6. В диссертации формула (3.16) содержит опечатки: ошибочно указан четвертый столбец матрицы; у параметра  $\beta$  должен быть индекс  $i$ , вместо  $2i$ ; буква «г» в написании вектора  $\mathbf{r}_{BiAi}$  должна быть выделена жирным прямым шрифтом. Корректная запись формулы (3.16) представлена в автореферате.

Приведенные замечания не снижают ценности выполненного исследования и полученных результатов. Замечания также не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Киселева С. В. «Разработка и исследование складных механизмов параллельной структуры, включающих круговую направляющую», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение, является

законченной научно-квалификационной работой и полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. В работе сформулирована и решена научная проблема, имеющая важное значение для развития методов проектирования и алгоритмов анализа механизмов, устройств и роботов параллельной структуры, используемых в отраслях народного хозяйства.

Диссертация четко структурирована и написана грамотным научным языком, а ее содержание соответствует пунктам 1 и 3 паспорта специальности 2.5.2. Машиноведение. Автореферат диссертации составлен по установленной форме и полностью отражает основное содержание работы. Результаты исследования представлены в 10 публикациях, из них 6 статей, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также 4 статьи в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ и РИНЦ. Кроме того, получено 2 патента на изобретения и 2 патента на полезные модели.

Диссертация «Разработка и исследование складных механизмов параллельной структуры, включающих круговую направляющую» соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Киселев Сергей Валерьевич, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение.

Отзыв утвержден по результатам обсуждения на заседании кафедры автоматки и промышленной электроники Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), протокол № 9 от 29.02.2024 г.

Заведующий кафедрой автоматки  
и промышленной электроники,  
д.т.н., доцент Рыжкова Е.А.



Контакты ведущей организации

Адрес: 119071, Москва, ул. Малая Калужская д. 1, Российский  
государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн.  
Искусство)

Телефон: 8 (495) 811-00-01

Эл. почта: info@rguk.ru

