

На правах рукописи



ШАЛЮХИН КОНСТАНТИН АНДРЕЕВИЧ

**ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С
КИНЕМАТИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКОЙ**

05.02.18– «Теория механизмов и машин»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии наук

Научный руководитель: **Глазунов Виктор Аркадьевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хейло Сергей Валерьевич,**
доктор технических наук, доцент, и. о.
заведующего
кафедрой теоретической и прикладной механики
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им А.Н. Косыгина»

Бровкина Юлия Игоревна,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры "Техническая механика", ФГБОУ ВО
«Московский политехнический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (г. Волгоград)

Защита состоится «24» апреля 2018г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.059.05 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 101990, Москва, М. Харитоньевский пер., д.4.

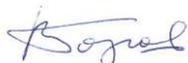
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) и на сайте <http://www.imash.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д 002.059.05.

Автореферат разослан «13» марта 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Бозров Виктор Маирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современный уровень развития техники требует разработки новых эффективных механизмов, которые могут применяться в различных областях промышленности и в исследовательских целях. Решением многих проблем техники является разработка механизмов параллельной структуры, отличающихся повышенными показателями по точности и грузоподъемности, либо по быстродействию. Однако у данных механизмов имеет место взаимная зависимость между перемещениями выходного звена от различных приводов, что усложняет управление и анализ. Поэтому актуальной является задача обеспечения кинематической развязки между различными степенями свободы. Ранее в этом направлении получены определенные результаты, в частности, Р. Клавелем, К. Миановским, И Минг Ченом, В. Аракелянном и С. Брио, К. Конгом и К. Госленом. Исследования в области кинематической развязки проводились также в ИМАШ РАН. Тем не менее, эта задача для полного набора из шести пространственных координат пока не решена.

В данной работе ставится задача обеспечить кинематическую развязку между движениями выходного звена вдоль осей декартовой системы координат, связанной с основанием, а также вращениями относительно этих осей. Это должно упростить математическое описание данных механизмов, повысить их функциональные возможности.

В силу изложенного и в связи с уникальностью синтезируемых механизмов тема данной работы представляется актуальной.

Целью диссертационной работы является расширение функциональных возможностей механизмов параллельной структуры путем обеспечения более полной кинематической развязки по сравнению с имеющимися решениями. Указанная цель в диссертации достигается посредством решения следующих задач:

1. Синтез схем механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой, обеспечиваемой различными конструктивными решениями.

2. Разработка аналитического решения прямой и обратной задач о положениях, прямой и обратной задач о скоростях для механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой.

3. Разработка алгоритмов построения рабочей зоны механизма параллельной структуры с кинематической развязкой для случаев постоянной и переменной ориентации рабочего органа.

4. Построение действующего макета механизма параллельной структуры с кинематической развязкой и экспериментальная проверка эффекта кинематической развязки.

Научная новизна заключается в следующих положениях:

1. Обеспечение кинематической развязки между движениями по различным координатам за счет наличия в каждой из трех кинематических цепей механизмов параллельной структуры шарнирных параллелограммов или зубчатых передач.

2. Обеспечение однозначного соответствия обобщенных и абсолютных координат в механизмах параллельной структуры и определение соотношений между линейными и угловыми скоростями при изменении ориентации выходного звена для постоянства положения его конечной точки.

3. Обеспечение оптимальных характеристик рабочего пространства механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой.

4. Построение конструкции кинематических цепей механизма параллельной структуры с кинематической развязкой, содержащей зубчатые передачи, выявление силовых и кинематических винтов, адекватно описывающих движение звеньев изготовленного макетного образца.

На защиту выносятся положения:

1. Наличие в каждой из трех кинематических цепей механизмов параллельной структуры двух шарнирных параллелограммов или зубчатых передач позволяет обеспечить кинематическую развязку не только между поступательным и вращательным движениями, но и между отдельными поступательными движениями по различным координатам.

2. В механизмах с кинематической развязкой существует однозначное соответствие обобщенных и абсолютных координат, что упрощает решение задачи о положениях; в случае же постоянства положения конечной точки рабочего органа для изменения углов его ориентации необходимо перемещение в линейных приводах, а угловые скорости определяют линейные.

3. Опытная проверка механизма на натурном макете показала наличие особых положений, связанных с потерей степени свободы (линейного перемещения по одному из направлений) при конфигурации, когда промежуточные звенья располагаются вдоль одной прямой.

4. Особых положений, связанных с потерей управляемости не возникает ввиду конструктивных особенностей сферического механизма.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке метода построения механизмов с кинематической развязкой, получении новых структурных схем механизмов, синтезе алгоритмов определения рабочей зоны для различных условий ориентации выходного звена.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что в работе синтезированы новые механизмы параллельной структуры с кинематической развязкой, обладающие уникальными свойствами, которые могут быть использованы в различных областях техники: технологические роботы, медицинские устройства, измерительные системы, тренажеры.

Методы, применяемые в работе. Использовались методы теории машин и механизмов, винтового исчисления, дифференциального исчисления, компьютерного анализа.

Достоверность научных результатов обусловлена строгостью математических выкладок при использовании апробированных допущений и проверкой полученных решений на натурном макете.

Апробация работы. Основные результаты были доложены на юбилейной XX международной интернет-ориентированной конференции молодых учёных и специалистов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2008), World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexico, 19-25 июня 2011 г, на Международной конференции «Колебания и волны в механических системах», Москва, 27-28 ноября 2012 г, на научно-практической конференции «Роботические технологии в медицине», Москва, 12.02.2016 г, на научно-практической конференции «Научное приборостроение - современное состояние и перспективы развития», Москва, 15-16 ноября 2016 г.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 12 работ, из них 4 статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК России, получено 15 патентов.

Структура диссертации включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы из 105 наименований. Общий объем диссертации составляет 108 страниц, содержит 47 рисунков и три таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении охарактеризована актуальность темы работы, показаны цели и задачи диссертации, обоснована ее научная новизна, а также практическая значимость.

В первой главе приведены основные типы механизмов параллельной структуры, их становление и развитие конструктивных особенностей, сферы их применения в технике, сформулирована проблема кинематической развязки, а также приведены примеры ее решения.

Отличительная черта механизмов параллельной структуры – это соединение выходного звена и неподвижного основания несколькими кинематическими цепями. Такая структура накладывает на выходное звено механизма определенное количество связей. Использовать механизмы параллельной структуры с нелинейными соотношениями между координатами входов и выходов предлагалось еще в первой половине прошлого века, но рост интереса к таким механизмам и начало их интенсивного использования учеными и инженерами происходили в 60-х – 80-х годах.

Следует отметить работы И. И. Артоболевского, Р. Болла, В. А. Глазунова, С. Гослена, В. Гофа, Е. Х. Гохмана, Ф. М. Диментберга, У. Клиффорда, А. Е. Кобринского, А. Ш. Колискора, М. З. Коловского, А. П. Котельникова, А. Ф. Крайнева, Н. И. Левитского, Ж. Мерле,

Е. П. Попова, Ю. Л. Саркисяна, К. Ханта, Э. Штуди и др. Синтез кинематической модели механизмов параллельной структуры, изучение их свойств в динамике представлены в работах Р. И. Ализاده, Е. И. Воробьева, В. Гофа, В. А. Глазунова, У.А. Джолдасбекова, А. Ш. Колискора, А.Ф. Крайнева, А.И. Корендясева, Л.И. Тывеса, Б. Л. Саламандры, Н.А. Серкова, Хейло С. В., Д. Стюарта, Ю.Л. Саркисяна, К. Ханта и мн. др.

Наилучшим методом кинематического, силового и динамического анализа механизмов параллельной структуры считается метод, основанный на винтовом исчислении. Классическими работами по винтовому исчислению в применении к пространственным механизмам являются работы Р. Болла, Е. Х. Гохмана, А. П. Котельникова, У. Клиффорда, Э. Штуди.

Механизмы параллельной структуры широко применяются в конструкциях симуляторов движения (полета, автомобильного движения, подводного плавания), технологических роботах, медицинских устройствах, измерительных системах и т.д.

Важной проблемой при построении механизмов параллельной структуры является кинематическая развязка. Она заключается в том, чтобы каждый привод обеспечивал бы одно перемещение выходного звена (поступательное или угловое) в декартовой системе координат.

Синтез механизмов с кинематической развязкой – это путь к созданию структур с 6 степенями свободы, для которых задачи кинематики решаются в явном виде, что значительно упрощает анализ кинематики механизма и выработку законов управления.

Часто речь идет не о полной развязке, а лишь о частичной. В этом случае может быть кинематическая связь между движениями выходного звена по отдельным координатам.

Принцип частичной развязки движений в манипуляторах с параллельной структурой реализован в роботе Дельта (рисунок 1)[17]. Это механизм с четырьмя степенями свободы. Основание связано с подвижной платформой тремя кинематическими цепями. Поступательные перемещения платформы по направлениям x , y и z обеспечиваются тремя вращательными приводами, закрепленными на основании. Выходное звено может вращаться вокруг вертикальной оси под действием четвертого привода через телескопический вал с двумя карданами на концах.

В данной конструкции осуществлен принцип частичной развязки движений, то есть поступательное движение платформы связано с действием каждого из трех приводов, в то время как вращательное движение выходного звена является независимым.

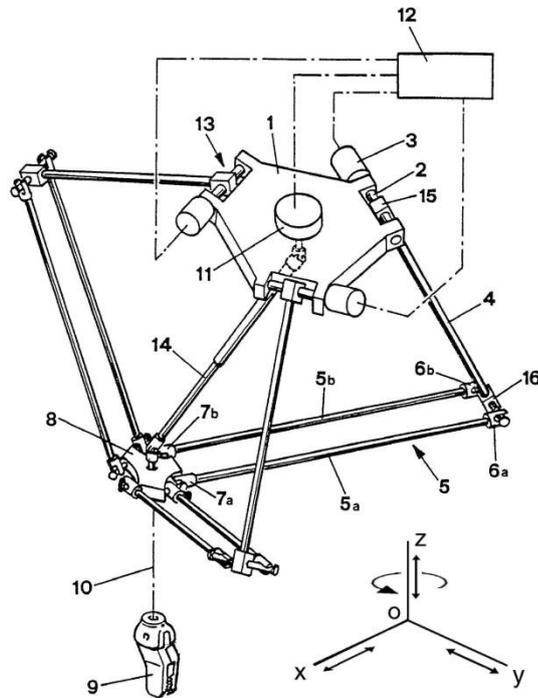


Рис.1. Робот Дельта

В схеме, предложенной польским исследователем К. Миановским - три кинематические цепи, в каждой из них имеются расположенные соосно линейный и вращательный двигатели, а также две пары шарниров с пересекающимися осями. Шарниры, сопряженные с выходным звеном, образуют сферический механизм (рисунок 2).

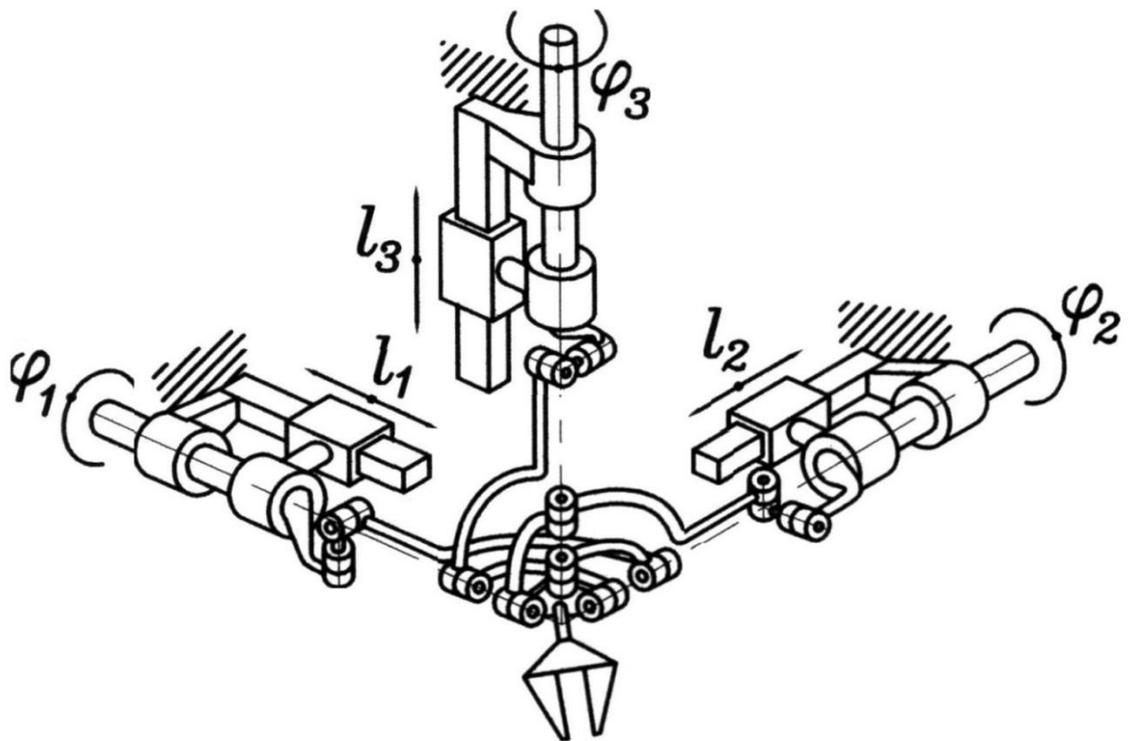


Рис.2. Робот Polman

В этом механизме выходное звено сохраняет свою ориентацию при поступательных перемещениях. Однако имеет место некоторая зависимость частных передаточных отношений от положения выходного звена. Поэтому говорить о полной кинематической развязке можно лишь при наличии существенных ограничений на удаление выходного звена от центральной точки рабочей зоны.

Эффективное решение задачи развязки для поступательных перемещений нашли К. Конг и К. Гослен. Механизм содержит три кинематические цепи с ортогонально расположенными поступательными двигателями. Развязка обеспечивается наличием в каждой кинематической цепи структурной группы из трех вращательных пар с параллельными осями. Такая схема обеспечивает постоянство передаточного отношения между приводом и выходным звеном. В Институте машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) была исследована данная схема в плане анализа структуры и жесткости. Был предложен ряд новых схем, в частности, был разработан механизм, содержащий дополнительные кинематические цепи, «локти», что позволяет исключить поступательные кинематические пары – направляющие.

Для проверки полученных теоретических результатов в области кинематической развязки в ИМАШ РАН сконструирован и изготовлен механизм параллельной структуры на базе универсальных шарниров с дополнительной связью.

Во второй главе приведены некоторые варианты механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой, построенных, как совокупность механизмов, соответствующих различным замкнутым группам винтов. Первый из рассматриваемых механизмов содержит три соединительные кинематические цепи $3 P-P-P-R-R-R$. Здесь P обозначает поступательную пару, а R – вращательную пару. В каждую из трех кинематических цепей входит по одной приводной поступательной паре, установленной на основании, по две поступательных пары в виде шарнирных параллелограммов, по одной приводной вращательной паре и по две неприводных вращательных пары. Данный механизм обладает частичной изотропностью, так как каждый линейный двигатель соответствует одной из декартовых координат x , y , z . Число степеней свободы, определенное по формуле Сомова-Малышева, равно 6.

Другой шестистепенной механизм, имеющий также три соединительных кинематических цепи $3 R-R-R-P-P-P$, имеет три привода вращения на основании и три поступательных привода – на подвижных звеньях. Каждая кинематическая цепь включает в себя одну приводную вращательную пару, установленную на основании, две неприводные вращательные пары, одну приводную поступательную пару и две поступательных пары, выполненные, как шарнирные параллелограммы. Все вращательные пары своими осями пересекаются в одной точке, последняя принята за центр системы координат. Число степеней свободы

этого механизма, определенное по формуле Сомова-Малышева, также равно 6.

Еще один пример шестистепенного механизма включает приводы, расположенные максимально близко к основанию, а расположение линейного и вращательного приводов в каждой цепи таково, что их оси совпадают. Механизм основан на трех соединительных кинематических цепях $3 R-P-P-P-R-R$. Каждая кинематическая цепь содержит одну приводную вращательную пару, размещенную на основании, одну приводную поступательную пару, две поступательные пары, выполненные, как шарнирные параллелограммы, а также две неприводные вращательные пары. Все неприводные вращательные пары своими осями пересекаются в одной точке (рисунок 3).

Для всех вышеописанных механизмов существуют особые положения, которые сопряжены с потерей одной или нескольких степеней свободы; они возникают, если любые из шести винтов одной из кинематических цепей зависимы линейно. При этом также могут существовать особые положения, которые соответствуют неконтролируемой подвижности выходного звена.

Далее представлены механизмы параллельной структуры с кинематической развязкой, в которых параллелограммный механизм заменен на ременную передачу, либо на блок, состоящий каждый из трех шестерен, где первая и последняя шестерни имеют одинаковое число зубьев (рисунок 4).

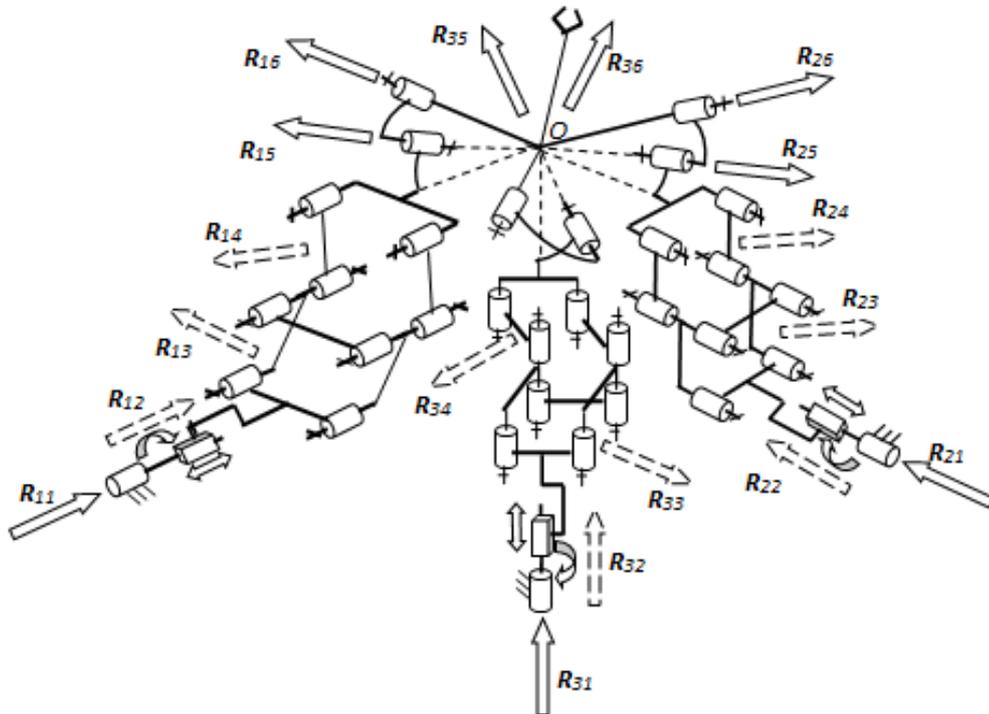


Рис.3. Механизм с приводами на основании

Все предложенные механизмы являются изоморфными, то есть имеющими постоянное передаточное отношение между перемещением

привода поступательного движения и перемещением выходного звена по соответствующей координате. Это достигается тем, что оси приводов поступательного движения всех кинематических цепей установлены взаимно ортогонально.

Кроме того, поскольку каждое из трех промежуточных звеньев установлено с пересечением в одной точке осей всех шарниров сферических механизмов, то при работе каждого вращательного привода имеют место вращения в шарнирах соответствующей кинематической цепи, и вращение выходного звена вокруг точки происходит без изменения ее положения.

В третьей главе рассмотрен механизм параллельной структуры с кинематической развязкой (рисунок 4), отличающийся тем, что в сферической части механизма несколько изменена структура. Выходное звено, представляющее собой стержень со схватом на конце, отклоняется двумя вращательными приводами посредством дугообразных направляющих, а собственное вращение передается через карданный шарнир. В поступательной части параллелограммные механизмы заменены передачами, состоящими каждая из трех шестерен, где первая и последняя шестерни имеют одинаковое число зубьев. Правомерность такой замены была показана во второй главе.

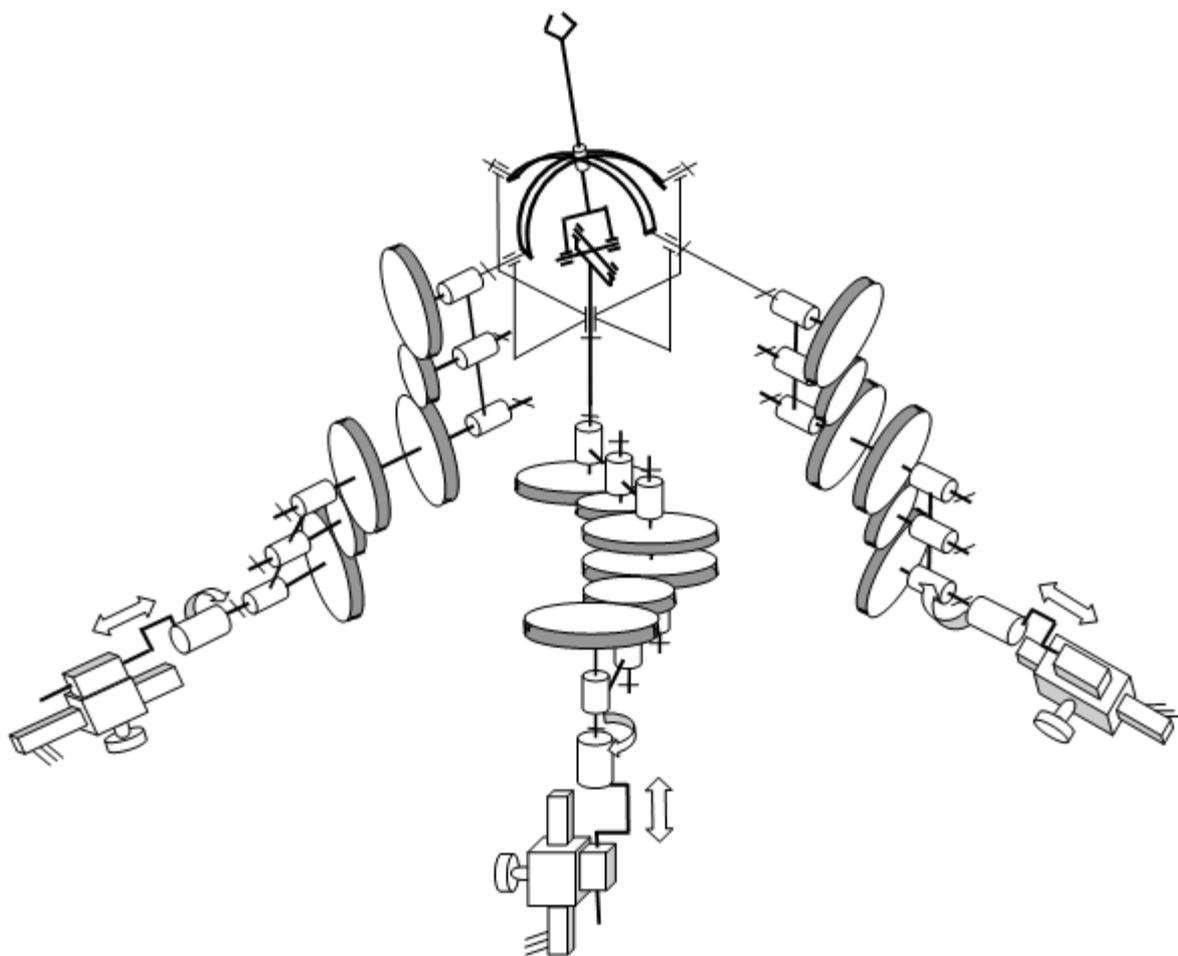


Рис.4. Механизм с зубчатыми передачами

Рассмотрена задача о положениях (прямая и обратная), а также задача о скоростях. Задача о положениях решается через выявление соотношений между обобщенными координатами, связанными с поступательными и вращательными приводами, и абсолютными координатами. Простоту решения задачи для поступательных движений обеспечивает изоморфность, то есть постоянство передаточного отношения между перемещениями в приводах поступательного движения и соответствующими перемещениями выходного звена. Достигается она тем, что оси приводов поступательного движения каждой кинематической цепи установлены взаимно ортогонально друг другу и при перемещении в каждом приводе для данной кинематической цепи имеет место поступательное перемещение в направлении, перпендикулярном плоскостям зубчатых передач данной кинематической цепи. В двух других кинематических цепях имеют место поступательные движения в плоскостях соответствующих зубчатых передач. Взаимная ортогональность приводов поступательного движения трех кинематических цепей обуславливает поступательное движение выходного звена только вдоль оси перемещения соответствующего привода с передаточным отношением, равным единице. Другими словами, поступательные обобщенные координаты равны абсолютным координатам, с поправкой на постоянную величину. Для угловых координат в качестве обобщенных выбраны углы поворота дугообразных направляющих: угол прецессии ψ и угол нутации ϑ . Угол собственного вращения φ выходного звена один и тот же в системах абсолютных и обобщенных координат. Используя свойства векторного произведения, выражаем единичный вектор ориентации выходного звена через обобщенные координаты α, β :

$$\begin{pmatrix} i \frac{\cos\alpha \sin\beta}{\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta \cdot \sin^2\alpha}} \\ j \frac{(-\sin\alpha \cos\beta)}{\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta \cdot \sin^2\alpha}} \\ k \frac{(\cos\alpha \cos\beta)}{\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta \cdot \sin^2\alpha}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Компоненты того же вектора, выраженные через углы ψ и ϑ , равны:

$$\begin{pmatrix} \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) \\ -\cos(\psi) \cdot \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Решение задачи о положениях получаем, приравнявая соответствующие компоненты вектора в абсолютной и обобщенной системах координат:

$$\begin{cases} \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}} = \sin \psi \sin \vartheta, \\ \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}} = \cos \psi \sin \vartheta, \\ \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}} = \cos \vartheta. \end{cases} \quad (3)$$

Разрешая уравнения (3) относительно углов ψ и ϑ для прямой задачи, получаем:

$$\psi = \arctg(\tg \beta \ctg \alpha), \quad (4)$$

$$\vartheta = \arctg\left(\frac{\tg \beta}{\sin(\arctg(\tg \beta \ctg \alpha))}\right), \quad (5)$$

для обратной задачи значения α и β будут иметь следующий вид:

$$\beta = \arctg(\sin \psi \tan \vartheta), \quad (6)$$

$$\alpha = \arctg(\cos \psi \tan \vartheta). \quad (7)$$

Задача о скоростях решена по методу Анжелеса-Госслена, то есть через частные производные от неявных функций, определяемых по разности угловых координат выходного звена, выраженных в относительной и абсолютной системах. Итоговые соотношения в виде уравнений, связывающих углы и скорости в двух системах, имеют вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\cos^2 \alpha \sin \beta + \sin^2 \alpha \sin \beta \cos^2 \beta - \sin^2 \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos^2 \beta}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\alpha}{dt} + \\ & + \frac{\cos^2 \alpha \sin \beta + \sin^2 \alpha \sin \beta \cos^2 \beta - \sin^2 \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos^2 \beta}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\beta}{dt} = \sin \vartheta \frac{d\vartheta}{dt}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\cos \alpha \cos \beta - 2\sin^2 \alpha \cos \alpha \sin^2 \beta \cos \beta}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha \sin \beta}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\beta}{dt} = \\ & = \sin \psi \cdot \sin \vartheta \frac{d\psi}{dt} - \cos \psi \cdot \cos \vartheta \frac{d\vartheta}{dt}. \end{aligned} \quad (9)$$

Решена также задача о скоростях механизма при изменении угловых координат выходного звена (угла сервиса) и заданном положении точки окончания его выходного звена. При этом необходимо согласованное управление линейными и угловыми координатами. Итоговые уравнения, где L_3 – длина выходного звена; X_C , Y_C , Z_C – координаты его начальной точки:

$$\dot{X}_C = \frac{L_3 \sin \alpha \cos^2 \beta \sin \beta}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{L_3 \cos \beta \cos \alpha}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\beta}{dt}, \quad (10)$$

$$\dot{Y}_c = \frac{L_3 \cos \beta \cos \alpha}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{L_3 \sin \alpha \cos^2 \alpha \sin \beta}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\beta}{dt}, \quad (11)$$

$$\dot{Z}_c = - \frac{L_3 \cos^3 \beta \sin \alpha}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{L_3 \cos^3 \alpha \sin \beta}{\sqrt{(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)^3}} \frac{d\beta}{dt}. \quad (12)$$

В четвертой главе рассмотрены параметры рабочей зоны механизма параллельной структуры, обладающего свойствами кинематической развязки (рисунок 4). Представлен алгоритм построения рабочей зоны с использованием подхода к расчету обобщенных координат, исходя из известных абсолютных координат выходного звена, другими словами, на основе алгоритма решения обратной задачи о положениях. При этом для определения границ рабочей зоны требуется многократно решать обратную задачу о положениях, каждый раз контролируя, отвечают ли координаты ограничениям, налагаемым геометрическими характеристиками конструкции. Это относится к ограничениям на максимальные перемещения линейных приводов, то есть на крайние значения обобщенных координат. Программа моделирования рабочей зоны построена следующим образом. Задаются длины звеньев L_1 и L_2 , в данном механизме они одинаковы и равны 3,5 см, кроме того, задаются начальные значения координат x_n , y_n и z_n , равные нулю, число точек kol , равное 10, и конечные значения координат x_k , y_k , z_k , выбранные равными 7,0 см, то есть сумме длин звеньев.

Организован цикл расчета координат точки рабочей зоны zon с шагом, равным диапазону изменения соответствующей координаты (например, $x_k - x_n$), отнесенному к количеству точек kol , со счетчиками i – по координате x , j – по координате y , k – по координате z . В цикле проверяется выполнение условий соответствия геометрии звеньев текущим координатам точек, например, $x^2 + y^2 > (L_1 + L_2)^2$ и $x^2 + y^2 > (L_1 - L_2)^2$.

Данные ограничения определены следующим образом. Максимальная координата по любому направлению должна быть не больше, чем сумма длин звеньев. С другой стороны, минимальное значение координаты равно разности длин указанных звеньев.

В случае если одно из указанных соотношений справедливо, такая конфигурация звеньев невозможна. При этом z_1 , а также текущим координатам x , y , z присваиваются нулевые значения. Аналогичные соотношения проверяются также для сочетаний координат x и z , y и z .

Ниже приведен пример графического отображения рабочей зоны (рисунок 5).

Проведены расчеты рабочей зоны при различных значениях длин звеньев. Выявлено значительное влияние на размер и форму рабочей зоны соотношения размеров звеньев.

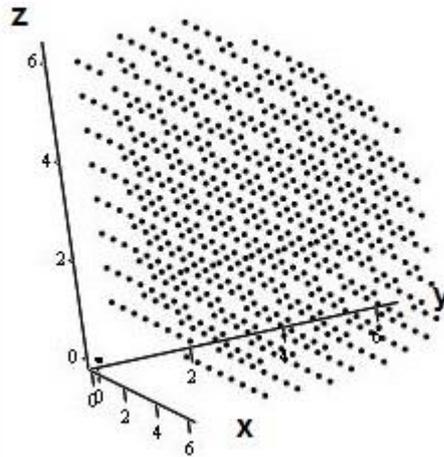


Рис.5

Определена также рабочая зона механизма при изменении угла сервиса, с условием постоянства положения конечной точки выходного звена. Программа моделирования рабочей зоны построена следующим образом. Задаются длины звеньев L_1 , L_2 и расстояние от точки пересечения осей сферического механизма до конечной точки выходного звена L_3 , в данном механизме они равны соответственно 3,5 см, 3,5 см и 1,0 см, кроме того, задаются начальные значения координат x_n , y_n и z_n , а также угловая координата выходного звена α_n , равные нулю; число точек kol , равное 10, и конечные значения координат x_k , y_k , z_k , выбранные равными 7,0 см, то есть сумме длин звеньев. Конечное значение угловой координаты α_k выбрано равным π , изменение угловой координаты отражает вращение выходного звена относительно оси X.

Организован цикл расчета координат точки рабочей зоны z_{on} с шагом, равным диапазону изменения соответствующей координаты со счетчиками: i – по координате x , j – по (например, $x_k - x_n$), отнесенному к числу точек kol , координате y , k – по координате α .

Ограничения, накладываемые на координаты y и z условием постоянства конечной точки выходного звена, выражены геометрическими соотношениями $y_k - L_3 \cos \alpha$ и $z_k - L_3 \sin \alpha$. В цикле проверяется выполнение условий соответствия геометрии звеньев текущим координатам точек, например, $x^2 + y^2 > (L_1 + L_2)^2$ и $x^2 + y^2 > (L_1 - L_2)^2$. В случае если одно из этих соотношений справедливо, такая конфигурация звеньев невозможна. При этом координате z_1 , а также текущим координатам x , y , z присваиваются нулевые значения. Аналогичные соотношения проверяются также для сочетаний координат x и z , y и z (рисунок 6).

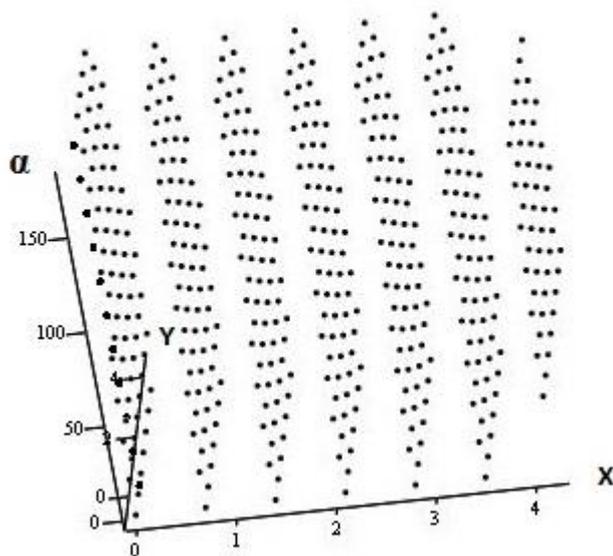


Рис.6. Рабочая зона при изменениях двух координат и угла.

В пятой главе описана конструкция макета механизма с шестью степенями свободы с кинематической развязкой, показаны границы рабочей зоны, крайние положения, а также проанализированы особые положения, связанные с утратой одной из степеней свободы и неконтролируемой подвижностью выходного звена.

Для практической реализации в виде макета была выбрана схема с зубчатыми передачами в промежуточных звеньях и сферическим механизмом на основе дугообразных направляющих для двух углов поворота и шарниром Гука для третьего угла (рисунок 4).

На основе теории винтов выявлены особые положения данного механизма, которые сопряжены с потерей одной или нескольких степеней свободы. Они возникают, если звенья с блоками шестерен в одной из кинематических цепей располагаются вдоль одной линии.

Также существуют особые положения, соответствующие неконтролируемой подвижности выходного звена. Это происходит в тех случаях, когда обе дугообразные направляющие лежат в одной плоскости, и в этой же плоскости, соответственно, оказывается и выходное звено. При этом возникает подвижность выходного звена в плоскости, неконтролируемая приводами обеих дугообразных направляющих.

Еще один тип особых положений возникает, когда выходное звено находится на одной прямой с осью вращения одной из направляющих, и управление выходным звеном при ее помощи невозможно.

Необходимо отметить, что вышеописанные особые положения для сферического механизма являются гипотетическими, и в реальности недостижимы из-за ограничений, вносимых конструкцией последнего.

Механизм (рисунок 7) собран на шестиугольной раме из дюралюминиевого сплава. Консоли крепления кинематических цепей

расположены в трех углах рамы, в остальных углах установлены стойки крепления к подставке.

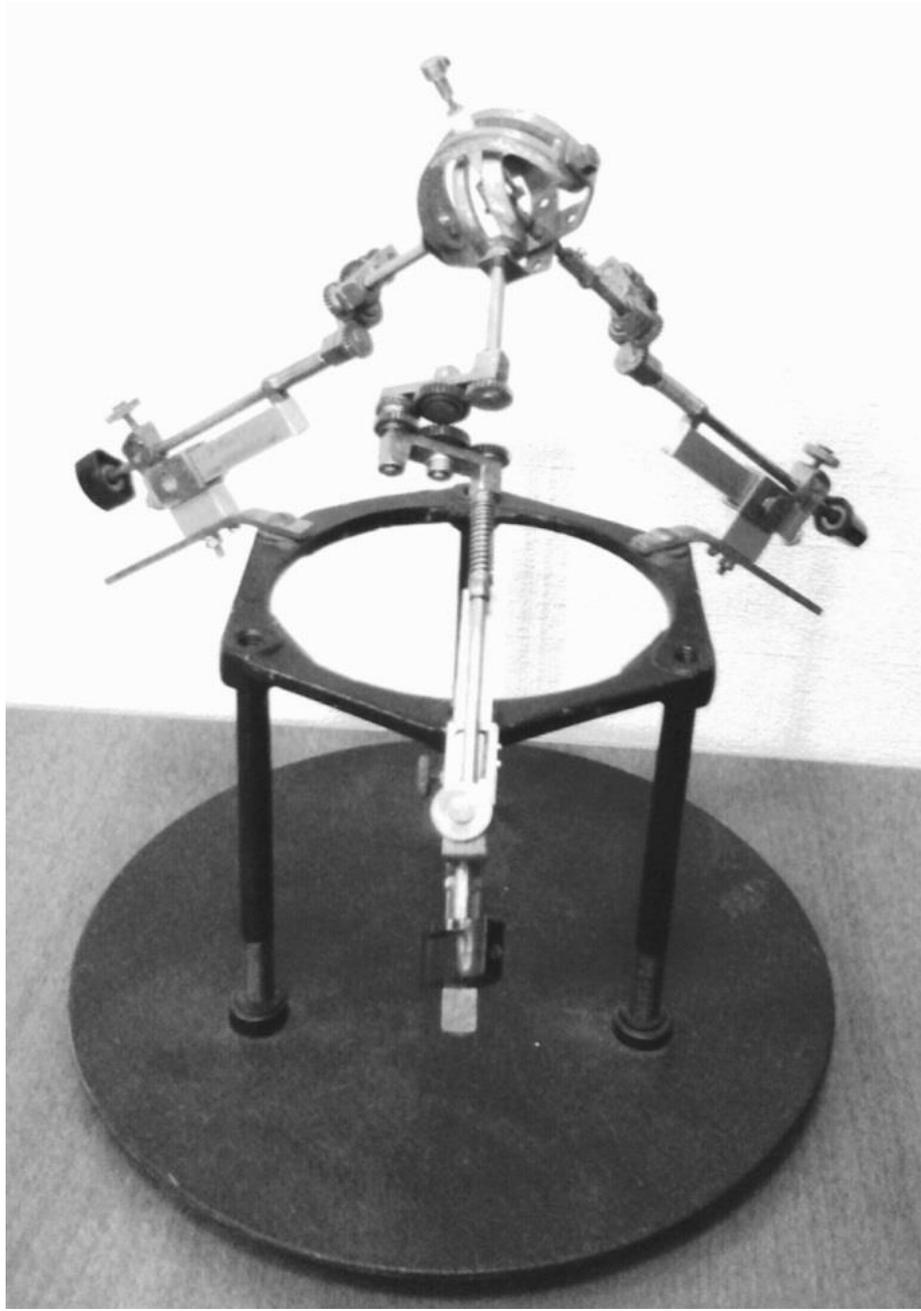


Рис.7. Общий вид макета

Каждая кинематическая цепь крепится к консоли через промежуточную поступательную пару, соосную с основной поступательной парой кинематической цепи, что позволяет увеличить общий диапазон поступательных перемещений собственно поступательной пары кинематической цепи. Промежуточная поступательная пара имеет фиксатор, которым она закрепляется в любом положении, в пределах своего диапазона перемещения. Основная поступательная пара каждой кинематической цепи выполнена в виде цилиндрического стального вала, что позволяет совместить ее с

вращательной парой. Промежуточные звенья выполнены из латуни, шестерни имеют зубчатый венец, выполненный из стали. Расстояние между осями крайних шестерен – 35 мм, одинаковое для всех промежуточных звеньев.

Сферический механизм (рисунок 8) выполнен из латуни и состоит из двух пар дугообразных направляющих. В одном конце каждой пары направляющих жестко зафиксирован выходной вал второго промежуточного звена, с другого конца соосно с валом установлена полуось вращения этой пары направляющих. Вал и полуось установлены на корпусе сферического механизма в подшипниках скольжения, а ось вращения проходит через центр окружности, образующей серединную дугу направляющих.

Промежуточная втулка выходного звена выполнена из фторопласта и может перемещаться, постоянно оставаясь между дугами из каждой пары. Втулка имеет квадратное сечение и выполнена разрезной, так как угол между плоскостями дугообразных направляющих при различном взаимном положении изменяется.



Рис.8. Сферический механизм макета

Выходной вал третьей кинематической цепи сопряжен с корпусом сферического механизма через подшипник скольжения, так что его ось проходит через точку пересечения осей вращения направляющих. Конец выходного вала третьей кинематической цепи через карданную передачу

соединен с выходным звеном, вращающимся в подшипниках скольжения внутри промежуточной втулки выходного звена. Диапазон вращения выходного звена по этой координате неограничен.

Анализ особых положений механизма макета на основе экспериментальных данных выявил особые положения, связанные с потерей степени свободы – линейного перемещения по одному из направлений – при конфигурации, когда промежуточные звенья располагаются вдоль одной прямой. Особых положений, связанных с потерей управляемости, не возникает, ввиду конструктивных особенностей сферического механизма, используемого в макете.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В работе получены следующие результаты:

1. Синтезированы схемы механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой, обеспечиваемой наличием в каждой кинематической цепи двух шарнирных параллелограммов, либо двух зубчатых передач.

2. Для механизмов с кинематической развязкой решены задачи о положениях и скоростях, учитывающие постоянные и переменные ориентации выходного звена.

3. Для механизмов с кинематической развязкой построены рабочие зоны, учитывающие постоянную и переменную ориентации выходного звена.

4. Разработан действующий макет механизма параллельной структуры с кинематической развязкой. Для данного макета определены плюккерovy координаты силовых и кинематических винтов, соответствующих кинематическим цепям.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Наличие в каждой из трех кинематических цепей механизмов параллельной структуры двух шарнирных параллелограммов или двух зубчатых передач позволяет обеспечить кинематическую развязку не только между поступательным и вращательным движениями, но и отдельными поступательными движениями по различным координатам.

2. В механизмах с кинематической развязкой существует однозначное соответствие обобщенных и абсолютных координат, что упрощает решение задачи о положениях; в случае же постоянства положения конечной точки рабочего органа для изменения углов ориентации необходимо перемещение в линейных приводах, а угловые скорости определяют линейные.

3. Конструкция кинематических цепей механизма параллельной структуры с кинематической развязкой, содержащая зубчатые передачи, наиболее легко реализуема с практической точки зрения. Силовые и кинематические винты адекватно описывают движение изготовленного макетного образца.

4. Имеют место особые положения, характеризующиеся потерей одной степени свободы (линейного перемещения). Других особых положений не возникает из-за конструктивных ограничений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Глазунов В. А. Манипулятор параллельной структуры с тремя ортогональными поступательными степенями подвижности и анализ его жесткости / В. А. Глазунов, В. П. Касилов, А. В. Козырев, С. В. Левин, **К. А. Шалюхин**. // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 3. – С. 48 – 54. (Шалюхину К. А. принадлежит методика определения жесткости кинематической цепи).

2. Глазунов В. А., Разработка механизмов параллельной структуры с кинематической и динамической развязкой / В. А. Глазунов, П. О. Данилин, С. В. Левин, Л. И. Тывес, **К. А. Шалюхин** // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 2. – С. 23 – 32. (Шалюхину К. А. принадлежит алгоритм определения особых положений).

3. Глазунов В. А. К анализу и классификации устройств относительного манипулирования / В. А. Глазунов, А. Б. Ласточкин, **К. А. Шалюхин**, П. О. Данилин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009 – № 4. – С. 81 – 85. (Шалюхину К. А. принадлежит алгоритм определения рабочей зоны).

4. Гаврилина Л. В. Разработка роботов параллельной структуры портального типа для ортопедических операций. / Л. В. Гаврилина, С. М. Демидов, И. А. Орлов, **К. А. Шалюхин**, И. Б. Шарапов, П. А. Швец // Медицина и высокие технологии. – 2017. – № 3. – С. 55 – 61. (Шалюхину К. А. принадлежит метод синтеза портального манипулятора).

Справочно: **Шалюхин К. А.** Задачи кинематического анализа и особых положений механизмов роботов параллельной структуры / К. А. Шалюхин, Г. В. Рашоян, А. К. Алешин // Проблемы машиностроения и надежности машин. (прошла рецензирование и будет опубликована в 2018. – № 3.) (Шалюхину К. А. принадлежит способ анализа особых положений).

Другие публикации:

6. Glazunov V. An algorithm for constructing workplace arrangements parallel structures / V. Glazunov, S. Demidov, I. Orlov, K. Shaluykhin, // International scientific journal of IFToMM "Problems of mechanics" – 2016 – № 3 (64). P. 21 – 26.

7. Глазунов В. А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры для медицинского оборудования / В. А. Глазунов, С. В. Левин, К. А. Шалюхин, И. Б. Шарапов // Материалы научно-практической конференции «Научное приборостроение - современное состояние и перспективы развития. – 2016. – С. 174 – 175.

8. Глазунов В. А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и некоторые их применения в медицине / В. А. Глазунов, А. В. Духов, С.А. Шептунов, С. А. Скворцов, А. К. Алешин, Г. В. Рашоян, К. А. Шалюхин, С. В. Левин // Качество. Инновации. Образование. – 2016. - Т. 2, № 2. – С. 84-88.

9. Глазунов В. А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и некоторые их применения в медицине / В. А. Глазунов, А. В. Духов, С.А. Шептунов, С. А. Скворцов, А. К. Алешин, Г. В. Рашоян, К. А. Шалюхин, С. В. Левин // Материалы научно-практической конференции «Роботические технологии в медицине». – Москва, 2016.

10. Глазунов В.А. Изоморфный механизм параллельной структуры как технологический робот. / В.А. Глазунов, С.В. Левин, К.А. Шалюхин // Материалы Международной конференции «Колебания и волны в механических системах».– 2012. – С. 81 –82.

11. Glazunov V. A. On Two Kinds of Decoupled Parallel Mechanisms / V. A. Glazunov, L. I. Tyves., P. O. Danilin, K. A. Shaliukhin, S. V. Levin // World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexico. – 2011. – P. 74 –75.

12. Глазунов В. А. К анализу механизмов относительного манипулирования. / В. А. Глазунов, А. Б. Ласточкин, К. А. Шалюхин, П. О. Данилин // Материалы Юбилейной XX международной Интернет-ориентированной конференция молодых учёных и специалистов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2008). Москва, 2008. – С. 89 – 91.

В результате работы получены следующие патенты:

1. Патент РФ на изобретение № 2403141 / Глазунов В. А., Тывес Л. И., Шалюхин К. А. Пространственный механизм. Оп.10.11.2010. Бюл. № 31.

2. Патент РФ на изобретение № 2412798 / Глазунов В. А., Левин С. В., Шалюхин К. А. Пространственный механизм. Оп.27.02.2011. Бюл. № 6.

3. Патент РФ на полезную модель № 164091 / Глазунов В. А., Левин С. В., Шалюхин К. А., Духов А. В., Козырев А. В. Пространственный механизм с шестью степенями свободы. Оп. 20.08.2016. Бюл. № 23.

4. Патент РФ на полезную модель № 115709 / Глазунов В. А., Левин С. В., Ковалев В. Е., Сухоруков Р. Ю., Шалюхин К. А. Робототехническая технологическая установка. Оп.10.05.2012. Бюл. № 13.

5. Патент РФ на полезную модель № 125118 / Глазунов В.А., Левин С.В., Лысогорский А. Е., Календарев А. В., Шалюхин К. А. Пространственный механизм. Оп. 27.02.2013. Бюл. № 6.

6. Патент РФ на изобретение № 2478464 / Глазунов В. А., Левин С. В., Ковалев В. Е., Сухоруков Р. Ю., Шалюхин К. А. Модульная

робототехническая технологическая установка. Оп. 10.04.2013. Бюл. № 10.

7. Патент РФ на полезную модель № 133045 / Ганиев Р. Ф., Касилов В. П., Глазунов В. А., Левин С. В., Шалюхин К. А. Пространственный механизм со стабилизирующими кинематическими цепями. Оп. 10.10.2013. Бюл. № 28.

8. Патент РФ на полезную модель № 147057 / Глазунов В. А., Ласточкин А. Б., Рашоян Г. В., Левин С. В., Шалюхин К. А. Пространственный механизм с шестью степенями свободы. Оп. 27.10.2014. Бюл. № 30.

9. Патент РФ на полезную модель № 146894 / Глазунов В. А., Ласточкин А. Б., Костерева С. Д., Левин С. В., Шалюхин К. А. Манипулятор параллельной структуры с шестью степенями свободы. Оп. 20.10.2014. Бюл. № 29.

10. Патент РФ на полезную модель № 142566 / Ганиев Р. Ф., Касилов В. П., Глазунов В. А., Шалюхин К. А., Левин С. В. Пространственный механизм. Оп. 27.06.2014. Бюл. № 18.

11. Патент РФ на полезную модель № 157044 / Глазунов В. А., Левин С. В., Таипов М. А., Шалюхин К. А. Пространственный механизм. Оп. 20.11.2015. Бюл. № 32.

12. Патент РФ на полезную модель № 154785 / Глазунов В. А., Левин С. В., Таипов М. А., Шалюхин К. А. Пространственный механизм. Оп. 10.09.2015. Бюл. № 25.

13 Патент РФ на полезную модель № 164757 / Глазунов В. А., Левин С. В., Шалюхин К. А., Скворцов С. А. Манипулятор параллельной структуры с шестью степенями свободы. Оп. 10.09.2016. Бюл. № 25.

14. Патент РФ на полезную модель № 160607 / Глазунов В. А., Левин С. В., Пушкарь Д. Ю., Шалюхин К. А., Шептунов С. А. Пространственный механизм манипулятора. Оп. 27.03.2016. Бюл. № 9.

15. Патент РФ на полезную модель № 169275 / Глазунов В. А., Борисов В. А., Левин С. В., Шалюхин К. А., Шарапов И. Б. Манипулятор параллельной структуры с пятью степенями свободы. Оп. 13.03.2017 Бюл. № 8.