
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621.01,62-231.3,621.83,531.8

**РОБОТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С КРУГОВОЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ:
СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ,
МЕТОДОВ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА**© 2022 г. С. В. Киселев¹, А. В. Антонов¹, А. С. Фомин^{1,*}¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: alexey-nvkz@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.08.2021 г.

Принята к публикации 20.10.2021 г.

В статье представлен обзор различных схем роботов параллельной структуры с круговой направляющей, обеспечивающих неограниченный поворот выходного звена вокруг одной из осей. Рассмотрены известные методы и алгоритмы проведения структурного и параметрического синтеза и анализа, исследования особых положений и построения рабочих зон таких роботов. Выполненное исследование позволяет не только оценить текущее состояние изученности проблем синтеза и анализа роботов данного типа, но и указывает на возможные направления дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: механизм, манипулятор, робот параллельной структуры, круговая направляющая, кинематическая цепь, степень свободы, структурный синтез и анализ, рабочая зона, особые положения, параметрический синтез

DOI: 10.31857/S0235711922010059

Необходимость решения новых технологических задач, повсеместная автоматизация технологий и процессов требуют создания более совершенных исполнительных устройств с продвинутыми функциональными свойствами. В настоящее время все большее распространение в технике получают робототехнические системы, построенные с параллельной структурой. Робот параллельной структуры – это автоматизированная механическая система, в которой выходное звено управляется несколькими кинематическими цепями, имеющими, как правило, отдельные приводы. Определяющими преимуществами роботов параллельной структуры являются повышенная точность позиционирования, повышенная жесткость, возможность получения больших скоростей и ускорений выходных звеньев, а также способность манипулирования большими нагрузками.

Постоянное совершенствование структуры уже существующих и разработка принципиально новых роботов параллельной структуры привели к возникновению их отдельных типов и классов. Это в свою очередь поспособствовало появлению новых методов их синтеза и анализа, которые имеют весьма существенные отличия для отдельных представителей таких роботов. Особый интерес с точки зрения возможности реализации новых функциональных свойств представляют роботы параллельной структуры с круговой направляющей. Их уникальность заключается в обеспечении неограниченного поворота выходного звена вокруг одной из осей. Данное свойство значительно расширяет возможности практической реализации таких роботов во многих областях, в том числе в аддитивных технологиях, роботохирургии, измери-

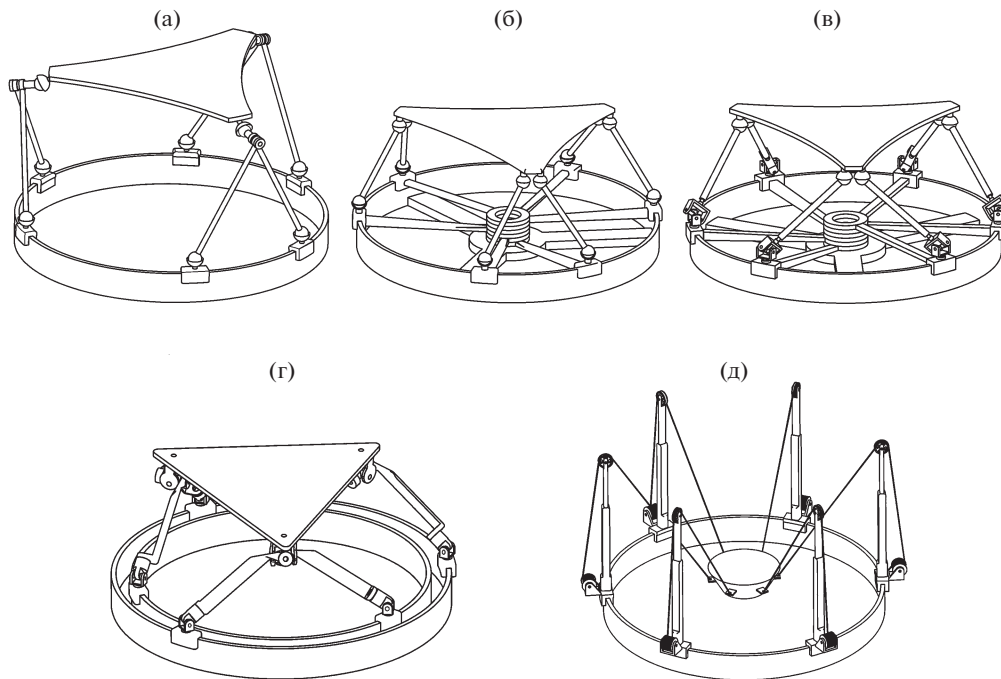


Рис. 1. Модели шестиподвижных роботов параллельной структуры с круговой направляющей и шестью кинематическими цепями.

тельных и испытательных устройствах, обучающих системах, авто- и авиатренажерах, космически-инспирированных системах и ряде других важных приложений.

Настоящее исследование направлено на проведение аналитического обзора известных архитектур роботов параллельной структуры с круговой направляющей, применяемых для выполнения различных технологических операций, и на систематизацию методов их синтеза и анализа.

Известные модели роботов с круговой направляющей. Модели роботов с шестью степенями свободы. Обратимся к систематическому обзору известных схем роботов параллельной структуры с круговой направляющей, в которых обеспечивается возможность неограниченного поворота вокруг одной из осей координат. Начнем с рассмотрения систем, имеющих шесть степеней свободы.

Модели роботов с шестью кинематическими цепями. Роботы такого типа отличаются не только по числу степеней свободы, но и по числу кинематических цепей, расположенных между стойкой и выходным звеном. Первой шестиподвижной системой с шестью кинематическими цепями, синтезированной в этом направлении, является манипулятор [1], приведенный на рис. 1а. В манипуляторе каждая из шести кинематических цепей имеет ведущее звено в виде каретки. В роботе имеются три пассивные подвижности звеньев, расположенных при платформе, возникающие за счет того, что центры вращательных шарниров смежных штанг и верхних сферических шарниров лежат на одной прямой.

Следующим роботом, созданным в этом направлении, является ротопод, показанный на рис. 1б [2]. Здесь шесть степеней свободы выходного звена контролируются шестью каретками, которые совершают вращение вокруг центра круговой направляющей.

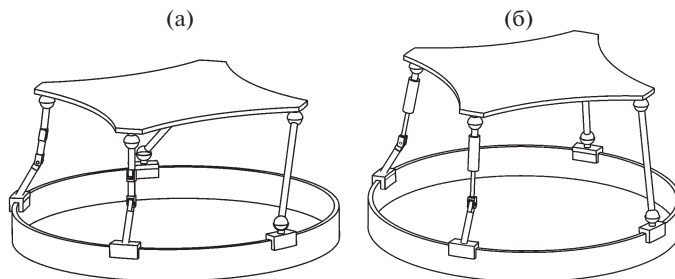


Рис. 2. Модели шестиподвижных роботов параллельной структуры с круговой направляющей и четырьмя кинематическими цепями.

щей. Имеют место шесть пассивных подвижностей за счет поворота штанг вокруг их продольных осей. Устранить данные подвижности можно путем замены нижнего сферического шарнира на карданный в каждой кинематической цепи. В таком случае робот имеет структуру 6-*RUS* [3] (рис. 1в).

Также известен робот с двумя круговыми направляющими (рис. 1г) [4]. Его применение связано с микропозиционированием. Шесть цепей, установленных между стойкой и платформой, образуют три точки соединения с платформой. При этом структура робота сформирована исключительно вращательными шарнирами.

На рис. 1д представлен робот с круговой направляющей с тросовыми звеньями [5]. В нем на каждой каретке установлено два привода. Первый контролирует смещение каретки вдоль круговой направляющей, а второй обеспечивает натяжение троса.

Модели роботов с четырьмя кинематическими цепями. Рассмотрим известные модели шестиподвижных роботов параллельной структуры с круговой направляющей, где выходное звено соединяется с основанием четырьмя цепями. На рис. 2 представлены две модели таких роботов. Первая образована цепями 2-*RRRS* и 2-*RSS* (рис. 2а) [6], вторая – цепями 2-*RRPS* и 2-*RSS* (рис. 2б) [7]. Кроме приводных звеньев – кареток, в каждой цепи *RRRS* (рис. 2а) или *RRPS* (рис. 2б) установлено еще по одному приводу. Отметим, что в каждом механизме существуют две пассивные подвижности, возникающие за счет поворота штанг со сферическими шарнирами вокруг собственных продольных осей.

Модели роботов с тремя кинематическими цепями. Далее рассмотрим известные модели шестиподвижных роботов с тремя кинематическими цепями. Одним из первых роботов такого типа является 3-*RRPS* робот (рис. 3а) [8]. В каждой цепи приводными звеньями являются каретка и шток, управляющие движением платформы.

Другим примером робота с тремя кинематическими цепями является “Eclipse” – робот, имеющий структуру 3-*RPRS* (рис. 3б) [9]. Такое строение робота обеспечивает высокопроизводительную обработку различных элементов. Робот такого типа включает восемь приводных звеньев при шести степенях свободы выходного звена. Наличие дополнительных приводов позволяет исключить особые положения. Приводы установлены на каждой каретке и ползуне, перемещающемся по вертикальной штанге, а также на двух шатунах, соединяемых с выходным звеном. В [10] представлены вариации данного робота с избыточными приводами.

Позже данный робот был модернизирован до модели “Eclipse II” (рис. 3в) [11] с целью применения в качестве тренажера. В отличие от предыдущей модели в таком роботе третья вертикальная штанга заменена на кольцо, имеющее возможность неограниченного поворота вокруг вертикальной оси. Робот включает шесть приводных звеньев: три каретки, сопряженные с круговой направляющей, и три пол-

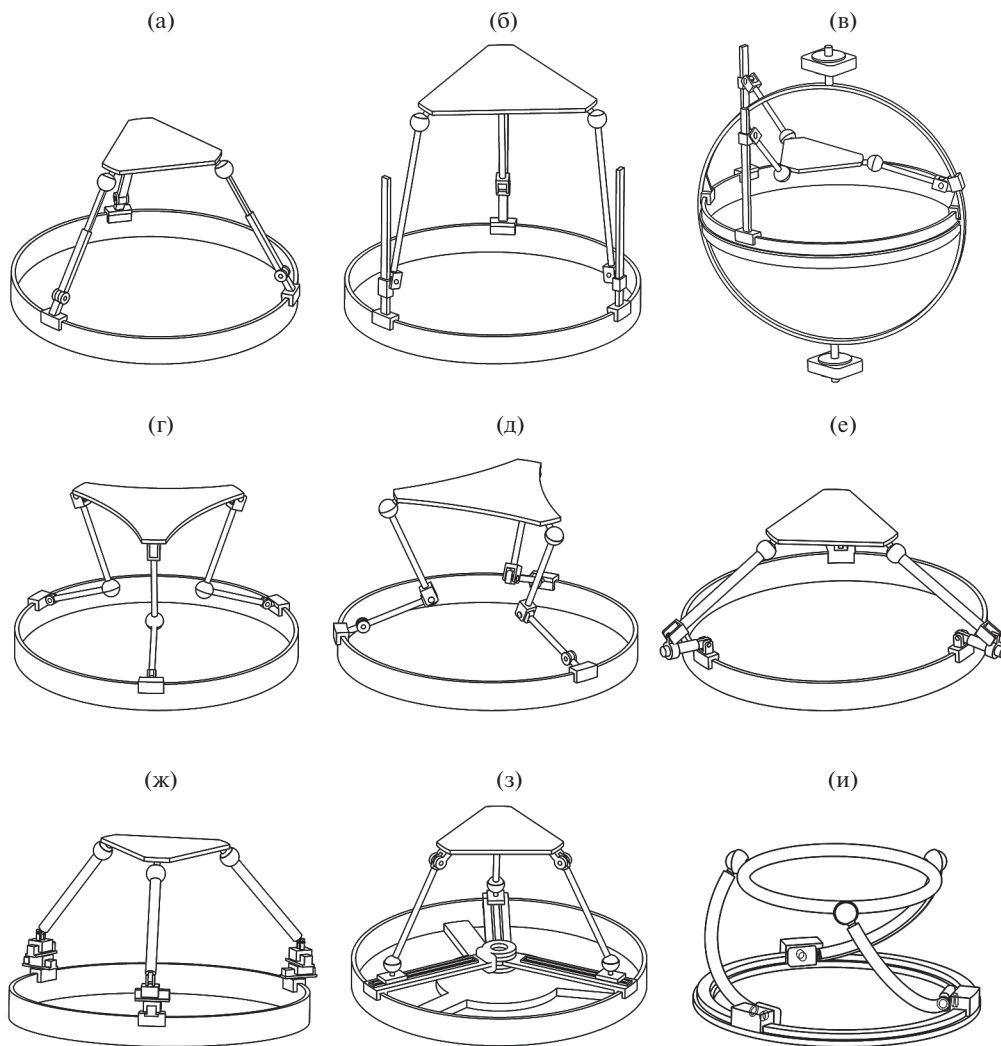


Рис. 3. Модели шестиподвижных роботов параллельной структуры с круговой направляющей и тремя кинематическими цепями.

зуна, установленные на вертикальных направляющих (двух линейных и одной криволинейной).

Другими примерами шестиподвижных роботов с тремя кинематическими цепями являются 3-RRSR и 3-RRRS (рис. 3г, д) [12]. Конструкции данных роботов обеспечивают относительно большую рабочую зону. В частности, для 3-RRRS она больше, чем объем самого робота.

Рассмотренные роботы с тремя кинематическими цепями были усовершенствованы для увеличения параметров рабочих зон и углов наклона выходных звеньев путем введения в каждую из цепей по дополнительному приводному звену. На рис. 3е, ж представлены 3-RRPRS [13] и 3-RPPRS роботы [14], имеющие девять приводов.

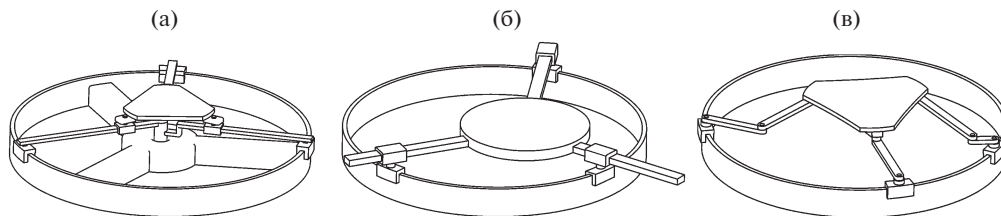


Рис. 4. Модели роботов параллельной структуры с круговой направляющей, обеспечивающие плоское движение выходного звена.

На рис. 3з приведен робот, имеющий структуру 3-RPSR [15]. В нем ведущими являются шесть звеньев: три горизонтальных рычага, совершающие вращение вокруг центра круговой направляющей, и три ползуна, смещающиеся вдоль данных рычагов.

Принципиально новый дизайн 3-RRRS робота с круговой направляющей представлен на рис. 3и [16]. Он выполнен складным, т.е. с возможностью трансформации из плоской конфигурации в пространственные. Дизайн робота способствует увеличению вертикального габарита рабочей зоны.

Модели роботов с тремя и двумя степенями свободы. Далее рассмотрим известные схемы роботов параллельной структуры с круговой направляющей, имеющие число степеней свободы менее шести (*lower-mobility robots*). Насколько известно авторам данной статьи, на текущий момент времени в литературе отсутствуют примеры пяти- и четырехподвижных роботов параллельной структуры с круговой направляющей, поэтому далее будут рассмотрены трех- и двухподвижные системы.

Модели роботов с плоским движением выходного звена. Рассмотрим модели роботов, в которых выходное звено совершает плоское движение. На рис. 4а, б представлены трехподвижные роботы с кинематическими цепями 3-RPR [17] и 3-RRP [18]. В них приводными звеньями являются каретки.

Схожая схема показана на рис. 4в [19]. Такой робот имеет структуру 2-RRRR и 1-RRR и имеет дополнительные приводы: кроме трех кареток, в движение приводится по одному звену из крайних трехзвенных цепей. Кинематические цепи 2-RRRR позволяют увеличить размеры рабочей зоны данного робота.

Модели роботов со сферическим движением выходного звена. Далее обратимся к известным моделям роботов, в которых выходное звено совершает сферическое движение. На рис. 5а представлен сферический 3-RRR робот [20], в котором платформа движется по поверхности сферы с центром в точке пересечения осей вращательных шарниров кинематических цепей. Приводными звеньями являются каретки. Также в работе [20] представлен сферический 3-RRS робот. В нем сферические шарниры обеспечивают упрощенную сборку конструкции. Робот служит основой для создания комбинированных систем. Например, в [21] представлен пятиподвижный манипулятор параллельно-последовательной (гибридной) структуры, в котором трехподвижная параллельная часть дополнена двухподвижной цепью последовательной структуры. Еще один вариант дизайна сферического 3-RRS робота представлен на рис. 5б [22]. В отличие от модели, приведенной в [20], здесь оси промежуточных вращательных шарниров наклонены, т.е. лежат не в горизонтальной плоскости.

На рис. 5в показана реконфигурируемая модель 3-RRR робота [23]. В ней в центре круговой направляющей расположен винт, сопряженный с каретками и сферическими штангами посредством дополнительных рычагов. Суть реконфигурации состоит в том, что при вращении винта платформа имеет возможность вертикального смеще-

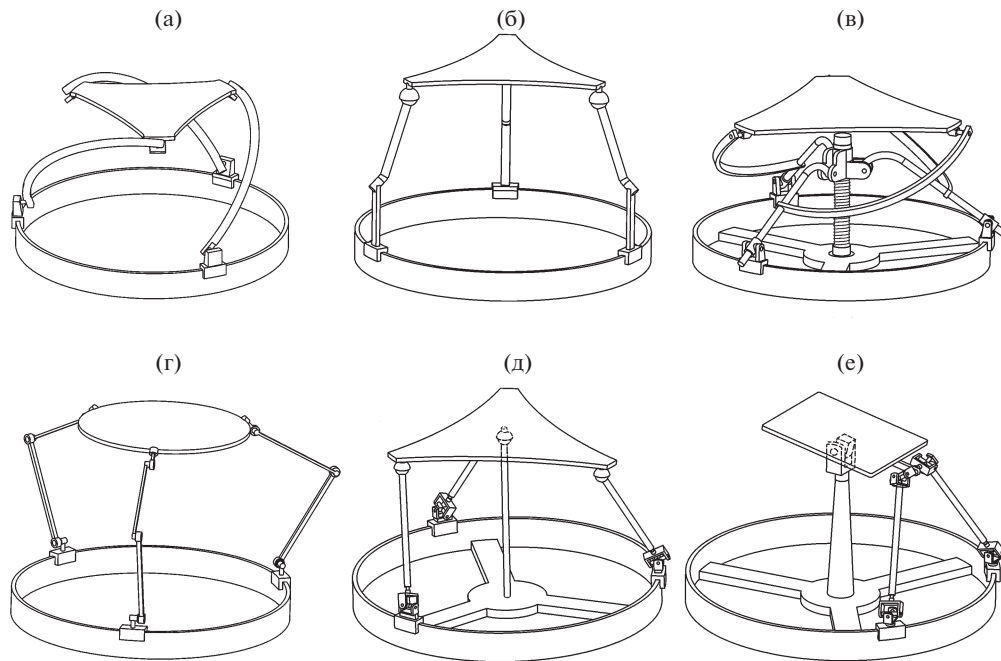


Рис. 5. Модели роботов параллельной структуры с круговой направляющей, обеспечивающие сферическое движение выходного звена.

ния. То есть начальное положение платформы можно установить независимо. Соответственно, в работе такой конструкции есть возможность изменения рабочей зоны.

Другой вариант сферического робота представлен на рис. 5г с цепями $3\text{-}RRRRR$ [24]. В нем между звеньями каждой из трех цепей установлена плоская диада BBB . Это позволяет роботу иметь увеличенную рабочую зону и обеспечивает выход из некоторых особых положений.

Другая модель сферического робота с круговой направляющей представлена на рис. 5д со структурой $3\text{-}RUS$ и $1\text{-}S$ [25]. Здесь центральная цепь накладывает ограничения на движение платформы, оставляя ей только вращения вокруг трех осей. Приводными звеньями являются каретки.

Двухподвижный аналог такого робота представлен на рис. 5е [26], он имеет структуру $2\text{-}RRUU$ и $1\text{-}RR$. Здесь также центральная цепь допускает только вращения платформы вокруг перпендикулярных осей.

В контексте проведенного исследования также можно отметить несколько роботов параллельной структуры с круговой направляющей, в которых нельзя добиться неограниченного поворота выходного звена, однако есть возможность поворота на достаточно большой угол. К таким роботам относятся: шестиподвижные системы по типу [27, 28], где максимальный угол поворота вокруг вертикальной оси может достигать 60° ; двухподвижная система [29], где выходному звену обеспечиваются вращения вокруг перпендикулярных осей; одноподвижные системы по типу [30, 31], где пространственное движение выходного звена с изменением до шести координат обеспечивается за счет единственного привода.

Структурный синтез и анализ роботов с круговой направляющей. Структурный синтез состоит в определении общей компоновки строения робота, т.е. в выборе типов и

количества шарниров и звеньев, а также способов их соединения друг с другом. Анализ, в свою очередь, заключается в определении числа степеней свободы робота и типов реализуемых им движений. Для систем параллельной структуры известны разные методы структурного синтеза и анализа, основанные на применении структурных формул, теории графов, теории групп, методах винтового исчисления и др. [32].

Несмотря на большое разнообразие методов структурного синтеза, большинство схем роботов параллельной структуры с круговой направляющей являются развитием и/или модификациями известных систем параллельного типа. Насколько известно, на текущий момент времени нет каких-либо исследований, в которых был бы продемонстрирован систематический подход к структурному синтезу таких роботов.

Вопросы структурного анализа роботов параллельной структуры с круговой направляющей также представлены в небольшом количестве работ. Так, классические структурные формулы были использованы для определения числа степеней свободы 3-RRRS робота [33], манипулятора Беликова [34, 35] и сферического робота [26]. Исследования [20, 22, 25] демонстрируют применение методов винтового исчисления для структурного анализа других сферических роботов.

Ограниченное количество работ, посвященных структурному анализу и в особенности структурному синтезу роботов параллельной структуры с круговой направляющей, позволяет сделать выводы о том, что данные вопросы изучены не до конца и их развитие является перспективным направлением дальнейших исследований.

Исследование особых положений роботов с круговой направляющей. Особые положения представляют собой такие конфигурации робота, в которых он может терять или приобретать степени свободы или даже изменять тип своего движения [36]. Определение особых положений является важной задачей, и известны различные подходы к ее решению, как геометрические, так и численные [37]. Большинство известных подходов к определению особых конфигураций систем параллельной структуры можно адаптировать и к анализу роботов с круговой направляющей. Далее остановимся именно на таких исследованиях.

И.А. Бонев с соавторами в работе [38] провели анализ особых положений плоского трехподвижного робота геометрическим методом и установили, что у робота такой конструкции отсутствуют особые положения. Другой плоский робот с круговой направляющей был исследован Н. Ракотомангой и И.А. Боневым в работе [39], в которой авторы применили геометрический подход для определения областей особых конфигураций и рассмотрели возможности использования одного типа особых положений для прохождения через другие. Геометрический подход был также использован И.А. Боневым и К. Госсленом [3] при анализе особых положений пространственного шестиподвижного 6-RUS робота. Кроме того, в данной работе авторы получили аналитическое выражение для поверхности особых положений в случае неизменной ориентации выходного звена. Впоследствии такой подход был применен для вариации робота с двумя круговыми направляющими [4], однако часть особых положений определялась численными методами. Аналитические выражения, определяющие границы областей особых положений, также были получены Ш. Баем и М.Р. Хансеном [40] для сферического робота с круговой направляющей на основе решения обратной задачи о положениях. Исследование было продолжено Г. Ву и др. в работах [23, 41], в которых определение особых положений проводилось путем анализа вырожденности матриц Якоби робота численными методами. Особые положения сферического робота с круговой направляющей также были исследованы численными методами в работе [42]: авторы рассчитывали значения определителя матрицы Якоби робота и определяли области особых положений. Х. Азулай с соавторами [14] использовали аналогичный подход для анализа особых положений шестиподвижного 3-RPRS робота. В данной работе авторы устанавливали тип особых положений в зависимости от полученного значения определителя матрицы Якоби. Схожий подход был применен в работах [9, 11, 43]

для нахождения особых конфигураций роботов “Eclipse” и “Eclipse II”: анализ проводился на основе расчета числа обусловленности матриц Якоби по всем точкам рабочей зоны роботов. В работах [44–46] авторы рассмотрели вопросы использования дополнительных (избыточных) приводов для исключения особых положений. Число обусловленности матрицы Якоби использовалось для анализа особых конфигураций и других роботов с круговой направляющей: плоского 3-*RPR* [17] и пространственного 3-*RRRS* [33]. В работе [33] авторы дали геометрическую трактовку некоторых особых положений. Также известно применение геометрического подхода для анализа особых положений тросового робота параллельной структуры с круговой направляющей [47].

Таким образом, можно видеть, что как численные, так и геометрические подходы находят широкое применение при анализе особых положений роботов параллельной структуры с круговой направляющей. Хотя численные методы позволяют определять области особых положений строгим, формальным образом, геометрические подходы часто дают возможность быстро выявить отдельно взятые особые положения и установить поведение робота в данных конфигурациях.

Методы построения рабочих зон роботов с круговой направляющей. Системам параллельной структуры присущи различные типы рабочих зон (РЗ) [36], классифицируемых: по положениям, по углам, максимальная, эффективная и др. Для определения РЗ используются различные методы, которые можно систематизировать в три группы [37]: геометрические, численные дискретные и численные без использования дискретизации.

Такие подходы были успешно применены для анализа типов РЗ различных роботов параллельной структуры с круговой направляющей. Так, используя геометрический подход, И.А. Боневым и др. [38] были построены РЗ по положениям, а также эффективная РЗ для плоского трехподвижного робота с круговой направляющей. Д. Глозман и М. Шохам в работе [12] построили РЗ по положениям для пространственных шестиподвижных 3-*RRRS* и 3-*RRSR* роботов при помощи дискретного метода. В этой работе авторы также провели сравнение полученных результатов с РЗ двух других роботов с круговой направляющей: робота Р. Ализаде [8] и “Eclipse” [48]. В работе [48] был использован аналогичный подход к построению максимальной РЗ и РЗ по углам, а в [8] анализ РЗ был проведен с помощью геометрических методов. К.-Ж. Лю с соавторами [49] построили РЗ по положениям на основе геометрического подхода и соотношений обратной кинематики. Схожий подход был использован в [23] при определении максимальной РЗ трехподвижного сферического робота с круговой направляющей. Для построения РЗ другого сферического робота в работе [22] был применен дискретный подход. Метод дискретизации также использовался Й. Шигой и др. в работе [15] при анализе РЗ по положениям и по углам для 3-*RSPR* робота.

В перечисленных работах при оценке РЗ учитывались в основном только ограничения в шарнирах. Другие исследования также рассматривали дополнительные факторы, влияющие на форму и размеры РЗ. Например, Ф. Жанаби-Шарифи и Б. Щёкин в работах [34, 35] при анализе РЗ по положениям и по углам дискретным методом учитывали возможность пересечения звеньев друг с другом. Пересечение звеньев было также учтено при анализе РЗ роботов с круговой направляющей “Eclipse” [9, 43] и “Eclipse II” [11, 46]. И.А. Боневым и К. Госсленом [3] была построена РЗ по положениям с учетом областей особых положений. Предложенный подход впоследствии был использован для определения РЗ робота с двумя круговыми направляющими [4]. Г.В. Рашоян и др. в работе [50] использовали дискретный метод для построения РЗ по положениям 6-*RSS* робота с круговой направляющей. Авторами была учтена возможность пересечения звеньев, вырожденность матрицы Якоби робота, а также расположение проекции центра масс системы. А. Вольф и Д. Глозман [33] определили РЗ без особых положений для робота, представленного ранее в работе [12]. М. Ансоном и

соавторами в работе [47] была найдена РЗ для плоского тросового робота параллельной структуры с учетом сил натяжения тросов. Аналогичное исследование для шести-подвижного тросового робота представлено в работе [5]. Также известны работы, посвященные построению РЗ по углам без особых положений для сферических роботов с круговой направляющей [40, 41].

Проведенный анализ показывает, что для построения РЗ роботов параллельной структуры с круговой направляющей используются преимущественно геометрические и дискретные методы. Последние позволяют при анализе РЗ также учитывать дополнительные ограничения, влияющие на форму и размеры РЗ, которые было бы сложно учесть, применяя геометрические подходы.

Параметрический синтез роботов с круговой направляющей. Параметрический синтез робота заключается в определении его параметров (прежде всего геометрических), способствующих выполнению требуемых задач наиболее эффективным образом. В качестве критериев оценки эффективности робота могут выступать параметры рабочей зоны (габариты, форма, объем), жесткость, точность, близость к особым положениям и другие (представляемые в числовом виде) характеристики [37], на основе расчета которых можно сформулировать задачу параметрического синтеза, в том числе задачу оптимизации.

Вопросам параметрического синтеза роботов параллельной структуры с круговой направляющей посвящено немного работ. Т. Сео с соавторами [17] исследовали плоский трехподвижный робот и получили график зависимости габаритов РЗ, свободной от особых положений, от соотношения размеров основания и выходного звена. Схожая задача определения рабочей зоны робота с минимальным числом особых положений была решена Х. Хошнуди и др. [42] для сферического робота с круговой направляющей. Для оптимизации геометрических параметров робота авторы использовали генетический алгоритм. Аналогичный алгоритм был также использован в двухкритериальной оптимизации параметров другого сферического робота [51]. К.-Ж. Лю и др. в работе [49] рассмотрели 6-*RUS* робот и построили графики зависимостей объема РЗ и различных глобальных чисел обусловленности, характеризующих точность и нагрузочные способности робота, от его геометрических параметров. На основе полученных графиков авторы выбрали соотношения между длинами звеньев робота, наилучшим образом удовлетворяющие нескольким критериям. Ф. Жанаби-Шарифи и Б. Щёкин [34] провели параметрический синтез шестиподвижного робота и определили геометрические параметры, соответствующие наибольшему объему РЗ по положениям. Позднее в [35] авторы продолжили свое исследование и провели оптимизацию параметров для получения максимальных углов наклона выходного звена робота. Зависимость углов от размеров звеньев была также изучена Х. Азулаем и др. в [14] на примере 3-*RPRS* робота. В данной работе дополнительно был проведен анализ статической и динамической жесткости робота с использованием соответствующих матриц жесткости. Авторы провели расчеты для различных геометрических параметров робота и представили сравнительный анализ полученных результатов с архитектурами роботов “Eclipse” [9], Р. Ализаде [8] и Д. Глозмана [12]. Анализ жесткости робота “Eclipse”, в том числе его вариаций с избыточными приводами, и его параметрический синтез по соответствующему критерию также можно найти отдельно в работах [9, 10, 43].

Помимо приведенных работ, известны исследования, в которых задача параметрического синтеза в явном виде не решалась, но было получено распределение параметров, характеризующих точность, жесткость и другие свойства роботов, по их рабочим зонам. Например, И.А. Бонев и др. [38] получили распределение коэффициента маневренности по РЗ плоского трехподвижного робота с круговой направляющей. Аналогичное исследование проведено в работах [23, 40, 41] для сферических систем. В работе М. Люсеса и др. [52] подробно рассмотрены анализ динамической жесткости и

определение оптимальных конфигураций 3-PPRS робота, а в работе М. Ансона и др. [47] исследованы схожие вопросы для тросового робота с круговой направляющей.

Как видно из проведенного обзора, среди всего многообразия различных схем роботов параллельной структуры с круговой направляющей, на текущий момент вопросы параметрического синтеза рассмотрены лишь для ограниченного количества структур. Таким образом, проведение подобных исследований для остальных схем можно считать весьма перспективным.

Выводы. В настоящей статье был проведен обзор известных схем роботов параллельной структуры с круговой направляющей, а также методов их структурного анализа и синтеза, приемов построения рабочих зон и алгоритмов параметрического синтеза. Перечисленные вопросы были рассмотрены для роботов с различным числом степеней свободы и кинематических цепей.

Рассмотренные в настоящей статье проблемы анализа и синтеза являются одними из важнейших при проектировании робототехнических систем. Тем не менее, нельзя не отметить и другие проблемы. Прежде всего, это кинематический анализ роботов, включающий решение задач о положениях и скоростях. Такие задачи составляют основу для последующего исследования рабочих зон, определения особых положений и параметрического синтеза, и их решение приведено в большинстве работ. В направлении кинематического анализа отметим следующие работы. В исследовании [53] отдельно приведено решение прямой задачи о положениях для шестиподвижного 3-RPRS робота, а в [24] – решение обратной задачи для сферического 3-RRRRR робота. Исследования [54, 55] посвящены анализу скоростей 6-RSS и 3-RRS роботов.

Известны также исследования в области динамического анализа роботов с круговой направляющей, в ходе которого определяются возникающие в шарнирах усилия и моменты в приводах, необходимые для реализации заданного движения выходного звена. Полученные данные имеют важное значение при проектировании элементов конструкций роботов, а также при энергетическом расчете и последующем подборе двигателей. Примеры анализа динамики различных роботов параллельной структуры с круговой направляющей можно найти в работах [26, 51, 56]. В [56] также рассмотрен вопрос динамического управления роботом.

В заключение настоящего обзора отметим перспективные направления исследований роботов параллельной структуры с круговой направляющей. Прежде всего, это формирование систематического подхода к структурному синтезу таких систем. Также весьма важным является изучение вопросов параметрического синтеза, которые на данный момент рассмотрены для ограниченного количества роботов. Наконец, исследование динамики роботов с круговой направляющей и развитие методов их динамического управления является одной из центральных проблем, обеспечивающих разработку реальных систем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-18-50398.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов В.Т., Власов Н.А., Заблонский К.И., Корытин А.М., Щёкин Б.М. Манипулятор. Патент SU 1049244, 1983.
2. Yau C.L. Systems and methods employing a rotary track for machining and manufacturing. Patent US 6,196,081, 1999.

3. *Bonev I.A., Gosselin C.M.* Geometric algorithms for the computation of the constant-orientation workspace and singularity surfaces of a special 6-RUS parallel manipulator // Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. V. 5: 27th Biennial Mechanisms and Robotics Conference. 2002. P. 505.
4. *Coulombe J., Bonev I.A.* A new rotary hexapod for micropositioning // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013. P. 877.
5. *Chen T., Qian S., Li Y., Yi Z.* Mechanism design and analysis for an automatical reconfiguration cable-driven parallel robot // Proceedings of the 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control. 2017. P. 45.
6. *Бюшгенс А.Г., Глазунов В.А., Григорьев Е.Н., Зайчик Л.Е., Попов Д.А., Скворцов С.А.* Пространственный механизм с шестью степенями свободы. Патент РФ 133044, 2013.
7. *Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Ращоян Г.В., Скворцов С.А., Шевченко Е.Ф.* Пространственный механизм с шестью степенями свободы. Патент РФ 160612, 2015.
8. *Alizade R.I., Tagiyev N.R., Duffy J.* A forward and reverse displacement analysis of a 6-DOF in-parallel manipulator // Mechanism and Machine Theory. 1994. V. 29 (1). P. 115.
9. *Ryu S.-J., Kim J.W., Hwang J.C., Park C., Cho H.S., Lee K., Lee Y., Cornel U., Park F.C., Kim J.* Eclipse: an overactuated parallel mechanism for rapid machining. In: Boër C.R., Molinari-Tosatti L., Smith K.S. (eds) Parallel Kinematic Machines. 1999. P. 441.
10. *Shin H., Kim S., Jeong J., Kim J.* Stiffness enhancement of a redundantly actuated parallel machine tool by dual support rims // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. V. 13 (9). P. 1539.
11. *Kim J., Hwang J.C., Kim J.S., Iurascu C.C., Park F.C., Cho Y.M.* Eclipse II: a new parallel mechanism enabling continuous 360-degree spinning plus three-axis translational motions // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2002. V. 18 (3). P. 367.
12. *Glozman D., Shoham M.* Novel 6-DOF parallel manipulator with large workspace // Robotica. 2009. V. 27 (6). P. 891.
13. [Электронный ресурс]: <https://cimlab.mie.utoronto.ca/parallel-kinematics-mechanism/deisng-of-new-mmt/>
14. *Azulay H., Mahmoodi M., Zhao R., Mills J.K., Benhabib B.* Comparative analysis of a new 3×PPRS parallel kinematic mechanism // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2014. V. 30 (4). P. 369.
15. *Shiga Y., Tanaka Y., Goto H., Takeda H.* Design of a six degree-of-freedom tripod parallel mechanism for flight simulators // International Journal of Automation Technology. 2011. V. 5 (5). P. 715.
16. *Фомин А.С., Киселев С.В.* Складной механизм с шестью степенями свободы. Патент РФ 2720270, 2020.
17. *Seo T., In W., Kim J.* A new planar 3-DOF parallel mechanism with continuous 360-degree rotational capability // Journal of Mechanical Science and Technology. 2009. V. 23. P. 3088.
18. *Scheidegger A., Liechti R.* Positioning device. US Patent 6,622,586, 2003.
19. *Jeong H., Yu J., Lee D.* Calibration of in-plane center alignment errors in the installation of a circular slide with machine-vision sensor and a reflective marker // Sensors. 2020. V. 20. P. 5916.
20. *Li Q., Chen Q., Wu C., Hu X.* Two novel spherical 3-DOF parallel manipulators with circular prismatic pairs // Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2006. P. 325.
21. *Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S.* Parallel and sequential structures of manipulators in robotic surgery // Doklady Physics. 2019. V. 46 (3). P. 106.
22. *Fang H.R., Chen Z.H., Fang Y.F.* A novel spherical parallel manipulator with circular guide // Applied Mechanics and Materials. 2013. V. 325–326. P. 1014.
23. *Wu G., Dong H., Wang D., Bai S.* A 3-RRR spherical parallel manipulator reconfigured with four-bar linkages // Proceedings of the International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots. 2018.
24. *Laryushkin P.A., Zakharov M.N., Erastova K.G., Glazunov V.A.* Spherical manipulator with parallel structure // Russian Engineering Research. 2017. V. 37 (7). P. 585.
25. *Zhao J., Feng Z., Chu F., Ma N.* Chapter 14 – Kinematic synthesis of spatial mechanisms // Advanced Theory of Constraint and Motion Analysis for Robot Mechanisms. 2014. P. 429.

26. Xu C.C., Xue C., Duan X.C. A novel 2R parallel mechanism for alt-azimuth pedestal // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 428. P. 012053.
27. Hudgens J.C., Tesar D. Analysis of a fully-parallel six degree-of-freedom micromanipulator // Proceedings of IEEE Fifth International Conference on Advanced Robotics "Robots in Unstructured Environments". 1991. P. 814.
28. Fomin A., Antonov A., Glazunov V., Rodionov Y. Inverse and forward kinematic analysis of a 6-DOF parallel manipulator utilizing a circular guide // Robotics. 2021. V. 10 (1). P. 31.
29. Song Y., Qi Y., Dong G., Sun T. Type synthesis of 2-DoF rotational parallel mechanisms actuating the inter-satellite link antenna // Chinese Journal of Aeronautics. 2016. V. 29 (6). P. 1795.
30. Fomin A., Glazunov V., Terekhova A. Development of a novel rotary hexapod with single drive. In: Arakelian V., Wenger P. (eds) ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. 2019. P. 141.
31. Fomin A., Glazunov V. A novel rotary positioner with single drive: structural analysis and kinematic design. In: Lenarčič J., Parenti-Castelli V. (eds) Advances in Robot Kinematics. 2019. P. 364.
32. Ye W., Li Q. Type synthesis of lower mobility parallel mechanisms: a review // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2019. V. 32. P. 38.
33. Wolf A., Glazman D. Singularity analysis of large workspace 3RRRS parallel mechanism using line geometry and linear complex approximation // Journal of Mechanisms and Robotics. 2011. V. 3 (1). P. 011004.
34. Janabi-Sharifi F., Shchokin B. A rotary parallel manipulator: modeling and workspace analysis // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. V. 4. P. 3671.
35. Shchokin B., Janabi-Sharifi F. Design and kinematic analysis of a rotary positioner // Robotica. 2007. V. 25 (1). P. 75.
36. Merlet J.-P. Parallel Robots. Dordrecht: Springer, 2nd ed., 2006.
37. Rosyid A., El-Khasawneh B., Alazzam A. Review article: performance measures of parallel kinematic manipulators // Mechanical Sciences. 2020. V. 11. P. 49.
38. Bonev I.A., Yu A., Zsombor-Murray P. XY-Theta positioning table with parallel kinematics and unlimited theta rotation // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2006. V. 4. P. 3113.
39. Rakotomanga N., Bonev I.A. A 3-RPR parallel mechanism with singularities that are self-motions // Journal of Mechanisms and Robotics. 2010. V. 2 (3). P. 034502.
40. Bai S., Hansen M.R. Evaluation of workspace of a spherical robotic wrist // Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2007.
41. Wu G., Bai S. Design and kinematic analysis of a 3-RRR spherical parallel manipulator reconfigured with four-bar linkages // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2019. V. 56. P. 55.
42. Khoshnoodi H., Hanzaki A.R., Talebi H.A. Kinematics, singularity study and optimization of an innovative spherical parallel manipulator with large workspace // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. V. 92. P. 309.
43. Kim J., Park F.C., Ryu S.J., Kim J., Hwang J.C., Park C., Iurascu C.C. Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2001. V. 17 (4). P. 423.
44. Kim J., Cho Y.M., Park F.C., Lee J.M. Design of a parallel mechanism platform for simulating six degrees-of-freedom general motion including continuous 360-degree spin // CIRP Annals. 2003. V. 52 (1). P. 347.
45. Kim S.H., Shin H.P., In W.S., Kim J. Design of a 6 D.O.F. flight simulator based on a full spinning parallel mechanism platform // AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. 2005.
46. Kim S.H., Jeon D., Shin H.P., In W., Kim J. Design and analysis of decoupled parallel mechanism with redundant actuator // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2009. V. 10 (4). P. 93.
47. Anson M., Alamdari A., Krovi V. Orientation workspace and stiffness optimization of cable-driven parallel manipulators with base mobility // Journal of Mechanisms and Robotics. 2017. V. 9 (3). P. 031011.
48. Ceccarelli M., Ottaviano E. A workspace evaluation of an eclipse robot // Robotica. 2002. V. 20 (3). P. 299.

49. *Liu X.-J., Wang J., Gao F., Wang L.-P.* Mechanism design of a simplified 6-DOF 6-RUS parallel manipulator // *Robotica*. 2002. V. 20 (1). P. 81.
50. *Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A.* Kinematic analysis of a spatial parallel structure mechanism with a circular guide // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. V. 44 (7). P. 626.
51. *Wu G., Caro S., Bai S., Kepler J.* Dynamic modeling and design optimization of a 3-DOF spherical parallel manipulator // *Robotics and Autonomous Systems*. 2014. V. 62 (10). P. 1377.
52. *Luces M., Boyraz P., Mahmoodi M., Keramati F., Mills J.K., Benhabib B.* An emulator-based prediction of dynamic stiffness for redundant parallel kinematic mechanisms // *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2016. V. 8 (2). P. 021021.
53. *Nag A., Mohan S., Bandyopadhyay S.* Forward kinematic analysis of the 3-RPRS parallel manipulator // *Mechanism and Machine Theory*. 2017. V. 116. P. 262.
54. *Aleshin A.K., Glazunov V.A., Shai O., G.V. Rashoyan, S.A. Skvortsov, Lastochkin A.B.* Infinitesimal displacement analysis of a parallel manipulator with circular guide via the differentiation of constraint equations // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. V. 45 (5). P. 398.
55. *Glazunov V.A., Filippov G.S., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Shalyukhin K.A., Skvortsov S.A., Antonov A.V., Terekhova A.N.* Velocity analysis of a spherical parallel robot // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1260. P. 112012.
56. *Mohan S., Corves B.* Inverse dynamics and trajectory tracking control of a new six degrees of freedom spatial 3-RPRS parallel manipulator // *Mechanical Sciences*. 2017. V. 8. P. 235.