Казахский национальный исследовательский университет имени К. И. Сатпаева

УДК 621.8.026 На правах рукописи

**Наурушев Батыр Кабирович**

**Разработка параллельных манипуляторов с двумя рабочими органами**

6D071200 – Машиностроение

Диссертация на соискание степени PhD доктора

Научные руководители:

д.т.н., профессор, академик НАН РК

Байгунчеков Ж.Ж.,

PhD, ассоц. профессор Нугман Е.З.,

Зарубежный научный руководитель:

Марко Чеккарелли (Италия), PhD, профессор

Республика Казахстан

Алматы, 2025 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ………………………………………………… | 4 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЯ……………………………………………………………… | 5 |
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ………………………………………... | 6 |
| ВВЕДЕНИЕ…………………………………………………………………… | 7 |
| 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ………………………………. | 9 |
| 1.1 Обзор современного уровня проектирования параллельных манипуляторов……………………………………………………………….. | 9 |
| 2 СТРУКТУРНО-КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПЛОСКИХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ………………………………………… | 14 |
| 2.1 Структурный синтез исполнительных механизмов манипуляционных роботов плоской параллельной структуры с двумя рабочими органами… | 14 |
| 2.2 Кинематический синтез исполнительных механизмов параллельной структуры с двумя рабочими органами…………………………………….. | 16 |
| 2.3 Кинематический синтез антропоморфного манипулятора……………. | 20 |
| 2.4 Кинематический синтез вращательной кинематической пары……….. | 24 |
| 2.5 Кинематический синтез двухподвижного параллельного манипулятора III класса и одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами………………………………………. | 26 |
| 3 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ... | 35 |
| 3.1 Кинематический анализ двухподвижного параллельного манипулятора III класса с двумя рабочими органами……………………… | 35 |
| 3.2 Кинематический анализ одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами………………………. | 46 |
| 4 КИНЕТОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ ПРИВОДОВ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ…………………….. | 68 |
| 4.1 Уравнения равновесия звеньев плоских исполнительных механизмов манипулятивных роботов параллельной структуры с двумя рабочими органами………………………………………………………………………. | 68 |
| 4.2. Уравнения равновесия треугольного опорного звена с вращательными кинематическими парами………………………………… | 69 |
| 4.3 Уравнения равновесия треугольного опорного звена с вращательными кинематическими парами……………………………………………………. | 70 |
| 4.4. Кинетостатический анализ одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами……………………… | 71 |
| 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ 3D МОДЕЛИ……………… | 89 |
| 5.1 Проектирование параллельного манипулятора для автоматизации штамповки металла на кулачково-винтавом пресс………………………… | 89 |
| 5.2 Численные примеры кинематического синтеза двухподвижного параллельного манипулятора III класса и одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами……………………….. | 94 |
| 5.3 Проектирование параллельного манипулятора для автоматизации тигельного пресса ……………………………………………………………. | 96 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ………………………………………………………………. | 101 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ…………………………. | 102 |
| Приложение А………………………………………………………………... | 107 |

**НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 6.38-90 - Система организационно-распорядительной документации.

Требования к оформлению документов.

ГОСТ 7.32-2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу.

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая Запись. Библиографическое Описание.

Общие требования и правила составленияГОСТ 8.417-81 - Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

СТ РК ГОСТ Р 15.011-2005– Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения.

**ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

В настоящей диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Манипулятор – это механическое устройство, предназначенный для выполнения точных движений или операций в рабочей зоне. Манипуляторы бывают различных типов: серийные, параллельные и гибридные, и используются в робототехнике, промышленности, медицине и других областях. Основное назначение манипуляторов – перемещение, ориентация или взаимодействие с объектами.

Манипуляционный робот параллельной структуры – это робот, основанный на параллельной кинематической структуре, где подвижная платформа соединена с основанием через несколько независимых параллельных кинематических цепей.

Параллельный манипулятор – механизм с замкнутой кинематической структурой, обеспечивающий движение подвижной платформы за счёт совместной работы нескольких приводных звеньев.

Структурно-параметрический синтез – процесс разработки механизма, включающий выбор оптимальной структуры (топологии) и параметров (геометрических размеров) для достижения заданных функциональных требований.

Вращательная кинематическая пара – кинематическая пара, допускающая относительное вращательное движение звеньев вокруг одной оси.

Замкнутая кинематическая цепь – система механических звеньев, в которой каждое звено соединено с двумя или более другими звеньями, образуя замкнутую траекторию кинематических связей.

3D-принтер – это устройство для послойного создания физических объектов по цифровой модели. Принцип работы основан на аддитивных технологиях, где материал (например, пластик, металл, керамика или биоматериалы) наносится слоями, формируя конечное изделие. 3D-принтеры находят применение в производстве, медицине, строительстве, науке и других областях, благодаря способности создавать сложные и индивидуализированные конструкции.

**ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

В настоящей диссертации применяются следующие сокращения и определения:

МРПС – манипуляционный робот параллельной структуры;

ПР – промышленный робот;

ПМ – параллельный манипулятор;

СПС – структурно-кинематический синтез;

В – вращательная кинематическая пара;

ЗКЦ – замкнутая кинематическая цепь.

**ВВЕДЕНИЕ**

*Общее описание работы и актуальность темы.*

Параллельные манипуляторы представляют собой значительный прогресс в машиностроении. Разработка и исследование параллельных манипуляторов вызвали значительный интерес благодаря их исключительной точности, высокой скорости и универсальности в различных промышленных применениях.

Данная работа посвящена комплексному исследованию и разработке параллельных манипуляторов с двумя рабочими органами, включая их структурную схему, кинематику и практическое применение. Сила этих механизмов заключается в их способности выполнять сложные задачи с высокой точностью и эффективностью, что делает их неотъемлемой частью современной техники.

*Цель работы:*

Целью данного исследования является разработка и исследования параллельных манипуляторов с двумя рабочими органами для одновременной или последовательной обработки материалов с высокой точностью. Работа направлена на создание решений для эффективного выполнения сложных операций перемещения заготовок между прессами при обработке материалов, таких как штамповка металла или тиснение бумаги в полиграфии, для совершенствования производственного процесса, автоматизации операций и улучшения условий труда оператора. Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1) структурно-кинематический синтез;

2) кинематический анализ;

3) кинетостатический анализ;

4) моделирование и изготовление 3D модели в программе CAD/CAE.

*Объект исследования.*

Объект исследования – параллельный манипулятор с двумя рабочими органами.

*Научная новизна:*

В настоящее время в робототехнике наблюдается тенденция использования манипуляционных роботов параллельной структуры (МРПС), исполнительные механизмы которых имеют замкнутые кинематические цепи. МРПС обладают повышенной жесткостью, высокой грузоподъемностью и высокой точностью позиционирования. Для упрощения систем управления МРПС в диссертации предлагается наряду с приведенными законами движения рабочего органа указывать и законы движения приводов. Задание законов движения приводов МРПС, а не определение их путем решения обратной задачи кинематики, существенно упрощает систему управления. При этом элементы управления МРПС, т.е. функциональная связь законов движения рабочего органа и приводов, закладываются при определении конструкции МРПС и геометрических параметров звеньев, т.е. механической части МРПС. МРПС. Такое оптимальное сочетание механики и управления МРПС соответствует современной концепции машиностроения как методологии разработки простой, надежной и дешевой технологической автоматизации.

*Практическая ценность и реализация результатов работы.*

Практическая значимость работы заключается в создании параллельных манипуляторов с большей грузоподъемностью, большей точностью и простой системой управления, за счет простой схемы исполнительного механизма, что позволяет создать надежные и дешевые технологии автоматизации. Поэтому данные исследования применимы к различным отраслям машиностроения.

*Обоснованность научных правил, выводов и точность результатов:*

Результаты диссертационной работы проверены путем сравнения, численных измерений и 3D-моделирования, которые представлены в виде рисунков из программ Fusion 360, Ansys, SolidWorks, таблиц и графиков.

Текст программы, написанной на языке программирования VBA в Excel, находится в приложении.

*Надежность работы и публикации.*

Результаты исследований публиковались в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, в материалах международных конференций, а также в статьях отечественных журналов и патентных журналов.

*Структура и объем работы.*

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии и приложений. Общий объем работы составляет \_\_\_\_ страниц, \_\_\_\_\_ рисунок и \_\_ таблиц, включает \_\_\_\_\_ литературных источников.

**1 Современное состояние исследования Параллельных Манипуляторов для выполнения погрузочно-разгрузочных работ при штамповочном производстве в машиностроении**

**1.1 Обзор современного уровня проектирования параллельных манипуляторов**

Параллельные манипуляторы обладают большой грузоподъемностью, высокой точностью позиционирования, скоростью, жесткостью. Тем не менее, после десятилетия разработки, их промышленное внедрение по-прежнему ограничено по сравнению с серийными промышленными роботами. Необходимо понимание функциональных и технологических характеристик параллельных манипуляторов, а также как они применяются при решении задач механической обработки в машиностроении.

Цифровая трансформация производства требует более высокой производительности, гибкости и надежность. Хотя цифровая революция представили компьютерное зрение, искусственный интеллект и вообще новое программное обеспечение, датчики, и системы управления для значительного улучшения производственных операций, верхняя граница производительности устанавливается оборудованием. Таким образом, производители постоянно ищут лучшие технологии, используя станки и дополнительные механизмы для обеспечения инновации [1,2]. Станки – это машины, которые формируют детали из металла или других твердых материалов с помощью таких операций, как фрезерование, сверление, растачивание, резка и шлифование. Станок вообще включает в себя приспособления, удерживающие заготовку, инструмент, используемый для производственной операции и механизм, который направляет инструмент по заранее заданной траекторией пути; дополнительные механизмы могут выполнять сборку готового изделия.

Обычные промышленные роботы характеризуются последовательной кинематической схемой, но параллельные механизмы могут обеспечить существенное увеличение кинематических и динамических характеристик, особенно с точки зрения жесткости, скорости и повторяемости [3–5]. В то время как в последовательной архитектуре рабочий орган прикреплен к неподвижному основанию машины посредством последовательности жестких частей, соединенных приводными шарнирами (т. е. линейными или вращательными двигателями), параллельная машина Инструмент снабжен множеством последовательных цепей (обычно называемых ветвями параллельного механизма), состоящих как из приводимых в действие, так и из пассивных шарниров, соединяющих инструменты с основанием [6]. Такое расположение дает параллельным станкам два ключевых преимущества.

Кинематическая архитектура с замкнутым контуром позволяет распределять полезную нагрузку, которая приложена на рабочем органе между цепями, что приводит к более высокой производительности. Кроме того, поскольку ошибки срабатывания и смещения конечностей распространяются в последовательных архитектурах, то замкнутая кинематика параллельного механизма приводит к уменьшению и частичной компенсацией этих ошибок.

Конечности обычно содержат по одному двигателю, остальные звенья пассивны. Поскольку моторы являются одними из самых тяжелых компонентов механизма, их можно удобно разместить у основания каждой конечности. или как можно ближе к основанию, что приводит к меньшей движущейся массе и, следовательно, к лучшим инерционным и динамическим показателям.

Поэтому параллельные механизмы представляют особый интерес для обрабатывающей промышленности, поскольку они могут улучшить ключевые аспекты производительности станков. Тем не менее, интенсивные исследования параллельных механизмов за последние три десятилетия не нашли отражения в промышленном внедрении: лишь ограниченное количество параллельных станков добилось успеха в обрабатывающей промышленности, где последовательные механизмы по-прежнему значительно более популярны.

С1990 по 2022 год популярность параллельных устройств начала расти с 1990-е годы и достигли пика в конце 2000-х годов. За последнее десятилетие ситуация выровнялась, оставаясь примерно на одном уровне на протяжении многих лет. Сравнение наиболее цитируемых статей из SCOPUS и Web of Science представлены новые кинематические архитектуры, в том числе NIST Robocrane [7], Orthoglide [8] и Exechon [9]. Другими популярными темами среди наиболее цитируемых работ являются калибровка, динамического моделирования и оптимизация конструкции.

По результатам поиска литературы была составлена библиография. Этот отбор проводился в соответствии с руководящими принципами и передовой практикой описательных обзоров, как описано в источниках. [10,11]. Обратное и прямое отслеживание цитирования (т. е. поиск статей, которые цитировались или были цитированы в результатах поиска) использовалось для уточнения результатов поиска, а также добавлены дополнительные исследования в смежных областях на основе личных знаний.

Взгляд на сферу робототехники в ее нынешнем виде показывает, что конструкция приводов роботов или манипуляторов представляет собой в первую очередь антропоморфную (в форме руки) конструкцию [12–18]. Большие изгибные деформации и непредсказуемые режимы приводных движений испытывают антропоморфные манипуляторы с незамкнутыми кинематическими схемами, что существенно снижает их эффективность. Манипуляционные роботы с параллельными структурами (МРПС), механизмы которых имеют замкнутые кинематические цепи, сегодня получают все большее распространение в робототехнике [19–25]. Высокая точность позиционирования, повышенная жесткость, высокая скорость и грузоподъемность — все это характеристики МРПС.

Современные подходы к проектированию МРПС, по существу, заключаются в решении обратной задачи кинематики, выяснении законов движения приводов, создании сложных и дорогостоящих систем и приводов управления. Для упрощения систем управления МРПС мы предложили задавать законы движения приводов дополнительно к заданным законам движения рабочего органа. Динамика и система управления значительно усовершенствованы и упрощены за счет задания законов движения приводов МРПС, а не за счет их установления путем решения обратной задачи кинематики. Выходной объект параллельного манипулятора перемещается в соответствии с установленными законами движения, придавая ему характеристики робота-манипулятора и характеристики механизма.

МРПС оперируют конкретными конструктивными схемами исполнительных механизмов (манипуляторов) и геометрическими характеристиками их звеньев, одновременно задавая законы движения рабочих органов и приводов. Идеальные конструктивные схемы и геометрические параметры их связей получены с использованием предложенного нами структурно-кинематического синтеза методов МРПС [26-39] на основе приведенных законов движения рабочих органов и приводов. При проектировании структуры МРПС и геометрических параметров звеньев, т.е. механической части МРПС, закладывается функциональная связь между законами движения рабочего органа и приводами. Оптимальная комбинация механики и управления МРПС относится к современной концепции мехатроники как методологии разработки простой, надежной и недорогой автоматизации процессов. Благодаря своему успешному применению параллельные механизмы привлекли внимание обрабатывающей промышленности согласно своим высоким динамическим характеристикам [40] и высокому соотношению жесткости к весу [41].

Параллельные манипуляторы с меньшей подвижностью имеют простую механическую конструкцию и требуют меньшего количества приводов, что обеспечивает более простое управление и низкую стоимость проектирования и производства. Многие исследователи пытались улучшить маломобильные параллельные манипуляторы, находя и оптимизируя новые архитектуры. Наиболее распространенные параллельные манипуляторы имеют либо три чистые поступательные степени свободы (3T), которые исследовали Шаблат [42], Лю [43], Каррикато [44], Цай [45], Цзинь [46], Конг [47] и и т. д., или три чисто вращательных степеней свободы (3R), которые изучали Конг [48], Ди Грегорио [49], Хесс-Коэльо [50], Лю [51] и т. д. Некоторые другие параллельные механизмы с меньшей подвижностью, такие как как параллельные механизмы 3T-1R и 3T-2R, также обсуждались и создавались [52–55]. Чтобы разработать параллельные манипуляторы, отвечающие кинематическим требованиям, несколько исследователей сосредоточились на анализе степени свободы и синтезе типов параллельных механизмов.

Прогресс станков и параллельных роботов в начале 2000-х годов вдохновили многие исследовательские институты на разработку новых проектов. Некоторыми примерами являются: станки 6Х разработки Микромата в Германии — на рисунке 1 a [56,57]; параллельная машина Hexaglide, разработан Швейцарским федеральным технологическим институтом (ETH) в Цюрихе, полученный путем кинематической инверсии платформы GS и показанный на рис. 1 б [58, 59]; параллельный станок VAMT1Y, разработанный Университет Цинхуа и Университет Тяньцзинь, показанные на рис. 1 в [2];

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| а | б | в |

а) Micromat, б) Hexaglide, в) VAMT1Y

Рисунок 1 – Станки с параллельной конструкцией, разработанные в университетах

Имеются роботы параллельной структуры, построенные на базе шестигранника Fanuc F200iB Манчестерского университета [60] и разработанный на его основе коммерческий параллельный робот. Дальнейшие варианты платформы GS были разработаны в Ноттингемском университете путем разблокировки нижних ограничения конечностей, что приводит к созданию реконфигурируемых, портативных и мобильных обрабатывающие роботы для атомной и аэрокосмической промышленности [61–63].

Успех параллельных манипуляторов заключается в высоких показателях жесткости конструкции и ее способности выдерживать высокую полезную нагрузку. Однако параллельная схема механизма имеет ограничения, что соответственно понижает область применения: их рабочее пространство обычно невелико по сравнению с их размером, при этом значительные ограничения, особенно в отношении ориентации в рабочем пространстве связаны со сферическими соединениями, которые сложно спроектировать и изготовить с хорошей точностью, что понижает полезную нагрузку, и препятствует высокоточному управлению. Наконец, 6 степеней свободы полностью параллельного манипулятора являются избыточными для задач механической обработки (поскольку они требуют максимум 5 степеней свободы), поэтому сложность моделирования, калибровки, и контроль выполняются без очевидной выгоды.

В промышленности существуют технологические процессы, требующие одновременного или последовательного выполнения нескольких операций, например штамповка металла с погрузочно-разгрузочными операциями обрабатываемой заготовки. Манипуляционные роботы, имеющие несколько рабочих органов, рекомендуются для одновременного или последовательного выполнения многих операций.

В данной работе изложены методы структурно-параметрического синтеза, кинематического и кинетостатического анализа параллельных манипуляторов с двумя рабочими органами, и их применение в штамповочном производстве.

**2 СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

**2.1 Структурный синтез параллельных манипуляторов с двумя рабочими органами**

Для реализации заданных законов движения рабочих органов (РО) *Р*1 и *Р*2 проектируется исполнительный механизм манипуляционного робота плоской параллельной структуры (ИМ МРПС) на базе двух промышленных роботов антропоморфной конструкции ABP1 и CDP2.

(2.1)

и

(2.2)

или *N* дискретные положения:

(2.3)

и

. (2.4)

Манипуляторы антропоморфной схемы *АВР*1 и *CDР*2 имеют степень подвижности равную двум каждая, подсчитана она была с помощью формулы Чебышева:

, (2.5)

где , .

Приводим конструкцию манипуляторов к замкнутой схеме с помощью добавления вращательных кинематических пар и рычажных звеньев, например если соединить звенья 2 и 4 между собой с помощью звена *EF* вида **ВВ**, где буквой **В** обозначается вращательная кинематическая пара, которая наносит ограничение на одну степень подвижности, что приводит общую степень механизма равную трем, т.к. получили шестизвенный механизм *ABEFDC* как показано на рисунке 2.

*O*

*Y*

*X*

*ϕ*1

1

*ϕ*3

2

5

4

3

6

*P*1

*P*2

*A*

*B*

*C*

*D*

*E*

*F*

*G*

*H*

Рисунок 2 - ПМ III класса с двумя схватами и двумя приводами

Аналогично повторяя действие по добавлению звена *GH* вида ВВ к имеющемуся шестизвенному механизму, то получим уже механизм с двумя степенями подвижности III-го класса согласно классификации по Ассуру, из-за соединения звена *EF* со стойкойв соответствии с рисунком 2, а структурная формула будет иметь вид:

. (1.6)

Продолжая процесс структурного построения механизма с помощью добавления звена *IK* вида ВВ к 6 и 3 звену, тем самым соединив их в один механизм V класса с одной степенью подвижности согласно рисунку 3, описанный структурной формулой:

, (1.7)

*Y*

*O*

*X*

*ϕ*1

1

2

5

4

3

6

*P*1

*P*2

7

*A*

*B*

*C*

*D*

*E*

*F*

*G*

*H*

*I*

*K*

Рисунок 3 – Параллельный манипулятор V класса с двумя РО и одной степенью подвижности

полученный механизм выполняет требуемые законы движения рабочих органов *Р*1 и *Р*2 от действия одного входного звена, работа которого задается законом движения.

**2.2 Кинематический синтез исполнительных механизмов параллельной структуры с двумя рабочими органами**

Кинематический синтез составных частей плоского механизма параллельной структуры с двумя рабочими органами осуществляется при решении задачи о совместном движении двух плоскостей с помощью звена вида ВВ. Постановка задачи выглядит следующим образом, пусть заданы дискретные положения и (*i*=1,2,…,*N*) двух подвижных плоскостей *Axy* и  относительно неподвижной системы координат *OXY* для определения параметров синтеза подвижного звена *ВС* с двумя вращательными кинематическими парами согласно рисунку 4.

*O*

*Y*

*X*

*Ai*

*y*

*x*

*ϕi*

*Di*

*y*

*x*

*ψi*

*B*

*C*

Рисунок 4 – Подвижное звено *ВС* с двумя вращательными парами

Результатом синтеза подвижного звена *ВС* с вращательными парами, , являются координаты и шарниров *В* и *С* соответственно в системах координат в подвижных плоскостях *Axy* и *Dxy* и длина бинарного звена *ВС*.

При движении плоскости *Dxy* относительно плоскости *Axy* шарнир *С* с координатами движется по дуге окружности с радиусом между ними и центром в шарнире *В* с координатами .

Выведем формулу для взвешенной разности в виде:

(2.8)

где

(2.9)

(2.10)

Координаты шарнира *С* в системах координат *Axy* и *OXY* будут иметь следующие обозначения и соответственно.

Приводим взвешенную разность (2.12) к полиному:

, (2.11)

где:

.

С другой стороны функция взвешенной разности (2.12), имеет вид двух обобщенных полиномов являясь при этом функцией от пяти параметров , , :

(2.12)

(2.13)

где:

(*k*=1,2,…,5), (2.14)

(2.15)

. (2.16

Для каждой взвешенной разности (2.12) и (2.13) составляются суммы:

(2.17)

условия стационарности:

(2.18)

получим две системы линейных уравнений.

Запишем первую систему линейных уравнений, соответствующие условиям стационарности:

(2.19)

имеет вид:

(2.20)

Находим неизвестные параметры системы (2.20) из условий соотношений при :

(2.21)

где , , , - определители третьего порядка находим по правилу Крамера.

Неизвестные параметры синтеза примут вид:

(2.22)

Запишем вторую систему линейных уравнений из условий стационарности для определения неизвестных параметров :

(2.23)

имеет вид:

(2.24)

Найдем неизвестные коэффициенты системы (2.21) по правилу Крамера при :

(2.25)

получим неизвестные параметры синтеза:

(2.26)

В итоге, для нахождения неизвестных значений синтеза подвижного звена вида с вращательными кинематическим парами для соединения движения двух подвижных плоскостей, применяется итерационный процесс, каждый *k*-ый цикл осуществляется по следующему алгоритму:

1. Считаем известным (*k*-1) – ое приближение параметров

для взвешенной разности вычисляются функции по соотношениям (2.14)-(2.16). Из системы линейных уравнений (2.24) при находятся неизвестные коэффициенты , которые, согласно выражениям (2.26), определяют параметры , .

1. По значениям параметров вычисляются функции , которые определяют систему линейных уравнений (2.25) для нахождения неизвестных коэффициентов . По найденным коэффициентам из соотношений (2.26) определяются параметры , .

Итерационный процесс завершается, когда выполнится условие:

, (2.27)

где - заданная точность вычислений.

**2.3 Кинематический синтез антропоморфного манипулятора**

Заданы законы движения:

, (2.28)

или *N* дискретные положения:

, (2.29)

рабочей точки (схвата) и задан закон движения:

(2.30)

или *N* дискретные положения:

(2.31)

входного звена *1* антропоморфного манипулятора в абсолютной системе координат *ОХҮ* (рисунок 5).

Параметрами синтеза антропоморфного манипулятора являются координаты и шарнира *В* в системе координат , жестко связанной с входным звеном 1, длина звена 2, координаты и шарнира *А* в абсолютной системе координат *ОХҮ*.

Если рассмотреть движение точки относительно системы координат , то она движется по дуге окружности с центром в точке *В* и радиусом . Тогда в качестве взвешенной разности можно принять функцию:

*O*

*Y*

*X*

*A*

*ϕ*1

*B*

*x*1

*P*1

*y*1

2

1

Рисунок 5 - Антропоморфный манипулятор 

, (2.32)

где координаты и точки в системе координат определяются выражением:

. (2.33)

Взвешенная разность (2.32) с учетом (2.33) представляется в виде обобщенного полинома:

, (2.34)

где

, , ,

, , ,

, , ,

, , , .

В то же время взвешенная разность (2.32), являясь функцией от пяти параметров , , , , , может быть представлена в виде следующих двух обобщенных полиномов:

(2.35)

(2.36)

где

, , ,

. (2.37)

Для каждой взвешенной разности (2.35) и (2.36) , составляются суммы:

, (2.38)

условия стационарности

, (2.39)

которых приводят к двум системам линейных уравнений.

Первая система линейных уравнений, соответствующая условиям стационарности:

, , , (2.40)

имеет вид:

. (2.41)

После нахождения коэффициентов , , из системы (2.41) параметры синтеза антропоморфного манипулятора определяются выражениями:

, , . (2.42)

Вторая система линейных уравнений для определения следующей тройки неизвестных коэффициентов , , , составленная из условий стационарности:

, , , (2.43)

принимает вид:

. (2.44)

Вычисленные неизвестные коэффициенты системы (1.44) определяют искомые параметры синтеза:

, , . (2.45)

Таким образом, для определения искомых параметров синтеза антропоморфного манипулятора строится следующий алгоритм кинематической инверсии, аналогичный вышеприведенному алгоритму кинематического синтеза бинарного звена вида **ВВ**:

1) Считая известным (*k*-1)-ое приближение параметров , , для взвешенной разности вычисляются функции , , по соотношениям (2.10). Из системы линейных уравнений (2.14) находятся неизвестные коэффициенты , , , которые согласно выражениям (2.15) определяют параметры , , .

2) По значениям параметров , вычисляются функции , , , которые определяют систему линейных уравнений (2.17). По найденным коэффициентам , , из соотношений (2.18) определяются параметры синтеза , , .

Итерационный процесс завершается, когда выполнится условие

, (2.46)

где - заданная точность вычислений.

**2.4 Кинематический синтез вращательной кинематической пары**

Задачу о синтезе вращательной кинематической пары *С,* соединяющей две подвижные системы координат и (рисунок 6), можно рассматривать как задачу о синтезе бинарного звена вида **ВВ**,когда один из его шарниров совпадает с началом подвижной системы координат.

*A*

*B*

*C*

*ϕ*1

*ϕ*2

*x*2

*x*1

*y*1

*y*2

*Y*

*X*

*O*

Рисунок 6 - Вращательная кинематическая пара *С*

Параметрами синтеза вращательной кинематической пары *С* являются координаты , шарнира *С* в системе координат и расстояние между шарнирами *С* и *В*.

Составим взвешенную разность:

, (2.47)

где:

. (2.48)

Взвешенная разность (2.47) представляется в виде обобщенного полинома:

, (2.49)

где:

, , ,

, , , .

Составляем сумму:

(2.50)

и из условий минимума:

, , (2.51)

получаем систему линейных уравнений:

. (2.52)

После нахождения неизвестных коэффициентов , , из системы линейных уравнений (2.52) параметры синтеза вращательной кинематической пары *С* определяются из соотношений:

, , . (2.53)

**2.5 Кинематический синтез двухподвижного параллельного манипулятора *III* класса и одноподвижного параллельного манипулятора *V* класса с двумя рабочими органами**

Заданы законы движения:

, (2.54)

и

, (2.55)

или *N* дискретные положения:

, (2.56)

, (2.57)

рабочих точек (схватов) и , а также заданы законы движения:

, (2.58)

или *N* дискретные положения:

, (2.59)

двух входных звеньев 1 и 3 двухподвижного параллельного манипулятора III класса с двумя РО (рисунок 7). Необходимо определить геометрические параметры звеньев данного параллельного манипулятора.

Согласно структурному синтезу рассматриваемый двухподвижный параллельный манипулятор *III* класса с двумя РО формируется из двух антропоморфных манипуляторов и соединением их звеньев 2 и 4 при помощи бинарного звена *EF* вида **ВВ**, а затем соединением звена *EF* со стойкой при помощи бинарного звена *GH* вида **ВВ**. Следовательно, алгоритм кинематического синтеза данного параллельного манипулятора с двумя рабочими органами состоит из алгоритмов кинематического синтеза двух антропоморфных манипуляторов и , а также двух бинарных звеньев *EF* и *GH* вида **ВВ**.

Параметрами синтеза двух антропоморфных манипуляторов являются:

1. для антропоморфного манипулятора : и - координаты шарнира *А* в абсолютной системе координат *OXY*; , - координаты шарнира *В* в системе координат ; - длина звена ;

*x3*

*y3*

*φ1*

*X*

*Y*

*α3*

*φ3*

*C*

*A*

*H*

*α1*

*x1*

*φ6*

*y1*

*3*

*6*

*G*

*D*

*φ4*

*y4*

*x4*

*α4*

*y5*

*5*

*1*

*y2*

*B*

*φ2*

*x2*

*F*

*x5*

*φ5*

*E*

*2*

*4*

*P2*

*P1*

Рисунок 7 - Двухподвижный ПМ III класса с двумя РО

1. для антропоморфного манипулятора : и - координаты шарнира *С* в абсолютной системе координат *OXY*; , - координаты шарнира *D* в системе координат ; - длина звена ;

Параметры синтеза антропоморфных манипуляторов и определяются по алгоритмам кинематического синтеза антропоморфного манипулятора.

Алгоритмы кинематического синтеза антропоморфного манипулятора в точности до обозначений шарниров совпадают с алгоритмами кинематического синтеза антропоморфного манипулятора.

Если рассмотреть движение точки второго антропоморфного манипулятора относительно системы координат , то она движется по дуге окружности с центром в точке *D* и радиусом . Тогда в качестве взвешенной разности можно принять функцию:

, (2.60)

где координаты и точки в системе координат определяются выражением:

. (2.61)

Взвешенная разность (2.60) с учетом (2.61) предоставляется в виде обобщенного полинома (2.34), где

, , ,

, , ,

, , , ,

, , .

В то же время взвешенная разность (2.60), являясь функцией от пяти параметров , , , , , может быть представлена в виде двух обобщенных полиномов (2.35) и (2.36).

В дальнейшем согласно алгоритму кинематической инверсии, определяются параметры синтеза антропоморфного манипулятора :

, , , ,

.

Для синтеза бинарного звена *EF* вида **BB** необходимо предварительно решить обратную задачу кинематики двух антропоморфных манипуляторов и , т.е. по заданным значениям координат , и , рабочих точек и определить углы и входных звеньев 1 из 3, а также углы и промежуточных звеньев и .

На основе метода замкнутых векторных контуров звенья *АВ* и антропоморфного манипулятора и звенья *CD* и антропоморфного манипулятора выбираем в качестве векторов, соединяем точки *А* и , а также *С* и векторами и . Определяем модули и направления векторов и :

, (2.62)

, (2.63)

, (2.64)

. (2.65)

Составляем векторные уравнения замкнутости контуров и :

, (2.66)

. (2.67)

В уравнениях (2.66) и (2.68) векторы , и , переносим в правую часть уравнений:

, (2.68)

. (2.69)

и возводим обе части уравнений (2.68) и (2.69) в квадрат:

, (2.70)

. (2.71)

Из уравнений (2.70) и (2.71) получаем:

, (2.72)

. (2.73)

Знаки «+» и «-» в выражениях (2.72) и (2.73) выбираются в зависимости от сборок антропоморфных манипуляторов и .

Полученные значения углов и определяют углы и входных звеньев 1 и 3:

, (2.74)

, (2.75)

где

, (2.76)

. (2.77)

Углы и определяются выражениями:

, (2.78)

. (2.79)

где

, (2.80)

. (2.81)

С звеньями и антропоморфных манипуляторов и жестко скрепляем системы координат и , оси и которых направлены по направлениям звеньев и .

Рассмотрим обращенное движение системы координат относительно системы координат . При этом шарнир *F* с координатами , движется по дуге окружности с центром в шарнире *Е* с координатами , и радиусом .

Составим взвешенную разность в виде:

, (2.82)

где

, (2.83)

. (2.84)

Здесь , и , - координаты шарнира *F* соответственно в системах координат и *OXY*.

Взвешенную разность (2.82) можно привести к полиному вида (2.15), где:

, , ,

, , ,

, ,

,

, ,

, .

В то же время взвешенная разность (2.86), являясь функцией от пяти параметров , , , , , может быть представлена в виде двух обобщенных полиномов вида (2.16) и (2.17).

В дальнейшем согласно алгоритму кинематической инверсии, определяются параметры , , , , , которые в свою очередь определяют параметры синтеза бинарного звена *EF* вида **ВВ**:

, , , ,

.

Для синтеза бинарного звена *GH* вида **BB** предварительно определяем положение звена *EF*:

, (2.85)

где координаты , шарнира *Е* в абсолютной системе координат *OXY* определяются выражением:

. (2.86)

Со звеном *EF* жестко связываем систему координат , ось которой направлена по звену *EF.* Шарнир *G* данной плоскости движется по дуге окружности с центром в шарнире *H* и радиусом .

Составим взвешенную разность в виде:

, (2.87)

где координаты , шарнира *G* в абсолютной системе координат *OXY* определяются выражением:

. (2.88)

Взвешенная разность (2.87) с учетом выражения (2.88) представляется в виде обобщенного полинома (2.15), для которого:

, , ,

, , , ,

, ,

,

или в виде обобщенных полиномов (2.16) и (2.17).

В дальнейшем согласно алгоритму кинематической инверсии, определяем параметры , , , , , которые в свою очередь определяют параметры синтеза бинарного звена *GH* вида **ВВ**:

, , , ,

.

В синтезированном двухподвижном ПМ III класса с двумя РО заданные законы движения двух рабочих точек и воспроизводятся по заданным законам движения двух входных звеньев 1 и 3. Управление движением двух РО данного ПМ *III* класса можно упростить, преобразуя его в одноподвижный ПМ. Для этого соединим звенья 3 и 6 двухподвижного ПМ *III* класса можно упростить, преобразуя его в одноподвижный ПМ. Для этого соединим звенья 3 и 6 двухподвижного ПМ *III* класса с двумя РО при помощи бинарного звена *IК* вида **ВВ**. При этом получим одноподвижный ПМ *V* класса с двумя РО (рисунок 8).

*α3*

*3*

*H*

*x6*

*y6*

*α1*

*B*

*2*

*P1*

*P2*

*E*

*F*

*4*

*5*

*G*

*D*

*1*

*φ7*

*x3*

*φ3*

*Y*

*X*

*A*

*y1*

*x1*

*φ1*

*6*

*7*

*φ6*

*y3*

Рисунок 8 - Одноподвижный ПМ V класса с двумя РО

Для синтеза бинарного звена *IК* вида **ВВ** предварительно определим угол звена *GH* двухподвижного ПМ *III* класса с двумя РО (рисунок 8):

, (2.89)

где

. (2.90)

Со звеном *GH* жестко скрепляем систему координат , ось которой направлена по направлению звена *HG*.

Рассмотрим обращенное движения системы координат относительно системы координат . При этом шарнир *К* с координатами , движется по дуге окружности с центром в шарнире *I* с координатами , и радиусом .

Составим взвешенную разность:

, (2.91)

где:

. (2.92)

. (2.93)

Здесь , и , - координаты шарнира *К* соответственно в системах координат и *OXY*.

Взвешенную разность (2.91) можно привести к полиному вида (2.15), где:

, , ,

, , ,

, ,

,

, ,

, .

В то же время взвешенная разность (2.91), являясь функцией от пяти параметров , , , , , может быть представлена в виде двух обобщенных полиномов вида (2.16) и (2.17).

В дальнейшем согласно алгоритму кинематической инверсии, определяются параметры , , , , , которые в свою очередь определяют параметры синтеза бинарного звена *IK* вида **ВВ**:

, , , ,

.

**3 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

**3.1 Кинематический анализ двухподвижного параллельного манипулятора III класса с двумя рабочими органами**

Для решения прямой задачи кинематики двухподвижного параллельного манипулятора III класса с двумя рабочими органами (рисунок 9) используем метод условных обобщенных координат [27], согласно которому удаляем звено 6 рассматриваемого параллельного манипулятора путем разъединения элементов шарниров *G* и *H*. При этом в исследуемом манипуляторе появляется одна дополнительная степень свободы. Примем звено 2 за условное ведущее, а угол  - за условную обобщенную координату. Тогда рассматриваемый параллельный манипулятор III класса преобразуется в механизм II класса со структурной формулой:

. (3.1)

где - длина удаленного звена 6.

*x3*

*y3*

*φ1*

*X*

*Y*

*α3*

*φ3*

*C*

*A*

*H*

*α1*

*x1*

*φ6*

*y1*

*3*

*6*

*G*

*D*

*φ4*

*y4*

*x4*

*α4*

*y5*

*5*

*1*

*y2*

*B*

*φ2*

*x2*

*F*

*x5*

*φ5*

*E*

*2*

*4*

*P2*

*P1*

Рисунок 9 - Двухподвижный параллельный манипулятор III класса с двумя РО

Переменное расстояние определяется уравнением:

, (3.2)

где

. (3.3)

Для определения угла в выражении (3.3) решим задачу о положениях диады *II* (4,5) на основе метода замкнутых векторных контуров.

Звенья исследуемого ПМ берем в качестве векторов как показано на рисунок 10. Соединяем внешние шарниры *D* и *E* диады *II* (4,5) вектором и определяем модуль и направление данного вектора:

, (3.4)

, (3.5)

где

, (3.6)

. (3.7)

Составляем векторное уравнение замкнутости контура *DFE*:

, (3.8)

где неизвестными являются направления двух векторов и .

Для определения направления вектора выражения и уравнения (3.8) переносим в правую часть равенства:

. (3.9)

и возводим обе части данного уравнения в квадрат:

, (3.10)

где

, (3.11)

. (3.12)

Из уравнения (3.10) получаем:

. (3.13)

Знак «+» или «-» в выражении (3.13) выбирается в зависимости сборки диады II (4,5).

Тогда угол определяется выражением:

, (3.14)

где

. (3.15)

Угол звена 6 определяется выражением:

, (3.16)

где

. (3.17)

, (3.18)

. (3.19)

Построим векторные уравнения замыкания двух контурных цепей *ABEFDC* и *HGFDC* для решения вопросов, связанных с аналогами угловых скоростей и ускорений звеньев:

. (3.20)

Спроецируем систему векторных уравнений (3.20) на оси абсолютной системы координат *OXYZ*:

(3.21)

и продифференцируем полученную систему уравнений по обобщенной координате :

, (3.22)

Дифференцируя систему уравнений по второй обобщенной координате , получим:

. (3.23)

Представим эти системы линейных уравнений в матричной форме:

, (3.24)

Представим эти системы линейных уравнений в матричной форме:

, (3.25)

где

, (3.26)

, , (3.27)

, . (3.28)

Аналогами угловых скоростей звеньев являются безразмерные величины.

Векторы аналогов угловых скоростей звеньев по обобщенным координатам  и  определяются выражениями:

, (3.29)

(3.30)

Фактические значения вектора аналогов угловых скоростей звеньев определяются суммированием векторов и :

. (3.31)

Дифференцируя уравнения (2.84) и (2.85) по обобщенным координатам и , находим проекции аналогов линейных скоростей шарниров B и D входных звеньев 1 и 3:

, (3.32)

, (3.33)

. (3.34)

. (3.35)

, (3.36)

, (3.37)

, (3.38)

, (3.39)

, (3.40)

, (3.41)

, (3.42)

, (3.43)

, (3.44)

. (3.45)

Для определения аналогов угловых ускорений звеньев рассматриваемого двухподвижного параллельного манипулятора III класса с двумя рабочими органами продифференцируем системы уравнений (3.23) и (3.24) по обобщенным координатам и соответственно:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.46) |
|  | (3.47) |

Представим системы уравнений (2.47) и (2.48) в матричной форме:

, (3.48)

, (3.49)

где

,

, (3.50)

,

, (3.51)

Векторы аналогов угловых ускорений звеньев и по обобщенным координатам и определяются выражениями:

, (3.52)

, (3.53)

Фактические значения вектора аналогов угловых ускорений звеньев определяются суммированием векторов и :

. (3.54)

, (3.55)

, , (3.56)

, (3.57)

(3.58)

(3.59)

(3.60)

(3.61)

(3.62)

(3.63)

(3.64)

(3.65)

(3.66)

(3.67)

Аналоги линейных ускорений шарниров и точек звеньев имеют размерность длины.

Фактические значения проекций векторов аналогов линейных ускорений шарниров и рабочих точек определяются путем суммирования их значений в частичных перемещениях.

**3.2 Кинематический анализ одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами**

Для решения прямой задачи кинематики одноподвижного ПМ класса V с двумя рабочими органами (рисунок 10) воспользуемся методом условных обобщенных координат, согласно которому удалим звено 7 рассматриваемого параллельного манипулятора путем отделения шарнирные элементы *I* и *К*. При этом появляется еще одна степень свободы. Примем звено *2* за условную выноску, а угол за условную обобщенную координату. Тогда рассматриваемый параллельный манипулятор *V* класса преобразуется в механизм *II* класса со структурной формулой:

(3.68)

Для заданных значений обобщенной координаты исследуемого одноподвижного параллельного манипулятора с двумя рабочими органами при изменении значений условной обобщенной координаты изменяется расстояние между шарнирными центрами *I* и *К*.

Создадим функцию невязки:

, (3.69)

где длина удаленного звена 7.

Переменное расстояние определяется уравнением:

*y6*

*С*

*φ4*

*H*

*B*

*A*

*α1*

*E*

*F*

*φ6*

*G*

*D*

*x1*

*x6*

*φ1*

*φ3*

*φ7*

*3*

*7*

*6*

*4*

*5*

*2*

*y1*

*α3*

*1*

*y3*

*x3*

*P2*

*P1*

*Y*

*X*

*φ2*

*x2*

*y2*

*φ5*

Рисунок 10 - Одноподвижный ПМ V класса с двумя рабочими органами

, (3.70)

Где

, (3.71)

. (3.72)

Для определения углов и в уравнениях (3.71) и (3.72) решаем задачу о положениях диад *II* (5.6) и *II* (3.4) на основе метода замкнутых векторных контуров.

Связи исследуемого ПМ примем за векторы, как показано на рисунке 11 Соединим внешние шарниры *H* и *E* диады *II* (5,6) вектором и определим модуль и направление этого вектора:

, (3.73)

, (3.74)

где

, (3.75)

. (3.76)

Составим векторное уравнение замкнутого контура *HGE*:

, (3.77)

(3.78)

и возводим в квадрат обе части этого уравнения:

. (3.79)

. (3.80)

, (3.81)

где

. (3.82)

, (3.83)

, (3.84)

где

. (3.85)

Составим векторное уравнение замкнутости контура *CDF* :

, (3.86)

Для определения направления вектора выражения и уравнения (3.86) переносят в правую часть равенства:

(3.87)

. (3.88)

. (3.89)

, (3.90)

где

. (3.91)

Угол звена 7 определяется как:

, (3.92)

где

, (3.93)

. (3.94)

, (3.95)

. (3.96)

В таблице 2 приведены координаты всех шарниров и рабочих точек в абсолютной системе координат OXY, а также угловые положения звеньев рассматриваемого одноподвижного параллельного манипулятора класса *V* с двумя рабочими органами.

Для решения задач об аналогах угловых скоростей и ускорений звеньев составим векторные уравнения замкнутости контуров *ABEGH*, *HGFDC*, *HIKC*:

. (3.97)

Спроецируем систему векторных уравнений (3.97) на оси абсолютной системы координат *OXY*:

(3.98)

Дифференцируя полученную систему уравнений по обобщенной координате , получим:

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ϕ1* | *ХB*, мм | *YB*, мм | *ХE*, мм | *YE*, мм | *ХF*, мм | *YF*, мм | *ХG*, мм | *YG*, мм | *ХI*, мм | *YI*, мм |
| 1 | 60,0 | 134,66 | 209,00 | 266,02 | 310,54 | 417,98 | 306,81 | 261,71 | 237,60 | 272,52 | 94,66 |
| 2 | 65,73 | 122,58 | 208,46 | 256,00 | 307,27 | 407,96 | 303,93 | 251,87 | 234,33 | 268,89 | 91,99 |
| 3 | 71,46 | 110,61 | 206,72 | 245,60 | 303,38 | 397,57 | 300,48 | 241,68 | 230,42 | 265,20 | 89,02 |
| 4 | 77,19 | 98,87 | 203,79 | 234,99 | 298,86 | 386,97 | 296,47 | 231,32 | 225,89 | 261,52 | 85,76 |
| 5 | 82,91 | 87,49 | 199,71 | 224,33 | 293,72 | 376,33 | 291,89 | 220,94 | 220,73 | 257,92 | 82,24 |
| 6 | 88,64 | 76,57 | 194,51 | 213,78 | 287,99 | 365,77 | 286,76 | 210,67 | 214,99 | 254,45 | 78,49 |
| 7 | 94,37 | 66,22 | 188,24 | 203,43 | 281,72 | 355,44 | 281,12 | 200,63 | 208,71 | 251,14 | 74,55 |
| 8 | 100,1 | 56,55 | 180,97 | 193,42 | 274,96 | 345,42 | 275,00 | 190,92 | 201,94 | 248,03 | 70,46 |
| 9 | 105,83 | 47,66 | 172,78 | 183,82 | 267,77 | 335,82 | 268,43 | 181,62 | 194,74 | 245,15 | 66,24 |
| 10 | 111,56 | 39,63 | 163,73 | 174,73 | 260,24 | 326,72 | 261,48 | 172,80 | 187,20 | 242,51 | 61,95 |
| 11 | 117,29 | 32,54 | 153,93 | 166,19 | 252,43 | 318,18 | 254,19 | 164,51 | 179,39 | 240,13 | 57,61 |
| 12 | 123,02 | 26,46 | 143,48 | 158,27 | 244,43 | 310,25 | 246,60 | 156,79 | 171,39 | 238,01 | 53,27 |
| 13 | 128,75 | 21,46 | 132,46 | 150,99 | 236,32 | 302,97 | 238,77 | 149,65 | 163,27 | 236,15 | 48,96 |
| 14 | 134,48 | 17,58 | 121,01 | 144,39 | 228,18 | 296,37 | 230,74 | 143,10 | 155,13 | 234,53 | 44,72 |
| 15 | 140,21 | 14,87 | 109,22 | 138,47 | 220,06 | 290,46 | 222,52 | 137,14 | 147,01 | 233,15 | 40,57 |
| 16 | 145,94 | 13,35 | 97,22 | 133,26 | 212,05 | 285,25 | 214,14 | 131,74 | 139,00 | 231,99 | 36,54 |
| 17 | 151,67 | 13,03 | 85,13 | 128,75 | 204,18 | 280,74 | 205,57 | 126,89 | 131,15 | 231,04 | 32,64 |

Продолжение таблицы 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ϕ1* | *ХK*, мм | *YK*, мм | *ХD*, мм | *YD*, мм | *ХP*1, мм | *YP*1, мм | *ХP*2, мм | *YP*2, мм |
| 1 | 60,0 | 401,60 | 128,38 | 520,78 | 203,57 | 291,58 | 449,71 | 594,03 | 478,88 |
| 2 | 65,73 | 397,97 | 125,74 | 514,66 | 204,72 | 284,42 | 445,89 | 577,26 | 482,65 |
| 3 | 71,46 | 394,26 | 122,85 | 508,23 | 205,71 | 276,23 | 441,53 | 559,43 | 485,96 |
| 4 | 77,19 | 390,54 | 119,74 | 501,57 | 206,51 | 267,25 | 436,63 | 540,77 | 488,68 |
| 5 | 82,91 | 386,88 | 116,46 | 494,79 | 207,08 | 257,66 | 431,24 | 521,49 | 490,71 |
| 6 | 88,64 | 383,32 | 113,03 | 487,95 | 207,41 | 247,63 | 425,38 | 501,78 | 491,96 |
| 7 | 94,37 | 379,90 | 109,50 | 481,15 | 207,50 | 237,29 | 419,11 | 481,81 | 492,38 |
| 8 | 100,1 | 376,65 | 105,91 | 474,45 | 207,35 | 226,77 | 412,47 | 461,74 | 491,95 |
| 9 | 105,83 | 373,60 | 102,30 | 467,92 | 206,99 | 216,16 | 405,53 | 441,73 | 490,67 |
| 10 | 111,56 | 370,77 | 98,70 | 461,61 | 206,42 | 205,52 | 398,35 | 421,87 | 488,52 |
| 11 | 117,29 | 368,16 | 95,15 | 455,56 | 205,68 | 194,94 | 390,98 | 402,30 | 485,55 |
| 12 | 123,02 | 365,77 | 91,70 | 449,82 | 204,80 | 184,44 | 383,49 | 383,07 | 481,76 |
| 13 | 128,75 | 363,61 | 88,36 | 444,41 | 203,81 | 174,07 | 375,93 | 364,27 | 477,20 |
| 14 | 134,48 | 361,66 | 85,17 | 439,34 | 202,74 | 163,85 | 368,33 | 345,93 | 471,87 |
| 15 | 140,21 | 359,92 | 82,14 | 434,64 | 201,61 | 153,82 | 360,73 | 328,06 | 465,81 |
| 16 | 145,94 | 358,37 | 79,29 | 430,29 | 200,46 | 143,99 | 353,14 | 310,64 | 459,00 |
| 17 | 151,67 | 357,00 | 76,62 | 426,30 | 199,31 | 134,41 | 345,57 | 293,62 | 451,41 |

Продолжение таблицы 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 60,0 | 89,69 | 37,70 | -1,41 | -156,11 | -85,68 | 14,64 | 32,25 | -45,12 | 125,09 | 107,16 | 78,44 | 125,10 |
| 2 | 65,73 | 95,42 | 36,52 | -1,26 | -155,97 | -83,18 | 14,65 | 34,09 | -42,92 | 127,59 | 109,66 | 80,28 | 126,94 |
| 3 | 71,46 | 101,15 | 35,61 | -1,09 | -155,80 | -80,56 | 14,69 | 36,02 | -40,58 | 130,21 | 112,28 | 82,21 | 128,87 |
| 4 | 77,19 | 106,88 | 34,93 | -0,90 | -155,61 | -77,84 | 14,76 | 38,01 | -38,13 | 132,93 | 115,00 | 84,19 | 130,86 |
| 5 | 82,91 | 112,60 | 34,49 | -0,69 | -155,40 | -75,05 | 14,86 | 40,02 | -35,60 | 135,72 | 117,79 | 86,21 | 132,87 |
| 6 | 88,64 | 118,33 | 34,27 | -0,46 | -155,17 | -72,22 | 15,00 | 42,05 | -33,00 | 138,55 | 120,62 | 88,24 | 134,90 |
| 7 | 94,37 | 124,06 | 34,27 | -0,22 | -154,93 | -69,37 | 15,19 | 44,06 | -30,35 | 141,40 | 123,47 | 90,25 | 136,91 |
| 8 | 100,1 | 129,79 | 34,48 | 0,01 | -154,69 | -66,52 | 15,41 | 46,05 | -27,67 | 144,25 | 126,32 | 92,23 | 138,90 |
| 9 | 105,83 | 135,52 | 34,90 | 0,25 | -154,46 | -63,69 | 15,68 | 47,98 | -24,95 | 147,07 | 129,15 | 94,17 | 140,84 |
| 10 | 111,56 | 141,25 | 35,54 | 0,47 | -154,24 | -60,90 | 15,99 | 49,86 | -22,21 | 149,87 | 131,94 | 96,05 | 142,71 |
| 11 | 117,29 | 146,98 | 36,39 | 0,66 | -154,05 | -58,16 | 16,34 | 51,66 | -19,45 | 152,61 | 134,68 | 97,85 | 144,52 |
| 12 | 123,02 | 152,71 | 37,45 | 0,82 | -153,89 | -55,49 | 16,74 | 53,38 | -16,67 | 155,28 | 137,35 | 99,57 | 146,24 |
| 13 | 128,75 | 158,44 | 38,72 | 0,92 | -153,78 | -52,89 | 17,18 | 55,01 | -13,89 | 157,88 | 139,95 | 101,20 | 147,87 |
| 14 | 134,48 | 164,17 | 40,20 | 0,97 | -153,74 | -50,37 | 17,65 | 56,55 | -11,08 | 160,39 | 142,47 | 102,74 | 149,40 |
| 15 | 140,21 | 169,90 | 41,89 | 0,93 | -153,78 | -47,95 | 18,16 | 57,98 | -8,25 | 162,82 | 144,89 | 104,17 | 150,83 |
| 16 | 145,94 | 175,63 | 43,76 | 0,79 | -153,92 | -45,63 | 18,69 | 59,31 | -5,39 | 165,14 | 147,21 | 105,50 | 152,16 |
| 17 | 151,67 | 181,36 | 45,81 | 0,52 | -154,18 | -43,41 | 19,24 | 60,54 | -2,46 | 167,36 | 149,43 | 106,73 | 153,39 |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.99) |

Система уравнений (3.99) линейна по отношению к аналогам угловых скоростей звеньев по обобщенной координате . Эта система уравнений представляется в виде матрицы:

****, (3.100)

где

, (3.101)

**,** . (3.102)

Вектор аналогов угловых скоростей звеньев по обобщенной координате определяется выражением:

(3.103)

при, что соответствует не особым положениям двухподвижного параллельного манипулятора класса *V* с двумя рабочими органами.

Значение промышленных скоростей звеньев реализации одноподвижного интерпретационного манипулятора *V* класса приведено в таблице 2.

Продифференцируем их координаты по обобщенной координате , чтобы найти эквиваленты линейных скоростей шарниров и рабочих точек и исследуемого одноподвижного параллельного манипулятора *V* класса с двумя рабочими органами.

, (3.104)

, (3.105)

, (3.106)

, (3.107)

, (3.108)

, (3.109)

, (3.110)

, (3.111)

. (3.112)

Рабочие точки и исследуемого одноподвижного ПМ класса *V* с двумя исполнительными органами, а также значения проекций векторов аналогов линейных скоростей шарниров приведены в таблице 3.

Продифференцируем систему уравнений (3.98) по обобщенной координате для определения аналогов угловых ускорений звеньев рассматриваемого одноподвижного ПМ класса *V* с двумя рабочими органами:

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ϕ1* | *ϕ2'* | *ϕ5'* | *ϕ6'* | *ϕ4'* | *ϕ3'* | *ϕ7'* |
| 1 | 60,0 | -0,196470 | 0,019939 | 0,437566 | 0,303803 | 0,319143 | -0,00386 |
| 2 | 65,73 | -0,148260 | 0,024425 | 0,463692 | 0,326557 | 0,336252 | 0 |
| 3 | 71,46 | -0,104080 | 0,028690 | 0,483395 | 0,345870 | 0,348078 | 0,004434 |
| 4 | 77,19 | -0,062590 | 0,032729 | 0,497661 | 0,362193 | 0,355410 | 0,009417 |
| 5 | 82,91 | -0,022980 | 0,035975 | 0,507284 | 0,376089 | 0,358660 | 0,015488 |
| 6 | 88,64 | 0,015511 | 0,038735 | 0,512757 | 0,387876 | 0,358306 | 0,021424 |
| 7 | 94,37 | 0,053487 | 0,040602 | 0,514519 | 0,397922 | 0,354677 | 0,028040 |
| 8 | 100,1 | 0,090967 | 0,041336 | 0,513025 | 0,406500 | 0,348177 | 0,034979 |
| 9 | 105,83 | 0,128224 | 0,040711 | 0,508607 | 0,413882 | 0,339033 | 0,041597 |
| 10 | 111,56 | 0,165475 | 0,038772 | 0,501411 | 0,420454 | 0,327565 | 0,048707 |
| 11 | 117,29 | 0,202640 | 0,035027 | 0,491824 | 0,426412 | 0,314117 | 0,055408 |
| 12 | 123,02 | 0,239425 | 0,029783 | 0,479955 | 0,432156 | 0,299004 | 0,062191 |
| 13 | 128,75 | 0,275756 | 0,022384 | 0,466236 | 0,437982 | 0,282651 | 0,068274 |
| 14 | 134,48 | 0,311188 | 0,012697 | 0,450837 | 0,444395 | 0,265392 | 0,073918 |
| 15 | 140,21 | 0,345633 | 0,000662 | 0,434129 | 0,452006 | 0,247588 | 0,079144 |
| 16 | 145,94 | 0,378385 | -0,014110 | 0,416279 | 0,461631 | 0,229593 | 0,083509 |
| 17 | 151,67 | 0,408988 | -0,032650 | 0,397689 | 0,474613 | 0,211807 | 0,087085 |

Таблица 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ϕ1* | *UBX*, мм | *UBY*, мм | *UEX*, мм | *UEY*, мм | *UFX*, мм | *UFY*, мм | *UGX*, мм | *UGY*, мм | *UIX*, мм | *UIY*, мм |
| 1 | 60,0 | -121,00 | 0,66 | -101,05 | -26,29 | -100,97 | -26,25 | -99,59 | -26,38 | -37,63 | -24,22 |
| 2 | 65,73 | -120,46 | -11,42 | -105,81 | -32,02 | -105,72 | -28,30 | -104,02 | -32,12 | -38,69 | -27,18 |
| 3 | 71,46 | -118,72 | -23,39 | -108,66 | -37,94 | -108,56 | -33,56 | -106,55 | -38,06 | -38,95 | -29,98 |
| 4 | 77,19 | -115,79 | -35,13 | -109,84 | -43,90 | -109,75 | -38,90 | -107,44 | -44,02 | -38,52 | -32,56 |
| 5 | 82,91 | -111,71 | -46,51 | -109,55 | -49,72 | -109,46 | -44,19 | -106,90 | -49,85 | -37,51 | -34,90 |
| 6 | 88,64 | -106,51 | -57,43 | -107,96 | -55,26 | -107,89 | -49,31 | -105,11 | -55,39 | -36,03 | -36,95 |
| 7 | 94,37 | -100,24 | -67,78 | -105,24 | -60,39 | -105,18 | -54,16 | -102,24 | -60,52 | -34,16 | -38,68 |
| 8 | 100,1 | -92,97 | -77,45 | -101,52 | -64,99 | -101,49 | -58,65 | -98,47 | -65,10 | -31,99 | -40,07 |
| 9 | 105,83 | -84,78 | -86,34 | -96,96 | -68,96 | -96,96 | -62,71 | -93,96 | -69,06 | -29,60 | -41,11 |
| 10 | 111,56 | -75,73 | -94,37 | -91,70 | -72,24 | -91,73 | -66,30 | -88,85 | -72,32 | -27,05 | -41,77 |
| 11 | 117,29 | -65,93 | -101,46 | -85,89 | -74,77 | -85,93 | -69,40 | -83,31 | -74,84 | -24,42 | -42,07 |
| 12 | 123,02 | -55,48 | -107,54 | -79,65 | -76,54 | -79,70 | -72,00 | -77,46 | -76,59 | -21,77 | -42,01 |
| 13 | 128,75 | -44,46 | -112,54 | -73,10 | -77,55 | -73,15 | -74,15 | -71,46 | -77,58 | -19,16 | -41,62 |
| 14 | 134,48 | -33,01 | -116,42 | -66,36 | -77,83 | -66,39 | -75,88 | -65,43 | -77,84 | -16,63 | -40,92 |
| 15 | 140,21 | -21,22 | -119,13 | -59,53 | -77,42 | -59,53 | -77,30 | -59,48 | -77,42 | -14,23 | -39,95 |
| 16 | 145,94 | -9,22 | -120,65 | -52,67 | -76,39 | -52,64 | -78,53 | -53,70 | -76,37 | -11,98 | -38,74 |
| 17 | 151,67 | 2,87 | -120,97 | -45,82 | -74,85 | -45,75 | -79,77 | -48,18 | -74,80 | -9,91 | -37,36 |

Продолжение таблицы 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ϕ1* | *UKX*, мм | *UKY*, мм | *UDX*, мм | *UDY*, мм | *UP*1*X*, мм | *UP*1*Y*, мм | *UP*2*X*, мм | *UP*2*Y*, мм |
| 1 | 60,0 | -37,50 | -24,71 | -60,50 | 14,28 | -95,69 | -1,46 | -144,14 | 63,91 |
| 2 | 65,73 | -38,69 | -27,19 | -64,13 | 13,12 | -101,41 | -13,38 | -154,89 | 62,68 |
| 3 | 71,46 | -39,10 | -29,40 | -66,73 | 11,43 | -105,41 | -24,94 | -163,66 | 59,61 |
| 4 | 77,19 | -38,84 | -31,31 | -68,42 | 9,36 | -107,83 | -36,12 | -170,62 | 55,06 |
| 5 | 82,91 | -38,04 | -32,90 | -69,25 | 7,04 | -108,80 | -46,89 | -175,92 | 49,37 |
| 6 | 88,64 | -36,77 | -34,14 | -69,30 | 4,59 | -108,47 | -57,17 | -179,67 | 42,84 |
| 7 | 94,37 | -35,14 | -35,02 | -68,63 | 2,11 | -106,94 | -66,92 | -181,99 | 35,73 |
| 8 | 100,1 | -33,23 | -35,52 | -67,32 | -0,29 | -104,34 | -76,08 | -183,01 | 28,27 |
| 9 | 105,83 | -31,10 | -35,65 | -65,43 | -2,55 | -100,76 | -84,58 | -182,84 | 20,65 |
| 10 | 111,56 | -28,84 | -35,40 | -63,03 | -4,60 | -96,32 | -92,39 | -181,64 | 13,05 |
| 11 | 117,29 | -26,50 | -34,80 | -60,21 | -6,38 | -91,10 | -99,47 | -179,55 | 5,57 |
| 12 | 123,02 | -24,16 | -33,88 | -57,05 | -7,87 | -85,20 | -105,79 | -176,74 | -1,68 |
| 13 | 128,75 | -21,85 | -32,68 | -53,65 | -9,05 | -78,69 | -111,34 | -173,39 | -8,66 |
| 14 | 134,48 | -19,62 | -31,24 | -50,09 | -9,92 | -71,64 | -116,10 | -169,69 | -15,35 |
| 15 | 140,21 | -17,52 | -29,62 | -46,45 | -10,50 | -64,11 | -120,07 | -165,87 | -21,79 |
| 16 | 145,94 | -15,55 | -27,86 | -42,81 | -10,81 | -56,13 | -123,25 | -162,16 | -28,07 |
| 17 | 151,67 | -13,74 | -26,03 | -39,25 | -10,89 | -47,72 | -125,62 | -158,90 | -34,35 |

|  |  |
| --- | --- |
|  | . (3.113) |

Представим систему уравнений (3.113) в матричной форме:

, (3.114)

где

**,**

. (3.115)

Следующее выражение дает вектор аналогов угловых ускорений звеньев по обобщенной координате :

(3.116)

Значения аналогов угловых ускорений звеньев исследуемого одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами приведены в таблице 4.

Дифференцируя их проекции векторов аналогов линейных скоростей (3.104) и (3.112) по обобщенной координате , шарниров и рабочих точек и рассматриваемого одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами линейные ускорения проецируются по обобщенной координате следующим образом:

, (3.117)

(3.118)

(3.119)

(3.120)

(3.121)

Таблица 4

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ϕ1* |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 60,0 | 0,477834 | 0,046928 | 0,282373 | 0,253385 | 0,192331 | 0,036420 |
| 2 | 65,73 | 0,438995 | 0,046363 | 0,217175 | 0,216113 | 0,138251 | 0,044741 |
| 3 | 71,46 | 0,411626 | 0,043701 | 0,162214 | 0,184175 | 0,091190 | 0,051654 |
| 4 | 77,19 | 0,393256 | 0,038868 | 0,115175 | 0,156422 | 0,049597 | 0,057050 |
| 5 | 82,91 | 0,381531 | 0,032165 | 0,074265 | 0,132227 | 0,012351 | 0,061925 |
| 6 | 88,64 | 0,374914 | 0,023510 | 0,038148 | 0,111156 | -0,021170 | 0,065166 |
| 7 | 94,37 | 0,371817 | 0,013048 | 0,005926 | 0,093076 | -0,051490 | 0,067490 |
| 8 | 100,1 | 0,370756 | 0,001040 | -0,023020 | 0,077794 | -0,078640 | 0,068904 |
| 9 | 105,83 | 0,370790 | -0,012700 | -0,048990 | 0,065378 | -0,102760 | 0,069543 |
| 10 | 111,56 | 0,370539 | -0,027750 | -0,072430 | 0,055885 | -0,123700 | 0,068455 |
| 11 | 117,29 | 0,369461 | -0,044370 | -0,093250 | 0,049395 | -0,141280 | 0,066514 |
| 12 | 123,02 | 0,366657 | -0,062310 | -0,111710 | 0,046347 | -0,155410 | 0,063124 |
| 13 | 128,75 | 0,361163 | -0,081810 | -0,127500 | 0,047124 | -0,165830 | 0,058271 |
| 14 | 134,48 | 0,352617 | -0,103090 | -0,140670 | 0,052790 | -0,172590 | 0,052296 |
| 15 | 140,21 | 0,339809 | -0,127140 | -0,151050 | 0,065009 | -0,175770 | 0,045368 |
| 16 | 145,94 | 0,322057 | -0,155850 | -0,158660 | 0,086825 | -0,175500 | 0,037396 |
| 17 | 151,67 | 0,297635 | -0,192880 | -0,163360 | 0,124265 | -0,172040 | 0,029212 |

(3.122)

(3.123)

(3.124)

(3.125)

Значения проекций векторов аналогов линейных ускорений шарнирных звеньев и рабочих точек и рассматриваемого одноподвижного параллельного манипулятора *V* класса с двумя рабочими органами приведены в таблице 5.

Таблица 5

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | ϕ1 | *WBX*, мм | *WBY*, мм | *WEX*, мм | *WEY*, мм | *WFX*, мм | *WFY*, мм | *WGX*, мм | *WGY*, мм | *WIX*, мм | *WIY*, мм |
| 1 | 60,0 | -0,66 | -121,00 | -54,25 | -59,38 | -54,12 | -52,20 | -50,81 | -59,56 | -13,04 | -31,41 |
| 2 | 65,73 | 11,42 | -120,46 | -34,89 | -61,64 | -34,81 | -54,54 | -31,49 | -61,80 | -4,75 | -29,75 |
| 3 | 71,46 | 23,39 | -118,72 | -17,86 | -62,18 | -17,84 | -55,50 | -14,65 | -62,30 | 2,27 | -27,71 |
| 4 | 77,19 | 35,13 | -115,79 | -2,79 | -61,06 | -2,84 | -55,11 | 0,07 | -61,14 | 8,20 | -25,26 |
| 5 | 82,91 | 46,51 | -111,71 | 10,57 | -58,39 | 10,44 | -53,47 | 12,93 | -58,41 | 13,16 | -22,41 |
| 6 | 88,64 | 57,43 | -106,51 | 22,35 | -54,32 | 22,16 | -50,73 | 24,08 | -54,29 | 17,21 | -19,22 |
| 7 | 94,37 | 67,78 | -100,24 | 32,63 | -49,05 | 32,40 | -47,05 | 33,60 | -48,97 | 20,43 | -15,75 |
| 8 | 100,1 | 77,45 | -92,97 | 41,47 | -42,79 | 41,21 | -42,64 | 41,55 | -42,66 | 22,87 | -12,08 |
| 9 | 105,83 | 86,34 | -84,78 | 48,88 | -35,75 | 48,63 | -37,70 | 47,95 | -35,60 | 24,58 | -8,30 |
| 10 | 111,56 | 94,37 | -75,73 | 54,91 | -28,19 | 54,69 | -32,47 | 52,86 | -28,02 | 25,59 | -4,51 |
| 11 | 117,29 | 101,46 | -65,93 | 59,58 | -20,36 | 59,44 | -27,16 | 56,31 | -20,18 | 25,97 | -0,81 |
| 12 | 123,02 | 107,54 | -55,48 | 62,97 | -12,50 | 62,94 | -22,04 | 58,39 | -12,33 | 25,78 | 2,71 |
| 13 | 128,75 | 112,54 | -44,46 | 65,18 | -4,85 | 65,28 | -17,34 | 59,18 | -4,70 | 25,08 | 5,97 |
| 14 | 134,48 | 116,42 | -33,01 | 66,35 | 2,35 | 66,58 | -13,35 | 58,81 | 2,50 | 23,97 | 8,90 |
| 15 | 140,21 | 119,13 | -21,22 | 66,70 | 8,90 | 67,02 | -10,40 | 57,42 | 9,07 | 22,52 | 11,42 |
| 16 | 145,94 | 120,65 | -9,22 | 66,50 | 14,63 | 66,85 | -8,93 | 55,17 | 14,85 | 20,82 | 13,51 |
| 17 | 151,67 | 120,97 | 2,87 | 66,18 | 19,34 | 66,42 | -9,70 | 52,23 | 19,70 | 18,95 | 15,13 |

Продолжение таблицы 5

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ϕ1°* | *WKX*, мм | *WKY*, мм | *WDX*, мм | *WDY*, мм | *WP*1*X*, мм | *WP*1*Y*, мм | *WP*2*X*, мм | *WP*2*Y*, мм |
| 1 | 60,0 | -14,27 | -26,68 | -40,41 | -10,98 | -62,53 | -120,69 | -116,93 | -8,43 |
| 2 | 65,73 | -6,26 | -23,96 | -30,06 | -16,45 | -45,21 | -117,41 | -96,80 | -27,47 |
| 3 | 71,46 | 0,52 | -21,02 | -20,66 | -20,50 | -29,41 | -113,93 | -78,40 | -42,76 |
| 4 | 77,19 | 6,25 | -17,83 | -12,02 | -23,23 | -14,98 | -110,00 | -61,30 | -54,68 |
| 5 | 82,91 | 11,01 | -14,40 | -4,03 | -24,76 | -1,80 | -105,50 | -45,31 | -63,57 |
| 6 | 88,64 | 14,90 | -10,75 | 3,33 | -25,20 | 10,20 | -100,38 | -30,38 | -69,77 |
| 7 | 94,37 | 17,97 | -6,95 | 10,07 | -24,69 | 21,08 | -94,65 | -16,55 | -73,60 |
| 8 | 100,1 | 20,27 | -3,11 | 16,12 | -23,35 | 30,90 | -88,35 | -3,92 | -75,37 |
| 9 | 105,83 | 21,85 | 0,69 | 21,45 | -21,33 | 39,71 | -81,58 | 7,39 | -75,43 |
| 10 | 111,56 | 22,77 | 4,34 | 25,99 | -18,80 | 47,59 | -74,42 | 17,25 | -74,13 |
| 11 | 117,29 | 23,08 | 7,72 | 29,69 | -15,90 | 54,58 | -66,98 | 25,55 | -71,80 |
| 12 | 123,02 | 22,86 | 10,74 | 32,53 | -12,82 | 60,80 | -59,35 | 32,16 | -68,82 |
| 13 | 128,75 | 22,19 | 13,31 | 34,48 | -9,70 | 66,32 | -51,61 | 36,97 | -65,56 |
| 14 | 134,48 | 21,16 | 15,38 | 35,58 | -6,69 | 71,27 | -43,82 | 39,82 | -62,39 |
| 15 | 140,21 | 19,84 | 16,92 | 35,88 | -3,91 | 75,77 | -36,00 | 40,48 | -59,77 |
| 16 | 145,94 | 18,34 | 17,91 | 35,45 | -1,44 | 80,00 | -28,11 | 38,50 | -58,24 |
| 17 | 151,67 | 16,71 | 18,38 | 34,38 | 0,64 | 84,20 | -20,08 | 32,94 | -58,66 |

**4 КИНЕТОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

**4.1 Уравнения равновесия звеньев плоских исполнительных механизмов манипулятивных роботов параллельной структуры с двумя рабочими органами**

Определить силы инерции и инерционные моменты ведущих звеньев плоских приводов манипуляторных роботов параллельной конструкции с несколькими рабочими органами возможно в результате их динамического анализа. Плоская система сил создается силами инерции звеньев, создающих плоское движение. До центра масс звена можно добраться, перенеся туда плоскую систему инерционных сил *i*-го звена. В этом случае мы можем определить первичный вектор и первичный момент сил инерции, которые вместе составляют вектор.

(4.1)

(4.2)

где и – скорость и ускорение *j*-го ведущего звена.

Все внешние силы и моменты, действующие на *i*-е звено плоских приводов манипулятивных роботов с параллельной структурой, а также главный вектор и главный момент сил инерции будут сведены к главному вектору и главному моменту , что составит быть применен к центру масс звена , как определено выражениями:

, (4.3)

Для кинетостатического анализа плоских приводов манипулятивных роботов параллельной структуры со многими рабочими органами необходимо составить уравнения равновесия их звеньев. Поскольку исследуемые приводы роботов-манипуляторов параллельной структуры со многими рабочими органами состоят из бинарных звеньев и треугольных базовых звеньев с вращательными кинематическими парами, составим уравнения равновесия для этих звеньев.

**4.2. Уравнения равновесия треугольного бинарного звена с вращательными кинематическими парами**

Шарниры A, B и центр масс *Si* расположены в координатах и бинарного звена AB с вращательными кинематическими парами, связанными со звеньями (*i-1*) и (*i+1*) в абсолютной системе координат OXY, где применяются главный вектор и главный момент .

Силы реакции и возникают из звеньев (*i-1*) и (*i+1*) под действием главного вектора и главного момента во вращающихся кинематических парах А и В этого бинарного звена *i*. Уравнения равновесия исследуемого бинарного звена АВ составим, учтя суммы проекций сил , и на оси OX и OY в абсолютную систему координат *OXY* и их моментов относительно точки А (рисунок 11):

*В*

*А*

*Y*

*X*

*О*





*i*-1







*i*+1

Рисунок 11 – Бинарное звено АВ с вращательными кинематическими парами

. (4.4)

которые представлены в матричной форме:

(4.5)

, (4.6)

где:

, , ,

**4.3 Уравнения равновесия треугольного звена с вращательными кинематическими парами**

Координаты и шарниров A, B, C и центр масс заданы в абсолютной системе координат *OXY*, где приложены главный вектор и главный момент , и треугольное базовое звено ABC с вращательными кинематическими парами, соединенными со звеньями. (*i-1*) и (*i+1*) (рис. 13).

В трех вращательных кинематических парах А, В и С рассматриваемого базового звена *i* под действием главного вектора и главного момента возникают силы реакции , , и . Спроецируем силы *Ri-1*, *Ri+1*и *Ri+2*на оси *OX* и *OY* в абсолютной системе координат *OXY* и рассмотрим их моменты относительно точки A. Тогда уравнения равновесия для этого основного звена будут иметь вид:

(4.7)

которые представлены в матричной форме:

(4.8)

*i*

*Y*

*X*

*О*

*В*

*А*

*С*

*i*-1

*i*+2





*i*+1









Рисунок 13 - Треугольное базовое звено с вращательными кинематическими парами

. (4.9)

**4.4. Кинетостатический анализ одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами**

Все внешние силы и моменты, действующие на звенья одноподвижного параллельного манипулятора *V* класса с двумя рабочими органами (рисунок 8), а также силы инерции и инерционные моменты приводятся к центрам масс звеньев и основные векторы и основные моменты . Необходимо определить силы реакции в кинематических парах рассматриваемого параллельного манипулятора, возникающие под действием главных векторов и главных моментов.

Исследуемый параллельный манипулятор имеет структурную формулу:

. (4.10)

В результате сначала необходимо кинетостатически проанализировать группу *V* класса 3-го порядка, а затем ведущее звено 7. Координаты и ускорения центров масс, а также проекции главных векторов и значения главных векторов моменты на всех подвижных звеньях рассматриваемого манипулятора *V* класса приведены в таблицах 6 –10.

(4.11)

Таблица 6

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , н | , н | *M*5*дв*, н·мм | , н | , н | *M*6*дв*, н·мм |
| 1 | 3.337083601 | -71.60894832 | 0.397150249 | 3.337083601 | -71.60894832 | 0.397150249 |
| 2 | 11.29494746 | -66.78381144 | 1.403462451 | 11.29494746 | -66.78381144 | 1.403462451 |
| 3 | 19.76619638 | -61.71839356 | 2.560043554 | 19.76619638 | -61.71839356 | 2.560043554 |
| 4 | 28.68416912 | -56.3627026 | 3.833271236 | 28.68416912 | -56.3627026 | 3.833271236 |
| 5 | 38.01442652 | -50.62021612 | 5.19345942 | 38.01442652 | -50.62021612 | 5.19345942 |
| 6 | 47.70227669 | -44.39594271 | 6.608803239 | 47.70227669 | -44.39594271 | 6.608803239 |
| 7 | 57.70566263 | -37.57794193 | 8.050973675 | 57.70566263 | -37.57794193 | 8.050973675 |
| 8 | 67.97634991 | -30.04055107 | 9.494228797 | 67.97634991 | -30.04055107 | 9.494228797 |
| 9 | 78.46944995 | -21.64448579 | 10.91700226 | 78.46944995 | -21.64448579 | 10.91700226 |
| 10 | 89.10035655 | -12.21972502 | 12.29842256 | 89.10035655 | -12.21972502 | 12.29842256 |
| 11 | 99.82764123 | -1.608043185 | 13.62654985 | 99.82764123 | -1.608043185 | 13.62654985 |
| 12 | 110.6544537 | 10.45809755 | 14.90405991 | 110.6544537 | 10.45809755 | 14.90405991 |
| 13 | 121.5353502 | 24.25613348 | 16.12896017 | 121.5353502 | 24.25613348 | 16.12896017 |
| 14 | 132.576361 | 40.18112727 | 17.32573095 | 132.576361 | 40.18112727 | 17.32573095 |
| 15 | 144.0331741 | 58.87883889 | 18.53470392 | 144.0331741 | 58.87883889 | 18.53470392 |
| 16 | 156.4099537 | 81.37083748 | 19.831536 | 156.4099537 | 81.37083748 | 19.831536 |
| 17 | 170.9121251 | 109.6084708 | 21.36347686 | 170.9121251 | 109.6084708 | 21.36347686 |

Таблица 7

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм |
| 1 | 230.7533 | 323.0833 | 315.2367 | 284.9833 | 288.7433 | 114.0867 | 510.93 |
| 2 | 221.0 | 320.54 | 305.2767 | 281.8433 | 284.2533 | 112.1067 | 499.96 |
| 3 | 210.8133 | 317.21 | 294.95 | 278.0933 | 279.6267 | 109.8133 | 488.41 |
| 4 | 200.37 | 313.0933 | 284.4267 | 273.74 | 274.9467 | 107.2167 | 476.4367 |
| 5 | 189.8267 | 308.2233 | 273.8667 | 268.78 | 270.2867 | 104.3233 | 464.2033 |
| 6 | 179.3267 | 302.6267 | 263.4067 | 263.2467 | 265.7067 | 101.16 | 451.8333 |
| 7 | 168.98 | 296.3567 | 253.1667 | 257.1833 | 261.2567 | 97.75333 | 439.4667 |
| 8 | 158.9133 | 289.4667 | 243.2533 | 250.6333 | 256.9833 | 94.13333 | 427.2033 |
| 9 | 149.2133 | 282.0267 | 233.7533 | 243.6467 | 252.9233 | 90.32667 | 415.1567 |
| 10 | 139.96 | 274.1067 | 224.75 | 236.3067 | 249.1033 | 86.38333 | 403.4 |
| 11 | 131.2233 | 265.78 | 216.2933 | 228.67 | 245.5467 | 82.33333 | 392.0133 |
| 12 | 123.0567 | 257.1333 | 208.4367 | 220.8067 | 242.2667 | 78.22 | 381.0467 |
| 13 | 115.5067 | 248.2367 | 201.2033 | 212.7867 | 239.2667 | 74.07667 | 370.55 |
| 14 | 108.6067 | 239.1733 | 194.62 | 204.6833 | 236.5433 | 69.95 | 360.5467 |
| 15 | 102.3867 | 230.0033 | 188.69 | 196.53 | 234.0967 | 65.86 | 351.0533 |
| 16 | 96.86667 | 220.8033 | 183.4167 | 188.3967 | 231.91 | 61.84667 | 342.06 |
| 17 | 92.06333 | 211.6267 | 178.7933 | 180.3 | 229.9767 | 57.93 | 333.5533 |

Продолжение таблицы 7

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм |
| 1 | 329.7533 | 468.1267 | 115.3167 | 337.06 | 111.52 | 134.33 | 148.5 |
| 2 | 330.4333 | 464.8767 | 114.82 | 333.43 | 108.865 | 128.29 | 148.23 |
| 3 | 330.7167 | 461.4967 | 114.1867 | 329.73 | 105.935 | 122.305 | 147.36 |
| 4 | 330.5533 | 458.0367 | 113.4167 | 326.03 | 102.75 | 116.435 | 145.895 |
| 5 | 329.8933 | 454.5567 | 112.5133 | 322.4 | 99.35 | 110.745 | 143.855 |
| 6 | 328.71 | 451.09 | 111.48 | 318.885 | 95.76 | 105.285 | 141.255 |
| 7 | 327.0 | 447.6833 | 110.3333 | 315.52 | 92.025 | 100.11 | 138.12 |
| 8 | 324.7667 | 444.3667 | 109.0867 | 312.34 | 88.185 | 95.275 | 134.485 |
| 9 | 322.03 | 441.1733 | 107.7633 | 309.375 | 84.27 | 90.83 | 130.39 |
| 10 | 318.8067 | 438.1267 | 106.3733 | 306.64 | 80.325 | 86.815 | 125.865 |
| 11 | 315.14 | 435.24 | 104.9433 | 304.145 | 76.38 | 83.27 | 120.965 |
| 12 | 311.0533 | 432.53 | 103.5 | 301.89 | 72.485 | 80.23 | 115.74 |
| 13 | 306.5933 | 430.0067 | 102.0567 | 299.88 | 68.66 | 77.73 | 110.23 |
| 14 | 301.7833 | 427.6667 | 100.6367 | 298.095 | 64.945 | 75.79 | 104.505 |
| 15 | 296.6467 | 425.52 | 99.25 | 296.535 | 61.355 | 74.435 | 98.61 |
| 16 | 291.2 | 423.5533 | 97.91667 | 295.18 | 57.915 | 73.675 | 92.61 |
| 17 | 285.43 | 421.7667 | 96.64333 | 294.02 | 54.63 | 73.515 | 86.565 |

Таблица 8

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 |
| 1 | -39.1467 | -100.357 | -53.06 | -57.0467 | -21.2833 | -30.3233 | -70.4867 |
| 2 | -22.8933 | -99.8367 | -33.73 | -59.3267 | -12.08 | -30.5167 | -53.89 |
| 3 | -7.96 | -98.2767 | -16.7833 | -59.9933 | -4.12667 | -30.0033 | -38.9667 |
| 4 | 5.786667 | -95.6167 | -1.85333 | -59.1033 | 2.756667 | -28.8 | -25.3867 |
| 5 | 18.42667 | -91.8667 | 11.31333 | -56.7567 | 8.696667 | -26.94 | -12.9667 |
| 6 | 29.99333 | -87.07 | 22.86333 | -53.1133 | 13.76333 | -24.5033 | -1.63 |
| 7 | 40.49667 | -81.3133 | 32.87667 | -48.3567 | 18.01 | -21.5733 | 8.64 |
| 8 | 49.94 | -74.7033 | 41.41 | -42.6967 | 21.47333 | -18.2467 | 17.80333 |
| 9 | 58.31 | -67.37 | 48.48667 | -36.35 | 24.17667 | -14.6333 | 25.82333 |
| 10 | 65.62333 | -59.4467 | 54.15333 | -29.56 | 26.15 | -10.8433 | 32.64333 |
| 11 | 71.87333 | -51.09 | 58.44333 | -22.5667 | 27.42667 | -6.99667 | 38.22667 |
| 12 | 77.10333 | -42.4433 | 61.43333 | -15.6233 | 28.05667 | -3.20667 | 42.54333 |
| 13 | 81.34667 | -33.64 | 63.21333 | -8.96333 | 28.08667 | 0.423333 | 45.57667 |
| 14 | 84.68 | -24.8267 | 63.91333 | -2.83333 | 27.59333 | 3.8 | 47.32667 |
| 15 | 87.2 | -16.1067 | 63.71333 | 2.523333 | 26.64667 | 6.83 | 47.79333 |
| 16 | 89.05 | -7.56667 | 62.84 | 6.85 | 25.33 | 9.453333 | 46.93333 |
| 17 | 90.45 | 0.71 | 61.61 | 9.78 | 23.72667 | 11.61 | 44.58 |

Продолжение таблицы 8

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 | , мм/с2 |
| 1 | -23.87 | -18.2267 | -12.5533 | -13.655 | -29.045 | -0.33 | -60.5 |
| 2 | -32.82 | -12.1067 | -13.47 | -5.505 | -26.855 | 5.71 | -60.23 |
| 3 | -39.5867 | -6.71333 | -13.84 | 1.395 | -24.365 | 11.695 | -59.36 |
| 4 | -44.34 | -1.92333 | -13.6867 | 7.225 | -21.545 | 17.565 | -57.895 |
| 5 | -47.2667 | 2.326667 | -13.0533 | 12.085 | -18.405 | 23.255 | -55.855 |
| 6 | -48.5667 | 6.076667 | -11.9833 | 16.055 | -14.985 | 28.715 | -53.255 |
| 7 | -48.4467 | 9.346667 | -10.5467 | 19.2 | -11.35 | 33.89 | -50.12 |
| 8 | -47.12 | 12.13 | -8.82 | 21.57 | -7.595 | 38.725 | -46.485 |
| 9 | -44.82 | 14.43333 | -6.88 | 23.215 | -3.805 | 43.17 | -42.39 |
| 10 | -41.8 | 16.25333 | -4.82 | 24.18 | -0.085 | 47.185 | -37.865 |
| 11 | -38.2867 | 17.59 | -2.72667 | 24.525 | 3.455 | 50.73 | -32.965 |
| 12 | -34.56 | 18.46333 | -0.69333 | 24.32 | 6.725 | 53.77 | -27.74 |
| 13 | -30.8667 | 18.89 | 1.203333 | 23.635 | 9.64 | 56.27 | -22.23 |
| 14 | -27.4767 | 18.91333 | 2.896667 | 22.565 | 12.14 | 58.21 | -16.505 |
| 15 | -24.6933 | 18.57333 | 4.336667 | 21.18 | 14.17 | 59.565 | -10.61 |
| 16 | -22.87 | 17.93 | 5.49 | 19.58 | 15.71 | 60.325 | -4.61 |
| 17 | -22.5733 | 17.03 | 6.34 | 17.83 | 16.755 | 60.485 | 1.435 |

Таблица 9

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , н | , н | , н | , н | , н | , н | , н |
| 1 | 0.05872005 | -63.5494645 | 0.07959 | -14.61443 | 0.03192495 | -14.65451505 | 0.10573005 |
| 2 | 0.03433995 | -63.55024495 | 0.050595 | -14.61101 | 0.01812 | -14.65422495 | 0.080835 |
| 3 | 0.01194 | -63.55258495 | 0.02517495 | -14.6100101 | 0.006190005 | -14.65499505 | 0.05845005 |
| 4 | -0.008680001 | -63.55657495 | 0.002779995 | -14.6113451 | -0.004135001 | -14.6568 | 0.03808005 |
| 5 | -0.027640005 | -63.56219995 | -0.01697 | -14.614865 | -0.013045001 | -14.65959 | 0.01945005 |
| 6 | -0.044989995 | -63.569395 | -0.034295 | -14.6203301 | -0.020644995 | -14.66324505 | 0.002445 |
| 7 | -0.060745005 | -63.57803005 | -0.04931501 | -14.627465 | -0.027015 | -14.66764005 | -0.01296 |
| 8 | -0.07491 | -63.58794505 | -0.062115 | -14.635955 | -0.032209995 | -14.67262995 | -0.026705 |
| 9 | -0.087465 | -63.598945 | -0.07273001 | -14.645475 | -0.036265005 | -14.67805005 | -0.038735 |
| 10 | -0.098434995 | -63.61082995 | -0.08123 | -14.65566 | -0.039225 | -14.68373505 | -0.048965 |
| 11 | -0.107809995 | -63.623365 | -0.087665 | -14.66615 | -0.041140005 | -14.689505 | -0.05734001 |
| 12 | -0.115654995 | -63.63633505 | -0.09215 | -14.6765651 | -0.042085005 | -14.69519 | -0.063815 |
| 13 | -0.122020005 | -63.64954 | -0.09482 | -14.686555 | -0.042130005 | -14.700635 | -0.06836501 |
| 14 | -0.12702 | -63.66275995 | -0.09587 | -14.69575 | -0.041389995 | -14.7057 | -0.07099001 |
| 15 | -0.1308 | -63.67583995 | -0.09557 | -14.703785 | -0.039970005 | -14.710245 | -0.07169 |
| 16 | -0.133575 | -63.68865 | -0.09426 | -14.710275 | -0.037995 | -14.71418 | -0.0704 |
| 17 | -0.135675 | -63.701065 | -0.092415 | -14.71467 | -0.035590005 | -14.717415 | -0.06687 |

Таблица 10

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , н | , н | , н | , н | , н | , н | , н |
| 1 | -63.664195 | 0.02734005 | -14.68117005 | 0.0068275 | -4.8854775 | 0.000165 | -4.86975 |
| 2 | -63.65077 | 0.01816005 | -14.679795 | 0.0027525 | -4.8865725 | -0.002855 | -4.869885 |
| 3 | -63.64061995 | 0.010069995 | -14.67924 | -0.0006975 | -4.8878175 | -0.0058475 | -4.87032 |
| 4 | -63.63349 | 0.002884995 | -14.67946995 | -0.0036125 | -4.8892275 | -0.0087825 | -4.8710525 |
| 5 | -63.62909995 | -0.003490001 | -14.68042005 | -0.0060425 | -4.8907975 | -0.0116275 | -4.8720725 |
| 6 | -63.62714995 | -0.009115001 | -14.68202505 | -0.0080275 | -4.8925075 | -0.0143575 | -4.8733725 |
| 7 | -63.62732995 | -0.014020001 | -14.68417995 | -0.0096 | -4.894325 | -0.016945 | -4.87494 |
| 8 | -63.62932 | -0.018195 | -14.68677 | -0.010785 | -4.8962025 | -0.0193625 | -4.8767575 |
| 9 | -63.63277 | -0.021649995 | -14.68968 | -0.0116075 | -4.8980975 | -0.021585 | -4.878805 |
| 10 | -63.6373 | -0.024379995 | -14.69277 | -0.01209 | -4.8999575 | -0.0235925 | -4.8810675 |
| 11 | -63.64256995 | -0.026385 | -14.69591 | -0.0122625 | -4.9017275 | -0.025365 | -4.8835175 |
| 12 | -63.64816 | -0.027694995 | -14.69896 | -0.01216 | -4.9033625 | -0.026885 | -4.88613 |
| 13 | -63.65369995 | -0.028335 | -14.701805 | -0.0118175 | -4.90482 | -0.028135 | -4.888885 |
| 14 | -63.65878495 | -0.028369995 | -14.704345 | -0.0112825 | -4.90607 | -0.029105 | -4.8917475 |
| 15 | -63.66296005 | -0.027859995 | -14.706505 | -0.01059 | -4.907085 | -0.0297825 | -4.894695 |
| 16 | -63.665695 | -0.026895 | -14.708235 | -0.00979 | -4.907855 | -0.0301625 | -4.897695 |
| 17 | -63.66614005 | -0.025545 | -14.70951 | -0.008915 | -4.9083775 | -0.0302425 | -4.9007175 |

|  |  |
| --- | --- |
| или | (4.12) |

Система матричных уравнений (4.12) представляется в виде системы линейных уравнений:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.13) |

который принимает вид матрицы:

, (4.14)

где:







По матричному уравнению рассчитываются проекции векторов сил реакции в кинематических парах группы :

 (4.15)

под условием .

Значения проекций сил реакции в кинематических парах V группы (1,2,3,4,5,6) исследуемого двухподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами приведены в таблице 11.

Составим матричное уравнение его равновесия для оценки проекций вектора силы реакции в шарнире А и движущего момента ведущего звена 7.

(4.16)

или

 (4.17)

Матричное уравнение (4.17) представляется в виде системы линейных уравнений:

. (4.18)

Таблица 11

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , н | , н | , н | , н | , н | , н |
| 1 | -6.967991159 | 63.93241461 | -23.3905303 | 61.26051731 | 16.34294917 | 17.28632725 |
| 2 | -13.26757888 | 60.45512261 | -23.5362756 | 57.6932481 | 10.21810172 | 17.37288446 |
| 3 | -19.78202049 | 56.84092978 | -23.2264418 | 54.2238963 | 3.419246332 | 17.22704353 |
| 4 | -26.42842323 | 53.07325981 | -22.3908453 | 50.88712961 | -4.040357974 | 16.79747526 |
| 5 | -33.13329728 | 49.1095004 | -20.9386679 | 47.69178946 | -12.17765935 | 16.03257589 |
| 6 | -39.82507804 | 44.89901995 | -18.787775 | 44.6317942 | -21.00300808 | 14.8875558 |
| 7 | -46.43658442 | 40.39207307 | -15.8498424 | 41.72310975 | -30.53742702 | 13.29642826 |
| 8 | -52.89998729 | 35.53017922 | -12.0147564 | 38.95592263 | -40.82311588 | 11.21021154 |
| 9 | -59.15395173 | 30.25590946 | -7.16536636 | 36.33625715 | -51.91585536 | 8.565127309 |
| 10 | -65.11286408 | 24.49120978 | -1.1461805 | 33.8530346 | -63.88545358 | 5.29383518 |
| 11 | -70.73180078 | 18.18684321 | 6.196819189 | 31.52640551 | -76.84095497 | 1.32658765 |
| 12 | -75.95721086 | 11.25011814 | 15.14432057 | 29.3630979 | -91.00938143 | -3.436414704 |
| 13 | -80.7316695 | 3.594828458 | 25.98286938 | 27.38520145 | -106.6197189 | -9.103817994 |
| 14 | -85.05138489 | -4.88384494 | 39.15460093 | 25.63882183 | -124.1101158 | -15.82691677 |
| 15 | -88.95132905 | -14.35142387 | 55.3280227 | 24.20037025 | -144.1837818 | -23.84800912 |
| 16 | -92.52722749 | -25.06332016 | 75.5501048 | 23.17621335 | -167.9830723 | -33.52925851 |
| 17 | -96.05610832 | -37.46797537 | 101.6631332 | 22.77543425 | -197.6268265 | -45.52873963 |

Продолжение таблицы 11

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , н | , н | , н | , н | , н | , н |
| 1 | 20.96166643 | -79.00125359 | -2.460788858 | -3.086221226 | -13.74226272 | -97.43094858 |
| 2 | 25.49788307 | -74.28265744 | 1.94348747 | -1.935184386 | -12.05984164 | -98.65483757 |
| 3 | 30.53926668 | -69.40709436 | 7.306634909 | -0.528203006 | -10.6580587 | -99.90651797 |
| 4 | 36.12953469 | -64.36822827 | 13.74282444 | 1.17570134 | -9.66511392 | -101.175364 |
| 5 | 42.36223146 | -59.10727077 | 21.43660853 | 3.244108683 | -9.249031628 | -102.4770021 |
| 6 | 49.31055849 | -53.5534578 | 30.54342852 | 5.741581449 | -9.555117935 | -103.8308197 |
| 7 | 57.08707278 | -47.63557589 | 41.26424538 | 8.755173913 | -10.76339836 | -105.2574371 |
| 8 | 65.79580282 | -41.2427863 | 53.8132564 | 12.38576628 | -13.04582552 | -106.8082703 |
| 9 | 75.56577095 | -34.24889851 | 68.43666959 | 16.76540869 | -16.59280672 | -108.5510835 |
| 10 | 86.51345298 | -26.51324519 | 85.40649748 | 22.02352445 | -21.60647889 | -110.5473871 |
| 11 | 98.78916476 | -17.86924855 | 105.027124 | 28.34666196 | -28.28215649 | -112.9134571 |
| 12 | 112.6054934 | -8.068108304 | 127.791899 | 35.99017959 | -36.88618754 | -115.8042474 |
| 13 | 128.2136633 | 3.141713376 | 154.2386627 | 45.22754983 | -47.72746134 | -119.3840568 |
| 14 | 145.9961259 | 16.12870424 | 185.1921168 | 56.47322607 | -61.19264347 | -123.9155093 |
| 15 | 166.6465013 | 31.44015543 | 222.014494 | 70.35077069 | -77.94085223 | -129.7793116 |
| 16 | 191.264448 | 49.92462011 | 266.8525478 | 87.81501346 | -98.9765605 | -137.5675399 |
| 17 | 222.0396385 | 73.09071219 | 323.7383617 | 110.5835614 | -126.2128652 | -148.3388494 |

Продолжение таблицы 11

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | , н | , н | , н | , н | , н | , н |
| 1 | -16.23721912 | -80.95052225 | 2.467616358 | -1.799256274 | -6.909271109 | 0.382950114 |
| 2 | -10.13726672 | -81.02365446 | -1.94073497 | -2.951388114 | -13.23323893 | -3.095122344 |
| 3 | -3.360796282 | -80.86766348 | -7.307332409 | -4.359614494 | -19.77008049 | -6.711655172 |
| 4 | 4.078438024 | -80.43096526 | -13.74643694 | -6.06492884 | -26.43710323 | -10.48331514 |
| 5 | 12.1971094 | -79.66167584 | -21.44265103 | -8.134906183 | -33.16093729 | -14.45269955 |
| 6 | 21.00545308 | -78.51470575 | -30.55145602 | -10.63408895 | -39.87006804 | -18.67037505 |
| 7 | 30.52446702 | -76.92375821 | -41.27384538 | -13.64949891 | -46.49732942 | -23.18595698 |
| 8 | 40.79641089 | -74.83953154 | -53.8240414 | -17.28196878 | -52.97489729 | -28.05776583 |
| 9 | 51.87712037 | -72.19789731 | -68.44827709 | -21.66350619 | -59.24141673 | -33.34303554 |
| 10 | 63.83648858 | -68.93113518 | -85.41858748 | -26.92348195 | -65.21129907 | -39.11962017 |
| 11 | 76.78361497 | -64.9691576 | -105.0393865 | -33.24838946 | -70.83961077 | -45.43652179 |
| 12 | 90.94556643 | -60.2117453 | -127.804059 | -40.89354209 | -76.07286585 | -52.38621691 |
| 13 | 106.5513539 | -54.54988196 | -154.2504802 | -50.13236983 | -80.85368951 | -60.05471154 |
| 14 | 124.0391258 | -47.83186818 | -185.2033993 | -61.37929607 | -85.17840489 | -68.54660489 |
| 15 | 144.1120918 | -39.81495093 | -222.025084 | -75.25785569 | -89.08212905 | -78.02726382 |
| 16 | 167.9126723 | -30.13643649 | -266.8623378 | -92.72286846 | -92.66080249 | -88.75197016 |
| 17 | 197.5599565 | -18.13740042 | -323.7472767 | -115.4919389 | -96.19178332 | -101.1690404 |

Проекции вектора силы реакции в шарнире *А* задаются первыми двумя уравнениями системы (4.17), а приводной момент ведущего звена 7 определяется третьим уравнением. Значения проекций векторов сил реакции в кинематических парах, а также движущего момента ведущего звена 7 рассматриваемого одноподвижного параллельного манипулятора *V* класса с двумя рабочими органами приведены в таблице 12.

Таблица 12

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *i* | , н | , н | M7*дв*, н·мм |
| 1 | -6.909106109 | -4.486799886 | 0.834657551 |
| 2 | -13.23609393 | -7.965007344 | 1.657401259 |
| 3 | -19.77592799 | -11.58197517 | 2.56139507 |
| 4 | -26.44588573 | -15.35436764 | 3.515499544 |
| 5 | -33.17256479 | -19.32477205 | 4.490552861 |
| 6 | -39.88442554 | -23.54374755 | 5.459504086 |
| 7 | -46.51427442 | -28.06089698 | 6.398497465 |
| 8 | -52.99425979 | -32.93452333 | 7.287902665 |
| 9 | -59.26300173 | -38.22184054 | 8.112857999 |
| 10 | -65.23489157 | -44.00068767 | 8.861376734 |
| 11 | -70.86497577 | -50.32003929 | 9.529022039 |
| 12 | -76.09975085 | -57.27234691 | 10.11760936 |
| 13 | -80.88182451 | -64.94359654 | 10.62903527 |
| 14 | -85.20750989 | -73.43835239 | 11.07716389 |
| 15 | -89.11191155 | -82.92195882 | 11.47757922 |
| 16 | -92.69096499 | -93.64966516 | 11.8578503 |
| 17 | -96.22202582 | -106.0697579 | 12.2587249 |

**5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ 3D МОДЕЛИ**

**5.1 Проектирование параллельного манипулятора для автоматизации штамповки металла на кулачково-винтовом прессе**

В КазНИТУ им. К. И. Сатпаева проводится научная работа по проектированию ПМ с несколькими рабочими органами под руководством профессора Байгунчекова Ж. Ж. [64-65]. Кафедра «Машиностроение» стремится внедрить и воплотить достижения изыскательных работ. Наглядным примером является построенный профессором Аскаровым Е. С., прототип нового пресса, имеющий кулачково-винтовой механизм для обработки металлических деталей давлением [66]. На рисунке 14 показан общий вид кулачково-винтового пресса. Данный пресс был успешно протестирован на кафедре и получены следующие характеристики: усилие 50-55 кН, мощность привода 1,5 кВт, ход ползуна 35 мм, частота вращения вала 120 мин-1, размеры 600х586х1650 мм. При испытаниях обрабатывалась заготовка из нержавеющей стали с толщиной 2мм и шириной 36 мм с глубиной деформации 32 мм. Для проектирования плоского ПМ были взяты геометрические параметры рабочей зоны данного пресса.



Рисунок 14 – Фото общего вида пресса

Нововведением является создание кулачкового механизма перемещающаяся площадь контакта, которого перемещается за счет вогнутостей сопряженных звеньев, направленных в одну сторону. Данная особенность понизит удельное давление и износ профилей механизма (Рисунок 15).

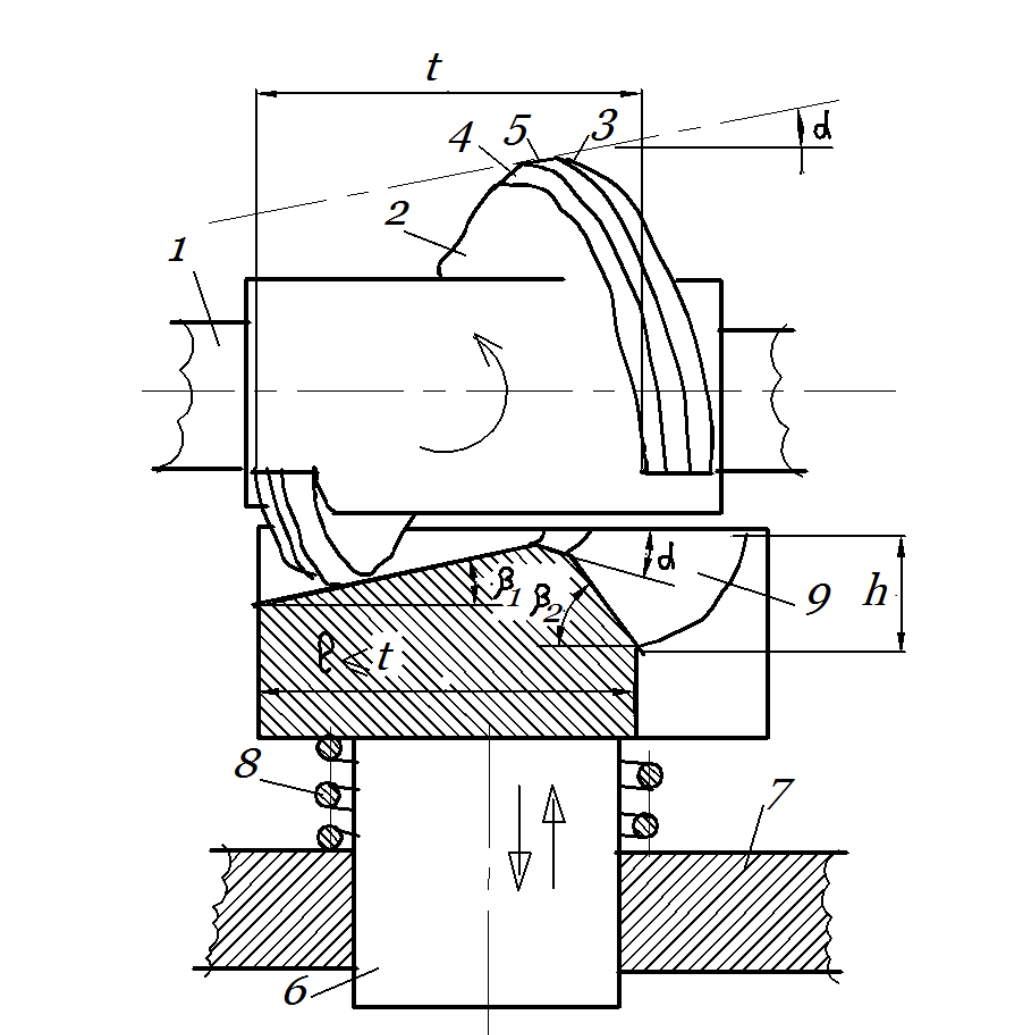


Рисунок 15 – Схема кулачково-винтового механизма.

Представленная конструкция кулачково-винтового пресса имеет ряд преимуществ перед кривошипным прессом и одними из многих являются малые размеры устройства, общий вид с размерами представлен на рисунке 16.

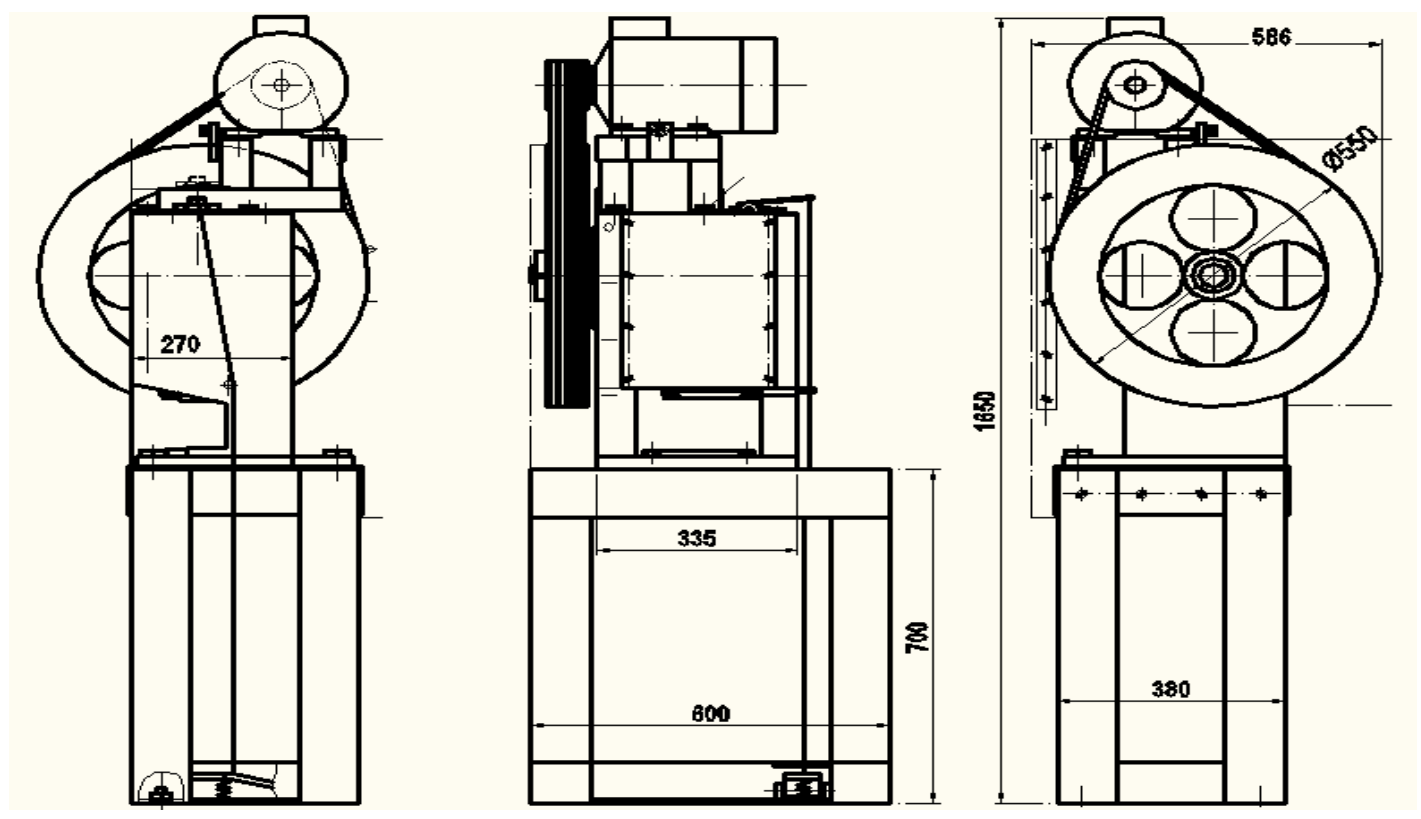
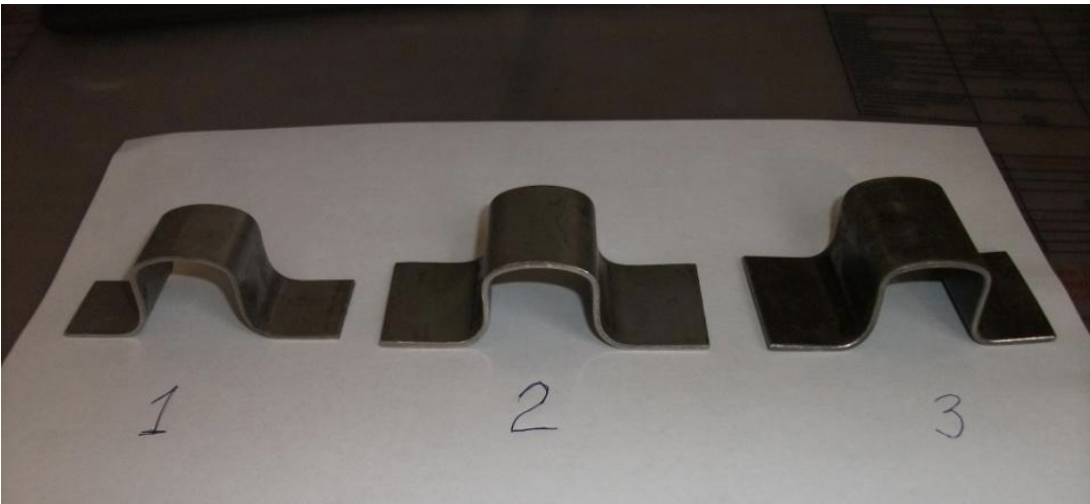


Рисунок 16 – Общий вид прототипа кулачково-винтового пресса с размерами в миллиметрах.

Параметр компактности данного прототипа наложил ограничения на рабочую зону пресса, что у оператора изделия вызывают сложности с установкой и извлечением заготовки. Размеры заготовки до и после обработки приведены на рисунке 17.

|  |  |
| --- | --- |
| а | б |

в



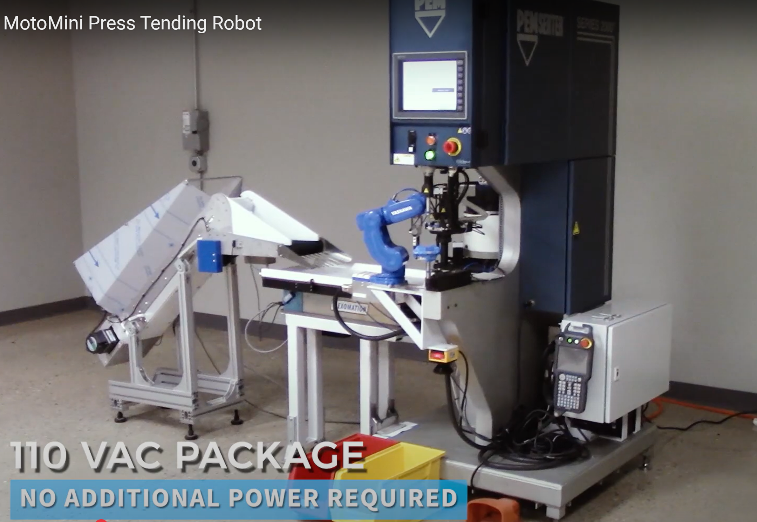
а) Размеры заготовки до обработки б) Размеры заготовки после обработки в) обработанные изделия с помощью штамповки

Рисунок 17 – Размеры заготовки до и после обработки с фотографией готового изделия.

Современные решения автоматизации данного пресса можно сделать за счет установки малого промышленного робота для перемещения легких и малых грузов. В таблице 13 приведены основные модели мировых лидеров, предлагающие данные решения.

Таблица 13 - Современные модели ПР для автоматизации кулачково-винтового пресса

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Модель | Степени подвижности | Грузоподъемность | Погрешность | Средняя наработка на отказ (MTBF) | Мощность | Масса | Стоимость, (курс 527,75 тг за 1$) |
| KUKA KR 3 AGILUS | 6 | 3 кг | ±0,02 043Cм | ~75 000 часов | 0,5 кВт | 26 кг | ~$25 000 (13193682,50 тг) |
| ABB IRB 120 | 6 | 3 кг | ±0,01 мм | >80 000 часов | 0,6 кВт | 25 кг | ~$20 000 (10554946,00 тг) |
| Fanuc LR Mate 200iD | 6 | 7 кг | ±0,03 мм | ~90 000 часов | 0,5 кВт | 25 кг | ~$30 000 (15832419,00 тг) |
| Yaskawa MotoMini | 6 | 0,5 кг | ±0,02 мм | >80 000 часов | 0,3 кВт | 7 кг | ~$15 000 (7916209,50 тг) |
| Universal Robots UR3e | 6 | 3 кг | ±0,03 мм | ~35 000 часов | 0,15 кВт | 11,2 кг | ~$23 000 (12138250 тг) |

Анализ таблицы показывает о существенных материальных затратах на покупку одного малого ПР, данные цифры варьируются от 7,9 млн. тенге до 15,8 млн. тенге. На рисунке 18 показан самый доступный манипулятор Yaskawa MotoMini, который занимается перемещением заготовок при штамповке деталей. Данный манипулятор ограничен грузоподъемностью в 500гр, что является наименьшим показателем среди остальных моделей.

а) Перемещение заготовок для штамповки б) Установка манипулятора.

Рисунок 18 – Перемещение заготовки с помощью ПР Yaskawa MotoMini.

Все приведенные манипуляторы в таблице 13 имеют шесть степеней подвижности, что повышает сложность управления данными изделиями и стоимость, т.к. цена за один сервопривод составляет от $1-5 тыс. долларов в официальных онлайн магазинов данных производителей, что в переводе на тенге составит 527 750 и 2 638 750тг., соответственно. Учитывая вышеприведенную информацию, было принято решение о проектировании параллельного манипулятора с двумя рабочими органами имеющий наименьшее количество степеней подвижности.

Для операции перемещения предлагается использовать плоский ПМ с двумя рабочими органами. В связи с тем, что ПМ обычно характеризуются высокой скоростью, жесткостью и повторяемостью [67-69]. Перемещение заготовки показано на рисунке 19.

|  |  |
| --- | --- |
| а | б |

а) Подача заготовки в рабочую область пресса б) Перемещение обработанной детали в накопитель.

Рисунок 19 – Перемещение заготовки с помощью ПМ при обработке кулачковым прессом.

Обычные промышленные роботы характеризуются последовательной кинематической структурой, но параллельные механизмы могут обеспечить существенное увеличение кинематических и динамических характеристик, особенно с точки зрения жесткости, скорости и повторяемости [70-72]. Под действием рабочих сил был произведен анализ напряжено-деформированного состояния манипулятора с выводом основных результатов на рисунке 20.

Изображение выглядит как текст, диаграмма, снимок экрана, карта

Автоматически созданное описаниеа)

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, диаграмма, линия

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.б)

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, диаграмма, дизайн

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.в)

а) перемещение, б) коэффициент запаса, в) напряжение

Рисунок 20 – Результаты напряжённо-деформированного состояния манипулятора

При расчетах использовалась сталь А36 (ASTM), которая близка к показателям сталей Ст3 и Ст5. К рабочим органам приложена сила значением 10Н (1 кг), к каждому. Коэффициент запаса мин = 7,76

Для исследования использовалась программа Fusion, SolidWorks, которые являются инструментами для моделирования и анализа различных механических систем. Программа SolidWorks предоставляет широкие возможности для создания трехмерных моделей, а также для проведения различных инженерных расчетов.

В то время как в последовательной архитектуре инструмент или рабочий орган, прикреплен к неподвижному основанию машины посредством последовательности частей, соединенных приводными шарнирами, т. е. линейными или вращательными двигателями, то в параллельном манипуляторе имеются множество закрытых кинематических цепей, обычно называемых ветвями параллельного механизма, состоящих как из приводимых в действие, так и из пассивных шарниров, соединяющих инструменты с основанием [73].

Такое расположение дает параллельным манипуляторам два ключевых преимущества. Кинематическая архитектура с замкнутым контуром позволяет распределять полезную нагрузку от рабочего органа между цепями, что приводит к более высокой производительности, уменьшение деформации звеньев от изгиба под нагрузкой. В этой работе мы стремимся проанализировать применение плоского параллельного манипулятора с двумя рабочими органами для выполнения задачи перемещения заготовки кулачково-винтового пресса. Результат синтеза приведен в следующем пункте данной работе.

**5.2 Численные примеры кинематического синтеза двухподвижного параллельного манипулятора III класса и одноподвижного параллельного манипулятора V класса с двумя рабочими органами**

В таблице 14 заданы *N*=17 дискретных значениях координат , и , рабочих точек и , а также углов поворота и входных звеньев 1 и 3 двухподвижного ПМ III класса с двумя РО в абсолютной системе координат *OXY* (рисунок 8).

Согласно методам, кинематический синтез двухпожвижного ПМ III класса с двумя РО состоит из кинематического синтеза двух антропоморфных манипуляторов и , а также бинарных звеньев *EF* и *GH* вида **ВВ**.

Полученные значения параметров синтеза:

1) антропоморфного манипулятора : мм, мм, мм, мм, мм;

2) антропоморфного манипулятора : мм, мм, мм, мм, мм;

3) бинарного звена *EF* вида **ВВ**: мм, мм, мм, мм, мм;

4) бинарного звена GH вида ВВ: мм, мм, мм, мм, мм;

Для кинематического синтеза одноподвижного ПМ V класса с двумя РО (рисунок 1.9) необходимо дополнительно определить параметры синтеза бинарного звена *IK* вида **ВВ** соединяющего звенья 3 и 6 двухподвижного ПМ III класса с двумя РО, согласно методам.

Полученные значения параметров синтеза бинарного звена *IK* вида **ВВ**: мм, мм, мм, мм, мм.

Таблица 14 – Дискретные значения координат рабочих точек и

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *i* | *ХP*1, мм | *YP*1, мм | *ХP*2, мм | *YP2*, мм |  |  |
| 1 | 290,0 | 450,0 | 595,0 | 480,0 | 60,0 | 60,0 |
| 2 | 280,3125 | 443,4375 | 575,9375 | 478,1250 | 65,73 | 61,875 |
| 3 | 270,6250 | 436,8750 | 556,8750 | 476,2500 | 71,46 | 63,750 |
| 4 | 260,9375 | 430,3125 | 537,8125 | 474,3750 | 77,19 | 65,625 |
| 5 | 251,2500 | 423,7500 | 518,7500 | 472,5000 | 82,91 | 67,500 |
| 6 | 241,5625 | 417,1875 | 499,6875 | 470,6250 | 88,64 | 69,375 |
| 7 | 231,8750 | 410,6250 | 480,6250 | 468,7500 | 94,37 | 71,250 |
| 8 | 222,1875 | 404,0625 | 461,5625 | 466,8750 | 100,10 | 73,125 |
| 9 | 212,5000 | 397,5000 | 442,5000 | 465,0 | 105,83 | 75,0 |
| 10 | 202,8125 | 390,9375 | 423,4375 | 463,1250 | 111,56 | 76,875 |
| 11 | 193,1250 | 384,3750 | 404,3750 | 461,2500 | 117,29 | 78,750 |
| 12 | 183,4375 | 377,8125 | 385,3125 | 459,3750 | 123,02 | 80,625 |
| 13 | 173,7500 | 371,2500 | 366,2500 | 457,5000 | 128,75 | 82,500 |
| 14 | 164,0625 | 364,6875 | 347,1875 | 455,6250 | 134,48 | 84,375 |
| 15 | 154,3750 | 358,1250 | 328,1250 | 453,7500 | 140,21 | 86,250 |
| 16 | 144,6875 | 351,5625 | 309,0625 | 451,8750 | 145,94 | 88,125 |
| 17 | 135,0 | 345,0 | 290,0 | 450,0 | 151,67 | 90,0 |

Синтезированный одноподвижный ПМ *V* класса с двумя РО воспроизводит дискретные значения координат , и , двух рабочих точек и при заданных значениях угла поворота одного входного звена 1. Данное решение может применяться и для других областей машиностроения, к примеру машиностроительная полиграфия.

**5.3 Проектирование параллельного манипулятора для автоматизации тигельного пресса**

Задача по перемещению объектов с помощью двух рабочих органов актуальна и в другой отрасли машиностроения, такой как полиграфическое тиснение бумаги или картона с помощью тигельного пресса. Наглядным примером автоматизации при данной операции является решения компании Сароглия.

С 1911 года на предприятии Сароглия началось производство итальянских тигельных прессов. 1954 год стал успешным периодом для производства Saroglia Ultra Balilla, с максимальной скоростью обработки до 4000 листов в час, благодаря установке манипулятора с двумя рабочими органами. Конструкция этого механизма сложно-рычажная и используется в последней модели Saroglia Fub-Gold. Технические характеристики этой модели производили 2500 листов в час на максимальной скорости и в формате 750х300 мм, а также позволяли работать с бумагой толщиной до 5 мм, что в предыдущей модели было возможно до 1,5 мм, посмотреть SarogliaUltraBalilla можно в Рисунок 21.

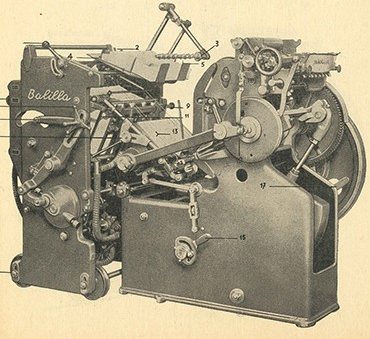


Рисунок 21– SarogliaUltraBalilla

В 1980-х годах Saroglia и итальянские компании Rabolini объединились для производства специальных больших тигельных прессов (см. Рисунок 22).

Изображение выглядит как машина, мельник

Автоматически созданное описание

Рисунок 22 – SarogliaFub-Gold

На рис. 23 показаны два положения верхнего держателя и тигельного пресса, движущихся вместе.

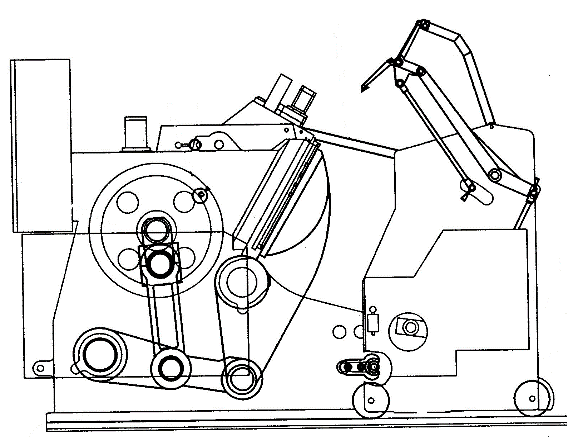
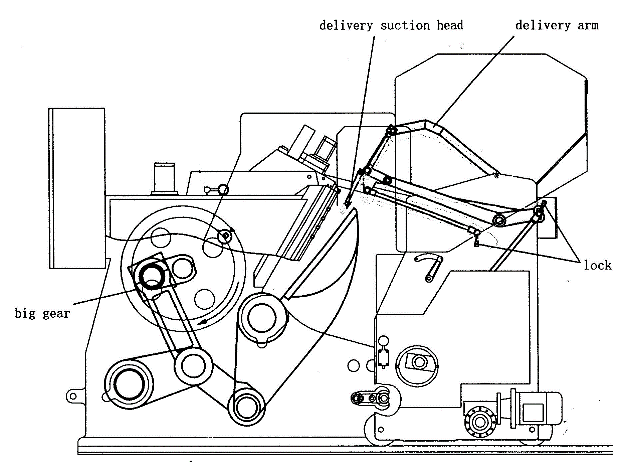


Рисунок 23 – Совместное движение тигельного пресса и транспортера модели Saroglia Fub-Gold

Для исследования манипулятора была построена математическая модель в программе Solidworks, которая помогла проанализировать параметры скоростей и ускорений.

Для исследования использовалась программа SolidWorks, которая является мощным инструментом моделирования и анализа различных механических систем. Программа SolidWorks предоставляет широкие возможности для создания трехмерных моделей, а также для проведения различных инженерных расчетов (рис. 24).

Изображение выглядит как Детское искусство, искусство

Автоматически созданное описание Изображение выглядит как зарисовка, диаграмма, рисунок, линия

Автоматически созданное описание

Рисунок 24 – Создание 3D-модели в программе SolidWorks

Создание трехмерной модели: на основе их структурных схем и кинематических данных, расположенных на рисунках с 25 по 28, разработаны трехмерные модели параллельных манипуляторов с двумя рабочими органами.

Изображение выглядит как снимок экрана, диаграмма, дизайн

Автоматически созданное описаниеИзображение выглядит как дизайн

Автоматически созданное описание со средним доверительным уровнем

Рисунок 25 – Настройка датчиков вращения и линейного перемещения

Кинематический анализ: SolidWorks позволил провести детальный кинематический анализ манипуляторов, определяя их движение, положение элементов и траекторию движения рабочих органов.

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, компьютер, дизайн

Автоматически созданное описание

Рисунок 26 – Построение диаграммы линейной скорости рабочего органа

Изображение выглядит как текст, линия, снимок экрана, График

Автоматически созданное описание

Рисунок 27 – Построение диаграммы линейного ускорения рабочего органа

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, дизайн

Автоматически созданное описание

Рисунок 28 – Диаграммы угловых скоростей и ускорений рабочего органа

Моделирование и визуализация результатов: SolidWorks использовался для создания визуализаций, анимации и интерактивных презентаций, демонстрирующих работу параллельных манипуляторов и их характеристики. Программа SolidWorks предоставила надежный и удобный инструмент исследования параллельных манипуляторов, позволяющий анализировать, визуализировать и оценивать их характеристики и работу в различных условиях, что способствовало успешной реализации задач и целей исследования.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация посвящена проектированию и исследованию параллельных манипуляторов с двумя рабочими органами с акцентом на их структурные схемы, кинематику и практическое применение. Параллельные манипуляторы представляют собой значительный прогресс в машиностроении благодаря своей точности, скорости и универсальности в различных промышленных применениях.

Основной целью данного исследования было исследование конструкции параллельных манипуляторов промышленного назначения, требующих точной и быстрой обработки заготовок. Были найдены инновационные решения для упрощения сложных операций по обработке материалов, таких как штамповка металла или бумаги, с целью усовершенствования производственных процессов, автоматизации операций и улучшения условий труда операторов.

Для достижения целей исследования был выполнен структурно-кинематический синтез механизма, кинематический анализ манипуляторов, кинетостатический анализ манипуляторов, моделирование и изготовление 3D-модели.

Научная новизна диссертации заключается в предложении методики управления роботами параллельной структуры (МРПС), включающей приводы с замкнутыми кинематическими цепями.

Практическая значимость данной работы заключается в создании параллельных манипуляторов с повышенной грузоподъемностью, точностью и упрощенной системой управления. Эти характеристики, обусловленные простой конструкцией привода, способствуют созданию надежных и экономичных технологий автоматизации, применимых в различных областях машиностроения. Достоверность научных правил, выводов и результатов исследований была подтверждена посредством сравнительного анализа, численных измерений и 3D-моделирования, представленных в виде рисунков в SolidWorks, Fusion, таблиц и графиков. Кроме того, в работе был использован и применен программный код на языке программирования VBA в Excel. Более того, результаты исследований опубликованы в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, в материалах международных конференций, в отечественных журналах и патентах, что подтверждает достоверность и значимость результатов диссертации в научном сообществе.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

[1] S.H. Kim, E. Nam, T.I. Ha, S.H. Hwang, J.H. Lee, S.H. Park, B.K. Min, Robotic machining: a review of recent progress, Int. J. Precis. Eng. Manuf. 20 (2019) 1629–1642.

[2] J. Wen, F. Xie, X. Liu, Y. Yue, Evolution and development trend prospect of metal milling equipment, Chin. J. Mech. Eng. 36 (1) (2023) 1–15.

[3] M. Weck, D. Staimer, Parallel kinematic machine tools–current state and future potentials, CIRP Annals 51 (2) (2002) 671–683.

[4] D. Zhang, Parallel Robotic Machine Tools, Springer Science & Business Media, 2009.

[5] Z. Pandilov, V. Dukovski, Parallel kinematics machine tools: overview-from history to the future, Ann. Facult. Eng. Hunedoara 10 (2) (2012) 111.

[6] J.P. Merlet, Parallel Robots, vol. 128, Springer Science & Business Media, 2006.

[7] A. James, B. Roger, D. Nicholas, The NIST robocrane, J. Rob. Syst. 10 (5) (1993) 709–724.

[8] D. Chablat, P. Wenger, Architecture optimization of a 3-DOF translational parallel mechanism for machining applications, the Orthoglide, IEEE Trans. Robot. Autom. 19 (3) (2003) 403–410.

[9] Z.M. Bi, Y. Jin, Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine, Robot. Comput. Integrated Manuf. 27 (1) (2011) 186–193.

[10] C. Baethge, S. Goldbeck-Wood, S. Mertens, SANRA—a scale for the quality assessment of narrative review articles, Res. Integr. Peer Rev. 4 (1) (2019) 1–7.

[11] A.P. Siddaway, A.M. Wood, L.V. Hedges, How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses, Annu. Rev. Psychol. 70 (2019) 747–770.

[12] Fu K.S., Gonzales R.C., Lee C.S. G.. Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence.-McGraw-Hill, New York, 1987.-480 p.

[13] Marco Ceccarelli. Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, 2004.-310p.

[14] Jorge Angeles. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems.-Springer, 2014, - 589p.

[15] Lung - Wen Tsai. Robot Analysis.-John Wiley & Sons, Inc. New York /Singapore / Toronto, 1999.-505 p.

[16] Механика промышленных роботов. Под редакцией К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Том 1. Кинематика и динамика. - М.: «Высшая школа», 1988. -304 с.

[17] Jean - Pierre Merlet. Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht / Boston / London, 2000.-355 p.

[18] M. Kaneko, M. Higashimori. Where future robots should go and should not go//RoManSy 18 Robot Design, Dynamics and Control. Proc. of the 18th CISM-IFToMM Symposium.-Springer Wien New York, 2010. – P.3-18.

[19] Ceccarelli M.A new 3D.O.F. Spatial Parallel Manipulator//J. Mechanism and Machine Theory, 32 (8), 1997.-P. 896-902.

[20] Clavel R. DELTA, A Fast Robot with Parallel Geometry//Proc. of 18th Int. Symp. On Industrial Robot. Lausanne, April 26-28, 1988.-P. 91-100.

[21] Gosselin C. Determination of the Workspace of 6 – DOF parallel Manipulators//ASME J.of Mechanical Design, 112 (3), 1990.- P. 331-336.

[22] Innocenti C. and Parenti - Castelli V. Closed – Form Direct Position Analysis of a 5 – 5 Parallel Mechanism// ASME J. of Mechanical Design, 115 (3), 1993- P. 515 -521.

[23] Nakashima K. et. al. Development of the Parallel Manipulator//Proc. of IMACS/SICE Int. Symp. On Robotics, Mechatronics, and Manufacturing Systems. Kobe, September 16-20, 1992. - P. 419-424.

[24] Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms.-Springer, 2007.-386p.

[25] Lee C. C., Herve J. Cartesian Parallel Manipulators with Pseudoplanar Limbs//ASME J. Mech. Des., 129, 2007.-P.1256-1264.

[26] Zh. Zh. Baigunchekov, S. U. Joldasbekov. Modular Synthesis of Spatial Manipulating Devices of High Classes. Proceedings of the Twelfth International Conference on CAD/CAM Robotics and Factoriеs of the Future. London, Еngland, 1996. – Р.685-690.

[27] Baigunchekov Zh., Raj Gill, Anthony White, Nurakhmetov B.K., Baigunchekov N.Zh. The Basis of Structural and Parametric Synthesis of The Parallel Manipulators with Functionally Independent Drives (Part II)// Proceedings of the 16-th International Conference on Gearing, Transmissions and Mechanical Systems. 3-6 July, 2000, The Nottingham Trent University, UK. – Р.11-19.

[28] Baigunchekov Zh., Nurakhmetov B.K, Absadykov B.N., Baigunchekov N.Zh., Kondybaev E.S. Kinematics of the Parallel Manipulators with Functionally Independent Drives (Part II)// Proceedings of the XI World IFToMM Congress. 1-3 April, 2004, Tianjin, China, Vol. 4. – Р.1651-1655.

[29] Baigunchekov Zh., Nurakhmetov B.K, Absadykov B.N. Kinematic Synthesis of Positioning Parallel Manipulator with Functionally Independent Drives by Quadratic Approximation. Proceedings of the International Workshop on Computational Kinematics CK2005, May 4-6, 2005, Cassino, Italy.-P.350-362.

[30] Baigunchekov Zh., Izmambetov M.B. Singularity Analysis of the New Parallel Manipulator with 6 Degree-of-Freedom// Proceeding of the World Congress on Engineering WCE2010. London, UK, 30 June- 2 July, 2010. – Р.1472-1477.

[31] Baigunchekov Zh., Izmambetov M.B. The Second Type of Singularity Analysis of the New Parallel Manipulator with 6 Degree-of-Freedom. ROMANSY 18 Robot Design, Dynamics and Control. CISM Courses and Lectures, vol.524. Springer Wien New York, 2010. – Р.481-488.

[32] Baigunchekov Zh. Zh., Nurakhmetov B. K., Izmambetov M. B., Sartaev K. Z.Structural Syntheiss and Kinematic Analysis of the Parallel Manipulator with Cylindrical Joints// Proceeding of the International Symposium on Robotics and Mechatronics ISRM 2011. Shanghai, 2011, China. – Р.161-168.

[33] Baigunchekov Zh., Izmambetov M. Syngularity Analysis of a Parallel Manipulator with Cylindrical Joints// Proceedings of the World Congress on Engineering WCE2012. London, U.K., 4-6 July, 2012. – Р. 2017-2021.

[34] Baigunchekov Zh., Djoldasbekov S., Izmambetov M., Baigunchekov N. Inverse Kinematics of a Parallel Manipulator with Cylindrical Joints// Proceedings of the 2nd IFToMM Asian Conference on Mechanism and Machine Science. Asian-MMS2012. November 7-10, 2012, Tokyo, Japan. – Р.80-88.

[35] Baigunchekov Zh., Izmambetov M., Baigunchekov N. Kinematics of a Spatial RCCC Parallel Manipulator// Proceedings of the World Congress on Engineering WCE2013. London, U.K., 3-5 July, 2013. –P. 2146-2150.

[36] Baigunchekov Zh., Izmambetov M., Baigunchekov T. Structural and Kinematic Synthesis of a Planar Parallel Mechanism with Two Rectilinear Moving End-Effectors. Proceedings of 2014 Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulator. Tianjin, China, 2014.-P. 215-222.

[37] Baigunchekov Zh., Izmambetov M., Baigunchekov T. Kinematic Analysis of a Planar Parallel Mechanism with Two Rectilinear Moving End-Effectors. Proceedings of the Third IFTOMM Asian MMS Conference. Tianjin, China, 2014. - P. 305-312.

[38] Baigunchekov Zh., Utenov M., Baigunchekov T. Structuctural and Dimensional Synthesis of Parallel Manipulator with Two End-Effectors. Robotics and Mechatronics. Vol.37, springer, 2015.-P.15-23.

[39] Baigunchekov Zh., Ibraev S., Naurushev B., Izmambetov M., Baigunchekov T. Parallel Manipulators of a Class RoboMech. Mechanism and Machine Science. Springer, 2016.-P.547-557.

[40] Z M Chen, X C Chen, M Gao, et al. Motion characteristics analysis of a novel spherical two-degree-of-freedom parallel mechanism. *Chinese Journal of Mechanical Engineering,* 2022, 35: 29.

[41] Y B Li, Z S Wang, C Q Chen, et al. Dynamic accuracy analysis of a 5PSS/UPU parallel mechanism based on rigid-flexible coupled modeling. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 35: 33.

[42] D. Chablat , P. Wenger , Architecture optimization of a 3-DOF translational parallel mechanism for machining applications, the orthoglide, IEEE Trans. Robot. Autom. 19 (3) (2003) 403–410 .

[43] X.J. Liu , J. Jay , J. Kim , A three translational DOFs parallel cube-manipulator, Robotica 21 (6) (2003) 645–653 .

[44] M. Carricato , V. Parenti-Castelli , Kinematics of a family of translational parallel mechanisms with three 4-DOF legs and rotary actuators, J. Robot. Syst. 20 (7) (2003) 373–389 .

[45] L.W. Tsai , S. Joshi , Kinematics and optimization of a spatial 3-UPU parallel manipulator, ASME J. Mech. Des. 122 (4) (20 0 0) 439–446 .

[46] Q. Jin , T.L. Yang , Theory for topology synthesis of parallel manipulators and its application to three dimension-translation parallel manipulators, ASME J. Mech. Des. 126 (4) (2004) 625–639 .

[47] X. Kong , C.M. Gosselin , Type synthesis of 3-DOF translational parallel manipulators based on screw theory, ASME J. Mech. Des. 126 (1) (2004) 83–92 .

[48] X. Kong , C.M. Gosselin , Type synthesis of 3-DOF spherical parallel manipulators based on screw theory, ASME J. Mech. Des. 126 (1) (2004) 101–108 .

[49] R.D. Gregorio , A new family of spherical parallel manipulators, Robotica 20 (4) (2002) 353–358 .

[50] T.A. Hess-Coelho , Topological synthesis of a parallel wrist mechanism, ASME J. Mech. Des. 128 (1) (2006) 230–235 .

[51] X.J. Liu , J. Wang , F. Gao , L.P. Wang , On the analysis of a new spatial three degrees of freedom parallel manipulator, IEEE Trans. Robot. Autom. 17 (6) (2001) 959–968 .

[52] S. Amine , O. Mokhiamar , S. Caro , Classification of 3T1R parallel manipulators based on their wrench graph, ASME J. Mech. Robot. 9 (1) (2017) 011003 .

[53] Y. Yang , W. Zhang , H. Pu , Y. Peng , A class of symmetrical 3T, 3T-1R, and 3R mechanisms with parallel linear motion elements, ASME J. Mech. Robot. 10 (5) (2018) 051016 .

[54] M.T. Masouleh , C. Gosselin , M. Husty , D.R. Walter , Forward kinematic problem of 5-RPUR parallel mechanisms (3T2R) with identical limb structures, Mech. Mach. Theory 46 (7) (2011) 945–959 .

[55] X. Jin , Y. Fang , H. Qu , S. Guo , A class of novel 2T2R and 3T2R parallel mechanisms with large decoupled output rotational angles, Mech. Mach. Theory 114 (2017) 156–169 .

[56] R. Neugebauer, F. Wieland, M. Schwaar, C. Hochmuth, Experiences with hexapod-based machine tool, in: Parallel Kinematic Machines: Theoretical Aspects and Industrial Requirements, Springer London, London, 1999, pp. 313–326.

[57] H. Tschaetsch, Metal Forming Practise: Processes—Machines—Tools, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006.

[58] M. Honegger, A. Codourey, E. Burdet, Adaptive control of the hexaglide, a 6 dof parallel manipulator, in: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, IEEE, 1997, April, pp. 543–548.

[59] D. Wang, R. Fan, W. Chen, Stiffness analysis of a hexaglide parallel loading mechanism, Mech. Mach. Theor. 70 (2013) 454–473.

[60] J.D. Barnfather, M.J. Goodfellow, T. Abram, Positional capability of a hexapod robot for machining applications, Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol. 89 (2017) 1103–1111.

[61] D.A. Axinte, J.M. Allen, R. Anderson, I. Dane, L. Uriarte, A. Olara, Free-leg Hexapod: a novel approach of using parallel kinematic platforms for developing miniature machine tools for special purpose operations, CIRP Ann. 60 (1) (2011) 395–398.

[62] A. Rushworth, S. Cobos-Guzman, D. Axinte, M. Raffles, Pre-gait analysis using optimal parameters for a walking machine tool based on a free-leg hexapod structure, Robot. Autonom. Syst. 70 (2015) 36–51.

[63] J.I. Camacho-Arreguin, M. Wang, M. Russo, X. Dong, D. Axinte, Novel reconfigurable walking machine tool enables symmetric and nonsymmetric walking configurations, IEEE ASME Trans. Mechatron. 27 (6) (2022) 5495–5506.

[64] Zhumadil Baigunchekov et.al. Synthesis of Reconfigurable Positioning Parallel Manipulator of a Class RoboMech. Proc. 4th IEEE/IFToMM Int.Conf. on Reconfigurable Mechanisms & Robots, Delft, The Netherlands, 20-22 June 2018, 6p.

[65] Zhumadil Baigunchekov et.al. Synthesis of Cartesian Manipulator of a Class RoboMech. Mechanisms and Machine Science. Vol. 66, Springer, 2018, pp. 69-76.

[66] Erlan Askarov et.al. New type cam-screw mechanical press. 17 International Scientific Conference- Engineering for rural development, Latvia, Jelgava, 24.05.2017, pp. 36–41.

[67] M. Russo, Measuring performance: metrics for manipulator design, control, and optimization, Robotics 12 (1) (2022) 4.

[68] Aboulissane, B.; El Bakkali, L.; El Bahaoui, J. Workspace analysis and optimization of the parallel robots based on computer-aided design approach. Facta Univ. Ser. Mech. Eng. 2020, 18, 079–089.

[69] Aboulissane, B.; El Haiek, D.; El Bakkali, L.; El Bahaoui, J. On the workspace optimization of parallel robots based on CAD approach. Procedia Manuf. 2019, 32, 1085–1092.

[70] Zhang, H.; Tang, J.; Gao, Q.; Cui, G.; Shi, K.; Yao. Multi-objective optimization of a redundantly actuated parallel robot mechanism for special machining. Mech. Sci. 2022, 13, 123–136.

[71] Abdul Hafez A H, Mithun P, Anurag V V, Shah S V, Madhava, Krishna K. Reactionless visual servoing of a multi-arm space robot combined with other manipulation tasks. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 91: 1–10

[72] Wu Y H, Yu Z C, Li C Y, He M J, Hua B, Chen Z M. Reinforcement learning in dual-arm trajectory planning for a freefloating space robot. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105657

[73] Yan L, Xu W F, Hu Z H, Liang B. Multi-objective configuration optimization for coordinated capture of dual-arm space robot. Acta Astronautica, 2020, 167: 189–200

**Приложение А**

Программа решения задачи.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Sub A()

Dim K As Integer, p As Integer, N As Integer, i As Long, Z As Long, ZZ As Integer, MM As Integer, R As Integer, imin As Integer

Dim M\_0 As Long, M\_end As Long, M As Long, Alpt\_0 As Long, Alpt\_end As Long, Alpt As Long

Dim G\_l(4) As Double, G\_r(4) As Double, T(4) As Double, Koord\_loc(4) As Double, C\_L(4) As Double, C\_R(4) As Double

Dim xK\_loc As Double, yK\_loc As Double, xL\_loc As Double, yL\_loc As Double

Dim Rmax As Double, Crit1 As Double, , Crit3 As Double, C3\_proof As Double

Dim KLmax As Double, KLmin As Double

Call TableNom

Set Task = Worksheets("Task")

Sheets("Task").Select

Alpt\_0 = Task.Cells(2, 2)

Alpt\_end = Task.Cells(2, 3)

For K = 1 To 4

G\_l(K) = Cells(8, 1 + K)

G\_r(K) = Cells(16, 1 + K)

Task.Cells(13, K + 7).Value = G\_l(K)

Task.Cells(14, K + 7).Value = G\_r(K)

C\_L(K) = Cells(2, 7 + K)

C\_R(K) = Cells(4, 7 + K)

Task.Cells(15, K + 15).)

Task.Cells(16, K + 15).

Next K

i\_write = 1

For i = Alpt\_0 To Alpt\_end

Alpt = i

N = 4

Call LPtau(Alpt, N, T())

xK\_loc = G\_l(1) + (G\_r(1) - G\_l(1)) \* T(1)

yK\_loc = G\_l(2) + (G\_r(2) - G\_l(2)) \* T(2)

xL\_loc = G\_l(3) + (G\_r(3) - G\_l(3)) \* T(3)

yL\_loc = G\_l(4) + (G\_r(4) - G\_l(4)) \* T(4)

Call pos(xK\_loc, yK\_loc, xL\_loc, yL\_loc, Crit1, Crit2, Crit3, KLmax, KLmin, C3\_proof)

**Продолжение приложения A**

Set Tab\_isp = Worksheets("Табл исп")

Sheets("Табл исп").Select

If C\_L(1) < Crit1 And Crit1 < C\_R(1) And C\_L(2) < Crit2 And Crit2 < C\_R(2) And C\_L(3) < Crit3 And Crit3 < C\_R(3) Then

i\_write = i\_write + 1

Tab\_isp.Cells(i\_write, 1).Value = Alpt

Tab\_isp.Cells(i\_write, 2).Value = xK\_loc

Tab\_isp.Cells(i\_write, 3).Value = yK\_loc

Tab\_isp.Cells(i\_write, 4).Value = xL\_loc

Tab\_isp.Cells(i\_write, 5).Value = yL\_loc

Tab\_isp.Cells(i\_write, 6).Value = Crit

Tab\_isp.Cells(i\_write, 7).Value = Crit

Tab\_isp.Cells(i\_write, 8).Value = Crit

Tab\_isp.Cells(i\_write, 9).Value = KLmin

Tab\_isp.Cells(i\_write, 10).Value = KLmax

Tab\_isp.Cells(i\_write, 11).Value = C3\_proof

End If

Next i

End Sub

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Sub pos(xK\_loc As Double, yK\_loc As Double, xL\_loc As Double, yL\_loc As Double, Crit1 As Double, Crit2 As Double, Crit3 As Double, KLmax As Double, KLmin As Double, C3\_proof As Double)

N = 24

W = 44

Dim i, J, I1, i\_lpt, K, kk, jj As Integer

Dim Pi1 As Double

Dim FX1, FY1, FX2, FY2, FX3, FY3, FX4, FY4, FX5, FY5, FX6, FY6, FX7, FY7, FX8, FY8 As Double

Dim XB1, YB1, XB, YB, XC, YC, XC1, YC1, XP, YP, XD1, YD1, XA1, YA1, XA, YA, XP1, YP1, XD, YD As Double

Dim XK, YK, XL, YL As Double

Dim XS1, YS1, XS2, YS2, XS3, YS3, XS4, YS4, XS5, YS5, XS6, YS6, XS7, YS7, XS8, YS8 As Double

Dim uz\_CD, uz\_A1P, Co\_1, Si\_1, Co\_7, Si\_7 As Double ''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

Dim A() As Double

Dim F() As Double

Dim R() As Double

ReDim A(1 To N, 1 To N), F(1 To N), R(1 To N)

ReDim A1(1 To N, 1 To N) As Double

ReDim F1(1 To N) As Double

Dim Rm(24) As Double

Dim Rmax As Double ', KLmax As Double, KLmin As Double

**Продолжение приложения A**

Dim blnMowSol As Boolean

Dim KL(44) As Double

Dim znak, del\_kl1, del\_kl2 As Double

'ПРОЕКЦИИ СИЛ

FX1 = 0#

FY1 = -9.8 \* 8.242991

FX2 = 0#

FY2 = -9.8 \* 35.71148

FX3 = 0#

FY3 = -9.8 \* 13.79054

FX4 = 0#

FY4 = -9.8 \* 8.243346

FX5 = 0#

FY5 = -9.8 \* 35.71194

FX6 = 0#

FY6 = -9.8 \* 13.79082

FX7 = 0#

FY7 = -9.8 \* 517.53938

FX8 = 0#

FY8 = -9.8 \* 22.9

For I1 = 1 To W

Sheets("Исходные данные").Select

XB1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 1).Value

YB1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 2).Value

XB = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 3).Value

YB = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 4).Value

XC = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 5).Value

YC = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 6).Value

XC1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 7).Value

YC1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 8).Value

XP = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 9).Value

YP = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 10).Value

XD1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 11).Value

YD1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 12).Value

XA1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 13).Value

YA1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 14).Value

XA = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 15).Value

YA = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 18).Value

XP1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 16).Value

YP1 = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 19).Value

XD = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 17).Value

YD = 0.01 \* Cells(I1 + 1, 20).Value

'''''

XS1 = (XA + XB) / 2#

YS1 = (YA + YB) / 2#

XS2 = (XB + XC + XP) / 3#

**Продолжение приложения A**

YS2 = (YB + YC + YP) / 3#

XS7 = (XD1 + XA1 + XP) / 3#

YS7 = (YD1 + YA1 + YP) / 3#

XS4 = (XB1 + XA1) / 2#

YS4 = (YB1 + YA1) / 2#

XS6 = (XD1 + XC1) / 2#

YS6 = (YD1 + YC1) / 2#

XS5 = (XC1 + XB1 + XP1) / 3#

YS5 = (YC1 + YB1 + YP1) / 3#

uz\_CD = Sqr((XD - XC) \* (XD - XC) + (YD - YC) \* (YD - YC))

uz\_A1P = Sqr((XP - XA1) \* (XP - XA1) + (YP - YA1) \* (YP - YA1))

Co\_1 = (XC - XD) / uz\_CD

Si\_1 = (YC - YD) / uz\_CD

XK = XD + xK\_loc \* Co\_1 - yK\_loc \* Si\_1

YK = YD + xK\_loc \* Si\_1 + yK\_loc \* Co\_1

Co\_7 = (XP - XA1) / uz\_A1P

Si\_7 = (YP - YA1) / uz\_A1P

XL = XA1 + xL\_loc \* Co\_7 - yL\_loc \* Si\_7

YL = YA1 + xL\_loc \* Si\_7 + yL\_loc \* Co\_7

XS3 = (XC + XD + XK) / 3#

YS3 = (YC + YD + YK) / 3#

XS8 = (XK + XL) / 2#

YS8 = (YK + YL) / 2#

’Производиться проверка правильности считывания и вычисления координат звеньев с центрами масс. Все выводиться на лист Test2.

Sheets("Test2").Select:

Cells(I1 + 1, 1).Value = XB1

Cells(I1 + 1, 2).Value = YB1

Cells(I1 + 1, 3).Value = XB

Cells(I1 + 1, 4).Value = YB

Cells(I1 + 1, 5).Value = XC

Cells(I1 + 1, 6).Value = YC

Cells(I1 + 1, 7).Value = XC1

Cells(I1 + 1, 8).Value = YC1

Cells(I1 + 1, 9).Value = XP

Cells(I1 + 1, 10).Value = YP

Cells(I1 + 1, 11).Value = XD1

Cells(I1 + 1, 12).Value = YD1

Cells(I1 + 1, 13).Value = XA1

Cells(I1 + 1, 14).Value = YA1

Cells(I1 + 1, 15).Value = XA

Cells(I1 + 1, 16).Value = XP1

Cells(I1 + 1, 17).Value = XD

**Продолжение приложения A**

Cells(I1 + 1, 18).Value = YA

Cells(I1 + 1, 19).Value = YP1

Cells(I1 + 1, 20).Value = YD

Cells(I1 + 1, 21).Value = XS1

Cells(I1 + 1, 22).Value = YS1

Cells(I1 + 1, 23).Value = XS2

Cells(I1 + 1, 24).Value = YS2

Cells(I1 + 1, 25).Value = XS3

Cells(I1 + 1, 26).Value = YS3

Cells(I1 + 1, 27).Value = XS4

Cells(I1 + 1, 28).Value = YS4

Cells(I1 + 1, 30).Value = XK

Cells(I1 + 1, 31).Value = YK

Cells(I1 + 1, 32).Value = XL

Cells(I1 + 1, 33).Value = YL

KL(I1) = Sqr((XK - XL) \* (XK - XL) + (YK - YL) \* (YK - YL))

Cells(I1 + 1, 34).Value = KL(I1)

Cells(I1 + 1, 35).Value = Co\_7

Cells(I1 + 1, 36).Value = Si\_7

Cells(I1 + 1, 40).Value = Co\_1

Cells(I1 + 1, 41).Value = Si\_1

Cells(I1 + 1, 45).Value = XS5

Cells(I1 + 1, 46).Value = YS5

Cells(I1 + 1, 47).Value = XS6

Cells(I1 + 1, 48).Value = YS6

Cells(I1 + 1, 49).Value = XS7

Cells(I1 + 1, 50).Value = YS7

Cells(I1 + 1, 51).Value = XS8

Cells(I1 + 1, 52).Value = YS8

''''''''''''

For i = 1 To N: For J = 1 To N: A(i, J) = 0: Next J: Next i:

A(1, 1) = 1: A(1, 3) = 1

A(2, 2) = 1: A(2, 4) = 1

A(3, 3) = YA - YB: A(3, 4) = XB - XA

A(4, 3) = -1: A(4, 5) = 1: A(4, 7) = 1

A(5, 4) = -1: A(5, 6) = 1: A(5, 8) = 1

A(6, 3) = YB - YC: A(6, 4) = XC - XB: A(6, 5) = YC - YP: A(6, 6) = XP - XC

A(7, 7) = -1: A(7, 9) = 1: A(7, 11) = 1

A(8, 8) = -1: A(8, 10) = 1: A(8, 12) = 1

A(9, 7) = YC - YD: A(9, 8) = XD - XC: A(9, 11) = YD - YK: A(9, 12) = XK - XD

A(10, 13) = 1: A(10, 15) = 1

A(11, 14) = 1: A(11, 16) = 1

A(12, 15) = YB1 - YA1: A(12, 16) = XA1 - XB1

A(13, 13) = -1: A(13, 17) = 1: A(13, 19) = 1

A(14, 14) = -1: A(14, 18) = 1: A(14, 20) = 1

A(15, 17) = YB1 - YP1: A(15, 18) = XP1 - XB1: A(15, 19) = YB1 - YC1: A(15, 20) = XC1 - XB1

A(16, 19) = -1: A(16, 21) = 1

A(17, 20) = -1: A(17, 22) = 1

A(18, 21) = YC1 - YD1: A(18, 22) = XD1 - XC1

**Продолжение приложения A**

A(19, 5) = -1: A(19, 15) = -1: A(19, 21) = -1: A(19, 23) = 1

A(20, 6) = -1: A(20, 16) = -1: A(20, 22) = -1: A(20, 24) = 1

A(21, 15) = YA1 - YP: A(21, 16) = XP - XA1: A(21, 21) = YD1 - YP: A(21, 22) = XP - XD1: A(21, 23) = YP - YL: A(21, 24) = XL - XP

A(22, 11) = -1: A(22, 23) = -1

A(23, 12) = -1: A(23, 24) = -1

A(24, 23) = YL - YK: A(24, 24)

'''''''

F(1) = -FX1:

F(2) = -FY1:

F(3) = FX1 \* (YS1 - YA) - FY1 \* (XS1 - XA)

F(4) = -FX2:

F(5) = -FY2:

F(6) = FX2 \* (YS2 - YC) - FY2 \* (XS2 - XC)

F(7) = -FX3:

F(8) = -FY3:

F(9) = FX3 \* (YS3 - YD) - FY3 \* (XS3 - XD)

F(10) = -FX4:

F(11) = -FY4:

F(12) = FX4 \* (YS4 - YB1) - FY4 \* (XS4 - XB1)

F(13) = -FX5:

F(14) = -FY5:

F(15) = FX5 \* (YS5 - YB1) - FY5 \* (XS5 - XB1)

F(16) = -FX6:

F(17) = -FY6:

F(18) = FX6 \* (YS6 - YC1) - FY6 \* (XS6 - XC1)

F(19) = -FX7:

F(20) = -FY7:

F(21) = FX7 \* (YS7 - YP) - FY7 \* (XS7 - XP)

F(22) = -FX8:

F(23) = -FY8:

F(24) = FX8 \* (YS8 - YK) - FY8 \* (XS8 - XK)

For i = 1 To N

For J = 1 To N

A1(i, J) = A(i, J)

Next J

F1(i) = F(i)

Next i

RSLU1 A1(), F1(), R(), blnMowSol

Sheets("React").Select:

For K = 1 To N

Cells(I1 + 1, K + 1).Value = R(K)

Next K

Sheets("Reactmax").Select

**Продолжение приложения A**

For K = 1 To N Step 2

kk = IntNom(K / 2 + 1)

Rm(K) = Sqr(R(K) \* R(K) + R(K + 1) \* R(K + 1))

Cells(I1 + 1, kk + 1).Value = Rm(K)

R2 = Rm(K)

Next K

Next I1

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("B2:B45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 2) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("C2:C45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 3) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("D2:D45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 4) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("E2:E45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 5) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("F2:F45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 6) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("G2:G45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 7) = Rmax

Crit2 = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("H2:H45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 8) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("I2:I45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 9) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("J2:J45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 10) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("K2:K45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 11) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("L2:L45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 12) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("M2:M45")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 13) = Rmax

Set R2 = Worksheets("Reactmax").Range("A47:M47")

Rmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

Cells(47, 14) = Rmax

Crit1 = Rmax

**Продолжение приложения A**

'Crit1=max po reactions

Sheets("Test2").Select

Set R2 = Worksheets("Test2").Range("AH2:AH45")

KLmax = Application.WorksheetFunction.Max(R2)

KLmin = Application.WorksheetFunction.Min(R2)

Crit3 = KLmax / KLmin

C3\_proof = KLmax / KLmin

Cells(47, 34) = KLmax

Cells(48, 34) = KLmin

For I1 = 3 To W

del\_kl1 = KL(I1 - 1) - KL(I1 - 2)

del\_kl2 = KL(I1) - KL(I1 - 1)

znak = del\_kl1 \* del\_kl2

If znak < 0 Then Crit3 = 100

Next I1

End Sub

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Sub RSLU(dblKoefSisUr() As Double, dblSvobChlUr() As Double, dblX() As Double, blnMowSol)

'решение систем линейных уравнении методом

'Гаусса с выбором главного элемента

' Dim intKolUrav As Integer ' число уравнений

' Dim dblKoefSisUr(intKolUrav,intKolUrav ) As Double 'коэффициенты системы уравнений

' Dim dblSvobChlUr(intKolUrav) As Double 'свободный член сист. ур.

' решение передается в dblX()

' если решение отсутствует blnMowSol=True

Dim dblC() As Double

Dim dblG() As Double

Dim intS1 As Integer

Dim intS2 As Integer

Dim intS3 As Integer

Dim intS4 As Integer

Dim intS5 As Integer

Dim dblS As Double

Dim intN1 As Integer

Dim intK1 As Integer

Dim intJ As Integer

Dim dblV As Double

Dim intKolUrav As Integer

On Error Resume Next

intKolUrav = UBound(dblSvobChlUr)

' ReDim dblKoefSisUr(1 To intKolUrav, 1 To intKolUrav)

' ReDim dblSvobChlUr(1 To intKolUrav)

ReDim dblC(1 To intKolUrav, 1 To intKolUrav)

ReDim dblG(1 To intKolUrav)

' ReDim dblX(1 To intKolUrav)

**Продолжение приложения A**

' For intSchet1 = 1 To intKolUrav

' For intSchet2 = 1 To intKolUrav

' Next intSchet2

' Next intSchet1

blnMowSol = False

intN1 = intKolUrav - 1

For intS1 = 1 To intN1

If Abs(dblKoefSisUr(intS1, intS1)) > 0 Then GoTo 200

intK1 = intS1 + 1

For intS2 = intK1 To intKolUrav

If Abs(dblKoefSisUr(intS2, intS1)) > 0 Then GoTo 150

GoTo 165

150:

For intS3 = 1 To intKolUrav

dblV = dblKoefSisUr(intS1, intS3)

dblKoefSisUr(intS1, intS3) = dblKoefSisUr(intS2, intS3)

dblKoefSisUr(intS2, intS3) = dblV

Next intS3

165:

Next intS2

dblV = dblSvobChlUr(intS1)

dblSvobChlUr(intS1) = dblSvobChlUr(intS2 - 1)

dblSvobChlUr(intS2 - 1) = dblV

200:

If dblKoefSisUr(intS1, intS1) = 0 Then blnMowSol = True: Exit Sub

dblG(intS1) = dblSvobChlUr(intS1) / dblKoefSisUr(intS1, intS1)

intK1 = intS1 + 1

For intS4 = intK1 To intKolUrav

dblSvobChlUr(intS4) = dblSvobChlUr(intS4) \_

- dblKoefSisUr(intS4, intS1) \* dblG(intS1)

For intS5 = intS1 To intKolUrav

intJ = intKolUrav - intS5 + intS1

If dblKoefSisUr(intS1, intS1) = 0 Then blnMowSol = True: Exit Sub

dblC(intS1, intJ) = dblKoefSisUr(intS1, intJ) / dblKoefSisUr(intS1, intS1)

dblKoefSisUr(intS4, intJ) = dblKoefSisUr(intS4, intJ) \_

- dblKoefSisUr(intS4, intS1) \* dblC(intS1, intJ)

Next intS5

Next intS4

Next intS1

intS2 = intKolUrav

If dblKoefSisUr(intS2, intS2) = 0 Then blnMowSol = True: Exit Sub

dblX(intS2) = dblSvobChlUr(intS2) \_

/ dblKoefSisUr(intS2, intS2)

250:

**Продолжение приложения A**

intS2 = intS2 - 1

dblS = 0

For intS3 = intS2 To intN1

dblS = dblS + dblC(intS2, intS3 + 1) \* dblX(intS3 + 1)

Next intS3

dblX(intS2) = dblG(intS2) - dblS

If intS2 > 1 Then GoTo 250

End Sub

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Public Sub LPtau(A As Long, N As Integer, T() As Double)

'Метод LPtau

'А - задается произвольно ???????

'N - КОЛИЧЕСТВО ТОЧЕК

'Т() - записывается значения

'16.03.01

Dim J As Integer, K As Integer, L As Integer

Dim M As Integer, NS As Integer

Dim S As Double, B As Double

M = 1 + IntNom(Log(A) / 0.693147)

For J = 1 To N

S = 0

For K = 1 To M

NS = 0

For L = K To M

B = NR(J, L)

NS = NS + IntNom(2 \* DrobNom(A / (2 ^ L))) \_

\* IntNom(2# \* DrobNom(B / (2 ^ (L + 1 - K))))

Next L

S = S + DrobNom(0.5 \* NS) / (2 ^ (K - 1))

Next K

T(J) = S

Next J

End Sub

Public Sub TableNom()

ReDim NR(51, 20) As Double

NR(1, 1) = 1: NR(2, 1) = 1: NR(3, 1) = 1: NR(4, 1) = 1

NR(5, 1) = 1: NR(6, 1) = 1: NR(7, 1) = 1: NR(8, 1) = 1

NR(9, 1) = 1: NR(10, 1) = 1: NR(11, 1) = 1: NR(12, 1) = 1

NR(13, 1) = 1: NR(14, 1) = 1: NR(15, 1) = 1: NR(16, 1) = 1

NR(17, 1) = 1: NR(18, 1) = 1: NR(19, 1) = 1: NR(20, 1) = 1

NR(21, 1) = 1: NR(22, 1) = 1: NR(23, 1) = 1: NR(24, 1) = 1

NR(25, 1) = 1: NR(26, 1) = 1: NR(27, 1) = 1: NR(28, 1) = 1

NR(29, 1) = 1: NR(30, 1) = 1: NR(31, 1) = 1: NR(32, 1) = 1

NR(33, 1) = 1: NR(34, 1) = 1: NR(35, 1) = 1: NR(36, 1) = 1

NR(37, 1) = 1: NR(38, 1) = 1: NR(39, 1) = 1: NR(40, 1) = 1

**Продолжение приложения A**

NR(41, 1) = 1: NR(42, 1) = 1: NR(43, 1) = 1: NR(44, 1) = 1

NR(45, 1) = 1: NR(46, 1) = 1: NR(47, 1) = 1: NR(48, 1) = 1

NR(49, 1) = 1: NR(50, 1) = 1: NR(51, 1) = 1

NR(1, 2) = 1: NR(2, 2) = 3: NR(3, 2) = 1: NR(4, 2) = 3

NR(5, 2) = 1: NR(6, 2) = 3: NR(7, 2) = 1: NR(8, 2) = 3

NR(9, 2) = 3: NR(10, 2) = 1: NR(11, 2) = 3: NR(12, 2) = 1

NR(13, 2) = 3: NR(14, 2) = 1: NR(15, 2) = 3: NR(16, 2) = 1

NR(17, 2) = 1: NR(18, 2) = 3: NR(19, 2) = 1: NR(20, 2) = 3

NR(21, 2) = 1: NR(22, 2) = 3: NR(23, 2) = 1: NR(24, 2) = 3

NR(25, 2) = 3: NR(26, 2) = 1: NR(27, 2) = 3: NR(28, 2) = 1

NR(29, 2) = 3: NR(30, 2) = 1: NR(31, 2) = 3: NR(32, 2) = 1

NR(33, 2) = 1: NR(34, 2) = 3: NR(35, 2) = 1: NR(36, 2) = 3

NR(37, 2) = 1: NR(38, 2) = 3: NR(39, 2) = 1: NR(40, 2) = 3

NR(41, 2) = 3: NR(42, 2) = 1: NR(43, 2) = 3: NR(44, 2) = 1

NR(45, 2) = 3: NR(46, 2) = 1: NR(47, 2) = 3: NR(48, 2) = 1

NR(49, 2) = 1: NR(50, 2) = 3: NR(51, 2) = 1

NR(1, 3) = 1: NR(2, 3) = 5: NR(3, 3) = 7: NR(4, 3) = 7

NR(5, 3) = 5: NR(6, 3) = 1: NR(7, 3) = 3: NR(8, 3) = 3

NR(9, 3) = 7: NR(10, 3) = 5: NR(11, 3) = 5: NR(12, 3) = 7

NR(13, 3) = 7: NR(14, 3) = 1: NR(15, 3) = 3: NR(16, 3) = 3

NR(17, 3) = 7: NR(18, 3) = 5: NR(19, 3) = 1: NR(20, 3) = 1

NR(21, 3) = 5: NR(22, 3) = 3: NR(23, 3) = 3: NR(24, 3) = 1

NR(25, 3) = 7: NR(26, 3) = 5: NR(27, 3) = 1: NR(28, 3) = 3

NR(29, 3) = 3: NR(30, 3) = 7: NR(31, 3) = 5: NR(32, 3) = 1

NR(33, 3) = 1: NR(34, 3) = 5: NR(35, 3) = 7: NR(36, 3) = 7

NR(37, 3) = 5: NR(38, 3) = 1: NR(39, 3) = 3: NR(40, 3) = 3

NR(41, 3) = 7: NR(42, 3) = 5: NR(43, 3) = 5: NR(44, 3) = 7

NR(45, 3) = 7: NR(46, 3) = 1: NR(47, 3) = 3: NR(48, 3) = 3

NR(49, 3) = 7: NR(50, 3) = 5: NR(51, 3) = 1

NR(1, 4) = 1: NR(2, 4) = 15: NR(3, 4) = 11: NR(4, 4) = 5

NR(5, 4) = 3: NR(6, 4) = 1: NR(7, 4) = 7: NR(8, 4) = 9

NR(9, 4) = 13: NR(10, 4) = 11: NR(11, 4) = 1: NR(12, 4) = 3

NR(13, 4) = 7: NR(14, 4) = 9: NR(15, 4) = 5: NR(16, 4) = 13

NR(17, 4) = 13: NR(18, 4) = 11: NR(19, 4) = 3: NR(20, 4) = 15

NR(21, 4) = 5: NR(22, 4) = 3: NR(23, 4) = 15: NR(24, 4) = 7

NR(25, 4) = 9: NR(26, 4) = 13: NR(27, 4) = 9: NR(28, 4) = 1

NR(29, 4) = 11: NR(30, 4) = 7: NR(31, 4) = 5: NR(32, 4) = 15

NR(33, 4) = 1: NR(34, 4) = 15: NR(35, 4) = 11: NR(36, 4) = 5

NR(37, 4) = 3: NR(38, 4) = 1: NR(39, 4) = 7: NR(40, 4) = 9

NR(41, 4) = 13: NR(42, 4) = 11: NR(43, 4) = 1: NR(44, 4) = 3

NR(45, 4) = 7: NR(46, 4) = 9: NR(47, 4) = 5: NR(48, 4) = 13

NR(49, 4) = 13: NR(50, 4) = 11: NR(51, 4) = 3

NR(1, 5) = 1: NR(2, 5) = 17: NR(3, 5) = 13: NR(4, 5) = 7

NR(5, 5) = 15: NR(6, 5) = 9: NR(7, 5) = 31: NR(8, 5) = 9

NR(9, 5) = 3: NR(10, 5) = 27: NR(11, 5) = 15: NR(12, 5) = 29

NR(13, 5) = 21: NR(14, 5) = 23: NR(15, 5) = 19: NR(16, 5) = 11

NR(17, 5) = 25: NR(18, 5) = 7: NR(19, 5) = 13: NR(20, 5) = 17

**Продолжение приложения A**

NR(21, 5) = 1: NR(22, 5) = 25: NR(23, 5) = 29: NR(24, 5) = 3

NR(25, 5) = 31: NR(26, 5) = 11: NR(27, 5) = 5: NR(28, 5) = 23

NR(29, 5) = 27: NR(30, 5) = 19: NR(31, 5) = 21: NR(32, 5) = 5

NR(33, 5) = 1: NR(34, 5) = 17: NR(35, 5) = 13: NR(36, 5) = 7

NR(37, 5) = 15: NR(38, 5) = 9: NR(39, 5) = 31: NR(40, 5) = 9

NR(41, 5) = 3: NR(42, 5) = 27: NR(43, 5) = 15: NR(44, 5) = 29

NR(45, 5) = 21: NR(46, 5) = 23: NR(47, 5) = 19: NR(48, 5) = 11

NR(49, 5) = 25: NR(50, 5) = 7: NR(51, 5) = 13

NR(1, 6) = 1: NR(2, 6) = 51: NR(3, 6) = 61: NR(4, 6) = 43

NR(5, 6) = 51: NR(6, 6) = 59: NR(7, 6) = 47: NR(8, 6) = 57

NR(9, 6) = 35: NR(10, 6) = 53: NR(11, 6) = 19: NR(12, 6) = 51

NR(13, 6) = 61: NR(14, 6) = 37: NR(15, 6) = 33: NR(16, 6) = 7

NR(17, 6) = 5: NR(18, 6) = 11: NR(19, 6) = 39: NR(20, 6) = 63

NR(21, 6) = 27: NR(22, 6) = 17: NR(23, 6) = 15: NR(24, 6) = 23

NR(25, 6) = 29: NR(26, 6) = 3: NR(27, 6) = 21: NR(28, 6) = 13

NR(29, 6) = 31: NR(30, 6) = 25: NR(31, 6) = 9: NR(32, 6) = 49

NR(33, 6) = 33: NR(34, 6) = 19: NR(35, 6) = 29: NR(36, 6) = 11

NR(37, 6) = 19: NR(38, 6) = 27: NR(39, 6) = 15: NR(40, 6) = 25

NR(41, 6) = 3: NR(42, 6) = 21: NR(43, 6) = 51: NR(44, 6) = 19

NR(45, 6) = 29: NR(46, 6) = 5: NR(47, 6) = 1: NR(48, 6) = 39

NR(49, 6) = 37: NR(50, 6) = 43: NR(51, 6) = 7

NR(1, 7) = 1: NR(2, 7) = 85: NR(3, 7) = 67: NR(4, 7) = 49

NR(5, 7) = 125: NR(6, 7) = 25: NR(7, 7) = 109: NR(8, 7) = 43

NR(9, 7) = 89: NR(10, 7) = 69: NR(11, 7) = 113: NR(12, 7) = 47

NR(13, 7) = 55: NR(14, 7) = 97: NR(15, 7) = 3: NR(16, 7) = 37

NR(17, 7) = 83: NR(18, 7) = 103: NR(19, 7) = 27: NR(20, 7) = 13

NR(21, 7) = 33: NR(22, 7) = 115: NR(23, 7) = 41: NR(24, 7) = 79

NR(25, 7) = 17: NR(26, 7) = 29: NR(27, 7) = 119: NR(28, 7) = 75

NR(29, 7) = 73: NR(30, 7) = 105: NR(31, 7) = 7: NR(32, 7) = 59

NR(33, 7) = 65: NR(34, 7) = 21: NR(35, 7) = 3: NR(36, 7) = 113

NR(37, 7) = 61: NR(38, 7) = 89: NR(39, 7) = 45: NR(40, 7) = 107

NR(41, 7) = 25: NR(42, 7) = 5: NR(43, 7) = 49: NR(44, 7) = 111

NR(45, 7) = 119: NR(46, 7) = 33: NR(47, 7) = 67: NR(48, 7) = 101

NR(49, 7) = 19: NR(50, 7) = 39: NR(51, 7) = 91

NR(1, 8) = 1: NR(2, 8) = 255: NR(3, 8) = 79: NR(4, 8) = 147

NR(5, 8) = 141: NR(6, 8) = 89: NR(7, 8) = 173: NR(8, 8) = 43

NR(9, 8) = 9: NR(10, 8) = 25: NR(11, 8) = 115: NR(12, 8) = 97

NR(13, 8) = 19: NR(14, 8) = 97: NR(15, 8) = 197: NR(16, 8) = 101

NR(17, 8) = 255: NR(18, 8) = 29: NR(19, 8) = 203: NR(20, 8) = 65

NR(21, 8) = 195: NR(22, 8) = 177: NR(23, 8) = 105: NR(24, 8) = 17

NR(25, 8) = 47: NR(26, 8) = 169: NR(27, 8) = 109: NR(28, 8) = 149

NR(29, 8) = 15: NR(30, 8) = 213: NR(31, 8) = 135: NR(32, 8) = 253

NR(33, 8) = 191: NR(34, 8) = 155: NR(35, 8) = 175: NR(36, 8) = 63

NR(37, 8) = 47: NR(38, 8) = 7: NR(39, 8) = 23: NR(40, 8) = 39

NR(41, 8) = 55: NR(42, 8) = 71: NR(43, 8) = 87: NR(44, 8) = 103

NR(45, 8) = 119: NR(46, 8) = 135: NR(47, 8) = 153: NR(48, 8) = 169

NR(49, 8) = 185: NR(50, 8) = 201: NR(51, 8) = 217

**Продолжение приложения A**

NR(1, 9) = 1: NR(2, 9) = 257: NR(3, 9) = 465: NR(4, 9) = 439

NR(5, 9) = 177: NR(6, 9) = 321: NR(7, 9) = 181: NR(8, 9) = 225

NR(9, 9) = 235: NR(10, 9) = 103: NR(11, 9) = 411: NR(12, 9) = 233

NR(13, 9) = 59: NR(14, 9) = 353: NR(15, 9) = 329: NR(16, 9) = 463

NR(17, 9) = 385: NR(18, 9) = 111: NR(19, 9) = 475: NR(20, 9) = 451

NR(21, 9) = 263: NR(22, 9) = 19: NR(23, 9): NR(24, 9) = 275

NR(25, 9) = 369: NR(26, 9): NR(27, 9) = 167: NR(28, 9) = 333

NR(29, 9) = 473: NR(30, 9) = 469: NR(31, 9) = 101: NR(32, 9) = 21

NR(33, 9) = 451: NR(34, 9) = 229: NR(35, 9) = 247: NR(36, 9) = 297

NR(37, 9) = 403: NR(38, 9) = 497: NR(39, 9): NR(40, 9) = 361

NR(41, 9) = 215: NR(42, 9) = 393: NR(43, 9) = 125: NR(44, 9) = 285

NR(45, 9) = 501: NR(46, 9) = 277: NR(47, 9) = 199: NR(48, 9) = 301

NR(49, 9) = 19: NR(50, 9) = 83: NR(51, 9) = 351

NR(1, 10) = 1: NR(2, 10) = 771: NR(3, 10) = 721: NR(4, 10) = 1013

NR(5, 10) = 759: NR(6, 10) = 835: NR(7, 10) = 949: NR(8, 10) = 113

NR(9, 10) = 929: NR(10, 10) = 615: NR(11, 10) = 157: NR(12, 10) = 39

NR(13, 10) = 761: NR(14, 10) = 169: NR(15, 10) = 983: NR(16, 10) = 657

NR(17, 10) = 647: NR(18, 10) = 581: NR(19, 10) = 505: NR(20, 10) = 833

NR(21, 10) = 139: NR(22, 10) = 147: NR(23, 10) = 203: NR(24, 10) = 81

NR(25, 10) = 337: NR(26, 10) = 829: NR(27, 10) = 989: NR(28, 10) = 375

NR(29, 10) = 365: NR(30, 10) = 131: NR(31, 10) = 215: NR(32, 10) = 733

NR(33, 10) = 451: NR(34, 10) = 447: NR(35, 10) = 177: NR(36, 10) = 57

NR(37, 10) = 471: NR(38, 10) = 979: NR(39, 10) = 197: NR(40, 10) = 251

NR(41, 10) = 517: NR(42, 10) = 137: NR(43, 10: NR(44, 10) = 1021

NR(45, 10) = 167: NR(46, 10) = 877: NR(47, 10) = 929: NR(48, 10) = 269

NR(49, 10) = 327: NR(50, 10) = 997: NR(51, 10) = 91

NR(1, 11) = 1: NR(2, 11) = 1285: NR(3, 11) = 823: NR(4, 11) = 727

NR(5, 11) = 267: NR(6, 11) = 833: NR(7, 11) = 471: NR(8, 11) = 1601

NR(9, 11) = 1341: NR(10, 11) = 913: NR(11, 11) = 1725: NR(12, 11) = 2021

NR(13, 11) = 1905: NR(14, 11) = 375: NR(15, 11) = 893: NR(16, 11) = 1599

NR(17, 11) = 415: NR(18, 11): NR(19, 11) = 819: NR(20, 11) = 975

NR(21, 11) = 915: NR(22, 11) = 1715: NR(23, 11) = 1223: NR(24, 11) = 1367

NR(25, 11) = 663: NR(26, 11): NR(27, 11) = 525: NR(28, 11) = 469

NR(29, 11) = 981: NR(30, 11) = 1667: NR(31, 11): NR(32, 11) = 1251

NR(33, 11) = 451: NR(34, 11) = 481: NR(35, 11) = 721: NR(36, 11) = 483

NR(37, 11) = 1209: NR(38, 11) = 1457: NR(39, 11) = 415: NR(40, 11) = 1435

NR(41, 11) = 725: NR(42, 11) = 861: NR(43, 11) = 41: NR(44, 11) = 1619

NR(45, 11) = 1579: NR(46, 11) = 1701: NR(47, 11) = 869: NR(48, 11) = 1151

NR(49, 11) = 1897: NR(50, 11) = 1679: NR(51, 11) = 1355

NR(1, 12) = 1: NR(2, 12) = 3855: NR(3, 12) = 4091: NR(4, 12) = 987

NR(5, 12) = 1839: NR(6, 12) = 4033: NR(7, 12) = 2515: NR(8, 12) = 579

NR(9, 12) = 3863: NR(10, 12) = 977: NR(11, 12) = 3463: NR(12, 12) = 2909

NR(13, 12) = 3379: NR(14, 12) = 1349: NR(15, 12) = 3739: NR(16, 12) = 347

NR(17, 12) = 387: NR(18, 12) = 2381: NR(19, 12) = 2821: NR(20, 12) = 1873

NR(21, 12) = 1959: NR(22, 12) = 1929: NR(23, 12) = 2389: NR(24, 12) = 3251

NR(25, 12) = 1149: NR(26, 12) = 243: NR(27, 12) = 3609: NR(28, 12) = 1131

NR(29, 12) = 1701: NR(30, 12) = 143: NR(31, 12) = 1339: NR(32, 12) = 3497

NR(33, 12) = 2499: NR(34, 12) = 1571: NR(35, 12) = 983: NR(36, 12) = 4021

**Продолжение приложения A**

NR(37, 12) = 1625: NR(38, 12) = 3217: NR(39, 12) = 1163: NR(40, 12) = 2977

NR(41, 12) = 3391: NR(42, 12) = 675: NR(43, 12) = 3093: NR(44, 12) = 1495

NR(45, 12) = 3443: NR(46, 12) = 557: NR(47, 12) = 675: NR(48, 12) = 1489

NR(49, 12) = 2303: NR(50, 12) = 3925: NR(51, 12) = 3705

NR(1, 13) = 1: NR(2, 13) = 4369: NR(3, 13) = 4125: NR(4, 13) = 5889

NR(5, 13) = 6929: NR(6, 13) = 3913: NR(7, 13) = 6211: NR(8, 13) = 1731

NR(9, 13) = 1347: NR(10, 13) = 6197: NR(11, 13) = 2817: NR(12, 13) = 5459

NR(13, 13) = 8119: NR(14, 13) = 5121: NR(15, 13) = 7669: NR(16, 13) = 2481

NR(17, 13) = 7101: NR(18, 13) = 2677: NR(19, 13) = 1405: NR(20, 13) = 7423

NR(21, 13) = 725: NR(22, 13) = 2465: NR(23, 13) = 471: NR(24, 13) = 2887

NR(25, 13) = 1715: NR(26, 13) = 5595: NR(27, 13) = 5689: NR(28, 13) = 441

NR(29, 13) = 3169: NR(30, 13) = 4485: NR(31, 13) = 6311: NR(32, 13) = 3557

NR(33, 13) = 483: NR(34, 13) = 3781: NR(35, 13) = 3195: NR(36, 13) = 5213

NR(37, 13) = 5085: NR(38, 13) = 185: NR(39, 13) = 7323: NR(40, 13) = 1713

NR(41, 13) = 4021: NR(42, 13) = 5875: NR(43, 13) = 5363: NR(44, 13) = 4977

NR(45, 13) = 5441: NR(46, 13) = 1779: NR(47, 13) = 6777: NR(48, 13) = 287

NR(49, 13) = 6919: NR(50, 13) = 1517: NR(51, 13) = 1875

NR(1, 14) = 1: NR(2, 14) = 13107: NR(3, 14) = 4141: NR(4, 14) = 6915

NR(5, 14) = 16241: NR(6, 14) = 11643: NR(7, 14) = 2147: NR(8, 14) = 11977

NR(9, 14) = 4417: NR(10, 14) = 14651: NR(11, 14) = 9997: NR(12, 14) = 2615

NR(13, 14) = 13207: NR(14, 14) = 13313: NR(15, 14): NR(16, 14) = 5201

NR(17, 14) = 11469: NR(18, 14) = 14855: NR(19, 14) = 12165: NR(20, 14) = 5837

NR(21, 14) = 5387: NR(22, 14) = 12483: NR(23, 14) = 12945: NR(24, 14) = 1279

NR(25, 14) = 187: NR(26, 14) = 8133: NR(27, 14) = 11819: NR(28, 14) = 14471

NR(29, 14) = 7615: NR(30, 14) = 2981: NR(31, 14) = 4081: NR(32, 14) = 7223

NR(33, 14) = 11843: NR(34, 14) = 10799: NR(35, 14) = 9277: NR(36, 14) = 2031

NR(37, 14) = 15371: NR(38, 14) = 6603: NR(39, 14) = 7563: NR(40, 14) = 11617

NR(41, 14) = 4129: NR(42, 14) = 12061: NR(43, 14) = 3471: NR(44, 14) = 15919

NR(45, 14) = 1097: NR(46, 14) = 10369: NR(47, 14) = 14343: NR(48, 14) = 8475

NR(49, 14) = 16139: NR(50, 14) = 305: NR(51, 14) = 7621

NR(1, 15) = 1: NR(2, 15) = 21845: NR(3, 15) = 28723: NR(4, 15) = 16647

NR(5, 15) = 16565: NR(6, 15) = 18777: NR(7, 15) = 3169: NR(8, 15) = 7241

NR(9, 15) = 5087: NR(10, 15) = 2507: NR(11, 15) = 7451: NR(12, 15) = 13329

NR(13, 15) = 8965: NR(14, 15) = 19457: NR(15, 15) = 18391: NR(16, 15) = 3123

NR(17, 15) = 11699: NR(18, 15) = 721: NR(19, 15) = 709: NR(20, 15) = 20481

NR(21, 15) = 19285: NR(22, 15) = 13057: NR(23, 15) = 32321: NR(24, 15) = 4865

NR(25, 15) = 12285: NR(26, 15) = 4929: NR(27, 15) = 15889: NR(28, 15) = 12625

NR(29, 15) = 8405: NR(30, 15) = 12593: NR(31, 15) = 28637: NR(32, 15) = 13425

NR(33, 15) = 28285: NR(34, 15) = 15893: NR(35, 15) = 15405: NR(36, 15) = 4677

NR(37, 15) = 19493: NR(38, 15) = 1129: NR(39, 15) = 25321: NR(40, 15) = 14979

NR(41, 15) = 4099: NR(42, 15) = 25469: NR(43, 15) = 17589: NR(44, 15) = 6731

NR(45, 15) = 13483: NR(46, 15) = 15325: NR(47, 15) = 18465: NR(48, 15) = 6926

NR(49, 15) = 16677: NR(50, 15) = 21765: NR(51, 15) = 4381

NR(1, 16) = 1: NR(2, 16) = 65535: NR(3, 16) = 45311: NR(4, 16) = 49925

NR(5, 16) = 17139: NR(6, 16) = 35225: NR(7, 16) = 35873: NR(8, 16) = 63609

NR(9, 16) = 12631: NR(10, 16) = 27109: NR(11, 16) = 12055: NR(12, 16) = 35887

**Продолжение приложения A**

NR(13, 16) = 9997: NR(14, 16) = 1033: NR(15, 16) = 31161: NR(16, 16) = 32253

NR(17, 16) = 15865: NR(18, 16) = 26903: NR(19, 16) = 41543: NR(20, 16) = 12291

NR(21, 16) = 5165: NR(22, 16) = 28931: NR(23, 16) = 29377: NR(24, 16) = 64771

NR(25, 16) = 53631: NR(26, 16) = 10817: NR(27, 16) = 48083: NR(28, 16) = 8881

NR(29, 16) = 41135: NR(30, 16) = 60913: NR(31, 16) = 60935: NR(32, 16) = 58577

NR(33, 16) = 12029: NR(34, 16) = 959: NR(35, 16) = 19637: NR(36, 16) = 26607

NR(37, 16) = 56445: NR(38, 16) = 36087: NR(39, 16) = 52563: NR(40, 16) = 5455

NR(41, 16) = 12345: NR(42, 16) = 47423: NR(43, 16) = 50131: NR(44, 16) = 43771

NR(45, 16) = 58779: NR(46, 16) = 33331: NR(47, 16) = 63615: NR(48, 16) = 46013

NR(49, 16) = 34579: NR(50, 16) = 45827: NR(51, 16) = 9079

NR(1, 17) = 1: NR(2, 17) = 65537: NR(3, 17) = 53505: NR(4, 17) = 116487

NR(5, 17) = 82207: NR(6, 17) = 102401: NR(7, 17) = 33841: NR(8, 17) = 81003

NR(9, 17) = 103445: NR(10, 17) = 5205: NR(11, 17) = 44877: NR(12, 17) = 97323

NR(13, 17) = 75591: NR(14, 17) = 62487: NR(15, 17) = 12111: NR(16, 17) = 78043

NR(17, 17) = 49173: NR(18, 17) = 100419: NR(19, 17) = 57545: NR(20, 17) = 86017

NR(21, 17) = 27985: NR(22, 17) = 54019: NR(23, 17) = 127427: NR(24, 17) = 24321

NR(25, 17) = 110851: NR(26, 17) = 8261: NR(27, 17) = 67537: NR(28, 17) = 34707

NR(29, 17) = 106823: NR(30, 17) = 15703: NR(31, 17) = 94129: NR(32, 17) = 69521

NR(33, 17) = 86021: NR(34, 17) = 19793: NR(35, 17) = 87283: NR(36, 17) = 20931

NR(37, 17) = 26369: NR(38, 17) = 66817: NR(39, 17) = 37745: NR(40, 17) = 68289

NR(41, 17) = 102733: NR(42, 17) = 29505: NR(43, 17) = 33137: NR(44, 17) = 23313

NR(45, 17) = 36561: NR(46, 17) = 118321: NR(47, 17) = 43349: NR(48, 17) = 52785

NR(49, 17) = 120981: NR(50, 17) = 91157: NR(51, 17) = 94533

NR(1, 18) = 1: NR(2, 18) = 196611: NR(3, 18) = 250113: NR(4, 18) = 83243

NR(5, 18) = 50979: NR(6, 18) = 45059: NR(7, 18) = 99889: NR(8, 18) = 15595

NR(9, 18) = 152645: NR(10, 18) = 91369: NR(11, 18): NR(12, 18) = 83101

NR(13, 18) = 226659: NR(14, 18) = 250917: NR(15, 18) = 259781: NR(16, 18) = 63447

NR(17, 18) = 147489: NR(18, 18) = 206167: NR(19, 18) = 77163: NR(20, 18) = 12303

NR(21, 18) = 69809: NR(22, 18) = 21251: NR(23, 18) = 103759: NR(24, 18) = 42247

NR(25, 18) = 4357: NR(26, 18) = 189901: NR(27, 18) = 63993: NR(28, 18) = 85105

NR(29, 18) = 107847: NR(30, 18) = 26967: NR(31, 18) = 109273: NR(32, 18) = 217151

NR(33, 18) = 217093: NR(34, 18) = 213491: NR(35, 18) = 186143: NR(36, 18) = 54345

NR(37, 18) = 27399: NR(38, 18) = 98051: NR(39, 18) = 81777: NR(40, 18) = 209987

NR(41, 18) = 21287: NR(42, 18) = 124097: NR(43, 18) = 98739: NR(44, 18) = 151281

NR(45, 18) = 116819: NR(46, 18) = 59665: NR(47, 18) = 30799: NR(48, 18) = 75249

NR(49, 18) = 239693: NR(50, 18) = 113679: NR(51, 18) = 37261

NR(1, 19) = 1: NR(2, 19) = 327685: NR(3, 19) = 276231: NR(4, 19) = 116529:

NR(5, 19) = 252717: NR(6, 19) = 36865: NR(7, 19) = 247315: NR(8, 19) = 144417

NR(9, 19) = 130127: NR(10, 19) = 302231: NR(11, 19) = 508255: NR(12, 19) = 320901

NR(13, 19) = 187499: NR(14, 19) = 234593: NR(15, 19) = 36159: NR(16, 19) = 508757

NR(17, 19) = 81991: NR(18, 19) = 241771: NR(19, 19) = 357231: NR(20, 19) = 299025

NR(21, 19) = 128325: NR(22, 19) = 62233: NR(23, 19) = 472541: NR(24, 19) = 338691

NR(25, 19) = 153347: NR(26, 19) = 255947: NR(27, 19) = 336469: NR(28, 19) = 479495

NR(29, 19) = 339031: NR(30, 19) = 507907: NR(31, 19) = 475921: NR(32, 19) = 424277

NR(33, 19) = 348165: NR(34, 19) = 377941: NR(35, 19) = 343297: NR(36, 19) = 259163

NR(37, 19) = 521499: NR(38, 19) = 451841: NR(39, 19) = 235347: NR(40, 19) = 346179

**Продолжение приложения A**

NR(41, 19) = 128115: NR(42, 19) = 444613: NR(43, 19) = 361365: NR(44, 19) = 270519

NR(45, 19) = 420599: NR(46, 19) = 498897: NR(47, 19) = 322567: NR(48, 19) = 14035

NR(49, 19) = 73299: NR(50, 19) = 204881: NR(51, 19) = 431301

NR(1, 20) = 1: NR(2, 20) = 983055: NR(3, 20): NR(4, 20) = 715667

NR(5, 20) = 851901: NR(6, 20) = 299009: NR(7, 20) = 1032727: NR(8, 20) = 685617

NR(9, 20) = 775365: NR(10, 20) = 172023: NR(11, 20) = 574033: NR(12, 20) = 810643

NR(13, 20) = 628265: NR(14, 20) = 308321: NR(15, 20) = 232401: NR(16, 20) = 974837

NR(17, 20) = 802875: NR(18, 20) = 987201: NR(19, 20) = 378135: NR(20, 20) = 774207

NR(21, 20) = 164575: NR(22, 20) = 248081: NR(23, 20) = 1008719: NR(24, 20) = 599831

NR(25, 20) = 671033: NR(26, 20) = 734787: NR(27, 20) = 749285: NR(28, 20) = 911133

NR(29, 20) = 977907: NR(30, 20) = 344073: NR(31, 20) = 281389: NR(32, 20) = 789985

NR(33, 20) = 176165: NR(34, 20) = 414943: NR(35, 20) = 1041185: NR(36, 20) = 741087

NR(37, 20) = 132383: NR(38, 20) = 175361: NR(39, 20) = 539895: NR(40, 20) = 521289

NR(41, 20) = 20689: NR(42, 20) = 430923: NR(43, 20) = 426737: NR(44, 20) = 11187

NR(45, 20) = 998391: NR(46, 20) = 494137: NR(47, 20) = 939017: NR(48, 20) = 507165

NR(49, 20) = 863545: NR(50, 20) = 761911: NR(51, 20) = 176455

End Sub

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_