

На правах рукописи



КРОХМАЛЬ Олег Николаевич

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И ПРОГРАММНОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И СИНТЕЗА  
РЫЧАЖНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
РОБОТОВ И МАНИПУЛЯТОРОВ**

Специальность: 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)»

Специальность: 05.02.18 – «Теория механизмов и машин»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Курган - 2011

Работа выполнена в Курганском образовательном учреждении высшего профессионального образования «Курганский государственный университет».

<b>Научный руководитель:</b>	доктор технических наук, профессор Шестаков Александр Леонидович
<b>Официальные оппоненты:</b>	доктор технических наук, профессор Тележкин Владимир Фёдорович доктор технических наук, профессор Бабичев Дмитрий Тихонович
<b>Ведущая организация:</b>	ОАО «Специальное конструкторское бюро машиностроения», г. Курган

Защита состоится 22 декабря 2011 года, в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001 (гл. корпус)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 17 ноября 2011 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.298.03  
д.т.н., проф.



С.Г. Некрасов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные технологии нуждаются в системном подходе при выполнении проектных работ различных технических устройств. Это связано с обработкой большого массива информации, относящейся, прежде всего к структуре, проектируемого технического устройства. Рычажные механизмы находят широкое применение во многих областях современных технологий – робототехнике, мехатронике, являющихся основой автоматизированных линий различных производств. Основой системного проектирования рычажных механизмов являются их структурный анализ и синтез. Для создания такой основы необходимы системные знания о структурных свойствах изучаемого объекта – кинематических цепях рычажных механизмов. В настоящее время одним из распространённых методов структурного анализа и синтеза механизмов является метод Ассур - Артоболевского. Базовым понятием этого метода является кинематическая цепь, обладающая определенными структурными свойствами (группа Ассур). Практика проектирования показывает, что актуальной является фундаментальная задача изучения закономерностей строения самих структурных групп и разработка на этой основе алгоритмов и программного обеспечения для их анализа и синтеза. Характерной особенностью этой задачи является то, что её решение требует обработки большого объёма информации.

**Объектом исследования** являются базовые кинематические цепи, обладающие характерными структурными свойствами и являющиеся составными компонентами рычажных механизмов промышленных роботов и манипуляторов.

**Предметом исследования** являются алгоритмы и программное обеспечение структурного анализа и синтеза базовых кинематических цепей рычажных механизмов роботов и манипуляторов.

**Цель исследования** заключается в разработке алгоритмов и программного обеспечения для обработки информации о строении объекта в процессе структурного анализа и синтеза рычажных кинематических цепей.

**Методы исследования.** Для достижения целей системного исследования базовых кинематических цепей использованы методы теории графов, комбинаторики, матричного исчисления, а также математического анализа и оптимизации функций.

**Достоверность и обоснованность.** Математические модели и алгоритмы, предложенные в работе, основаны на корректном использовании фундаментальных положений теории графов и теории механизмов. Разработанные алгоритмы прошли апробацию при проведении компьютерных экспериментов по анализу существующих и синтезу новых базовых кинематических цепей. Результаты, полученные с помощью созданного программного обеспечения, подтверждаются их сравнением с уже имеющимися в литературе данными. А также их успешным использованием в практике проектирования механизмов манипуляторов автоматизированных линий.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены новые объекты исследования – базовые кинематические цепи (БКЦ) и установлен принцип их строения как цепи диад с перекрывающимися обратными связями.

2. На основе принципа строения БКЦ разработан алгоритм обработки информации их математических моделей для их структурного анализа.

3. На основе структурных свойств БКЦ разработан алгоритм обработки информации их математических моделей для их структурного синтеза

4. Разработаны алгоритмы обработки информации математических моделей БКЦ для тестирования их на изоморфизм.

5. Проведен синтез всех возможных базовых кинематических цепей, состоящих из 5, 6, 7 и 8 диад. Составлен их электронный каталог – база данных. Получены новые ранее неизвестные базовые кинематические цепи.

**Практическая ценность** полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют осуществлять структурный анализ БКЦ. Такой анализ является первым необходимым этапом при выполнении кинематического анализа и синтеза кинематических цепей роботов и манипуляторов, что продемонстрировано на конкретных примерах.

2. Разработанный алгоритм синтеза базовых кинематических цепей и его программная реализация позволяют осуществлять синтез неизоморфных вариантов для создания базы данных с целью использования её для выбора подходящей БКЦ. Выбор БКЦ в соответствии с требуемыми условиями движения является важным начальным этапом при проведении структурного (структурно-параметрического) синтеза рычажных механизмов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на: научной конференции студентов и аспирантов Курганского госуниверситета (Курган, 2005); научных семинарах Курганского госуниверситета (2005-2007); VI Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», посвященной 65-летию ОмГУ (г. Омск, 2007); VI Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2008); XX Международной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения, посвященной 70-летию ИМАШ РАН (г. Москва, 2008); 13-м Всемирном конгрессе ИФТоММ (Мексика, г. Гуанахуато, 2011)

**На защиту выносятся:**

– Алгоритм структурного анализа базовых кинематических цепей и его реализация в виде компьютерной программы.

– Алгоритм генерирования структурных схем базовых кинематических цепей, разработанный на основе выявленных их структурных свойств и его реализация в виде компьютерной программы.

- Алгоритм проверки базовых кинематических цепей на изоморфизм и его реализация в виде компьютерной программы.
- Результаты компьютерных экспериментов по структурному синтезу и анализу базовых кинематических цепей, состоящих из 4, 5, 6, 7 диад и применение этих результатов к кинематическому синтезу механизмов

**Публикации.** По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 11 печатных работ, в том числе в изданиях, включённых в перечень ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, состоящего из 112 наименований и приложений. Основная часть работы содержит: 151 страница, 64 иллюстрации, 30 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** к диссертационной работе обоснована актуальность темы исследования, поставлены цели исследования, описаны методы исследования, дано краткое описание содержания глав диссертации.

**В первой главе** приведен обзор существующих методов классификации, структурного анализа и синтеза механизмов. Представлены сведения о развитии таких методов начиная с 19 века до настоящего времени. Рассмотрены работы различных ученых, занимавшихся указанными вопросами, таких как Г. Монж, Р. Виллис, П.Л. Чебышев, Ф. Рело, П.О. Сомов, Л.В. Ассур, А.П. Малышев, И.И. Артоболевский, Н.С.Васильев, В.В. Добровольский, Г.Г. Баранов, О.Г. Озол, С.Н. Кожевников.

Далее рассмотрено современное состояние вопроса и основные тенденции развития. Проанализированы работы ученых, проводивших исследования в области структурного синтеза, структурного анализа механизмов: Ф. Фрейденштейна, Л. Добрянского, Ф. Гросли, М. Хуана, А. Сони, Е. Таттла, К. Тишлера, Т. Мрутхюнджайа, В.М. Ханга, И.В. Ханга, Д. Сэна, М. Рагхавана, Ф. Харари, Т. Лу, К. Ю, Х. Ли, И. Юна, Д. Уикера, А. Рэйчи, Р. Даби, А. Рао, Х. Баласубраманиана, А. Амбекара, В. Агавала, Э.Е. Пейсаха, Л.Т. Дворникова, А.И. Смелягина и др.

Отмечена общая тенденция в данной области науки к решению задач структурного анализа и синтеза механизмов с привлечением строго формализованных математических моделей, содержащих информацию о структурных свойствах объектов, что создает возможности для разработки эффективных методов исследования проблемы. Выделены две основные задачи, которые необходимо решить на пути создания методов синтеза. Во-первых, это генерирование всех возможных кинематических цепей, удовлетворяющих определенным требованиям. Во-вторых, это эффективный отбор неизоморфных представителей среди полученных структур для формирования базы данных. В заключение главы сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** изложены теоретические основы развиваемого подхода. В основу выполненных исследований положены результаты, полученные в работах Н.Н. Крохмаля. Исходным объектом являются группы Ассур, звенья которых соединены между собой вращательными кинематическими парами – плоскими шарнирами. В общем случае группа Ассур содержит звенья с двумя кинематическими парами – это стержни, и звенья, у которых более двух шарниров – это базовые звенья. Для унификации строения кинематических цепей базовые звенья представлены как фермы, состоящие из стержней, соединенных между собой шарнирами так, чтобы базовое звено было разбито на жесткие треугольники (рис.1).

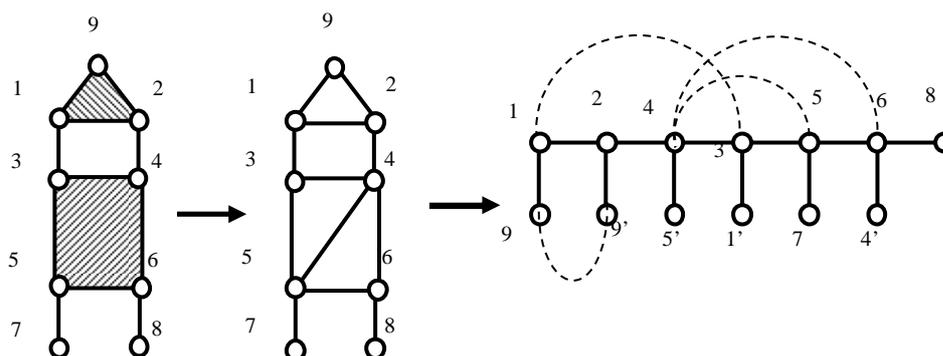


Рис.1 – Переход от СГ к БКЦ и её представление в виде системы диад

При такой замене не нарушается соотношение между числом звеньев и числом кинематических пар и образуется *эквивалентная по кинематическим свойствам механическая система, которая определяется как базовая кинематическая цепь (БКЦ)*. Базовой цепи сопоставляется ее графическое изображение – граф. Иными словами граф является математической моделью базовой цепи. В таком графе ребрами являются изображения стержней, а вершинами – точки, соответствующие кинематическим парам. Адекватным описанием математической модели являются структурные матрицы смежности вершин графов. Такие матрицы и содержат информацию о структуре объекта в закодированном виде. Для структурных исследований графов базовых кинематических цепей введена операция расщепления вершины, которая состоит из двух действий: 1) понижение степени вершины путем устранения инцидентного ребра, 2) размещение на устраненном ребре новой вершины (рис.1). Исследования структуры БКЦ показали, что любую цепь можно составить из простейших механических рычажных цепей – диад, которые образуют между собой прямые и обратные связи. Предварительные эксперименты по разложению БКЦ в систему диад позволили выдвинуть гипотезу о том, что любую БКЦ можно представить как дихотомическую цепь с прямыми и обратными связями между диадами (рис.1). Для математической модели построение указанной дихотомической цепи соответствует нахождению пути Гамильтона между внутренними вершинами графа БКЦ.

Если любой граф БКЦ путем операции расщепления вершин можно представить в виде дихотомической цепи, то из такой цепи путем обратных действий можно получить граф БКЦ или граф последовательно соединенных базовых цепей.

Задача отбора неизоморфных представителей из синтезированных графов БКЦ является неотъемлемой частью задачи структурного синтеза. Хотя выявление изоморфизма является типовой задачей теории графов и известно, что матрицы смежности изоморфных графов различаются только порядком расположения столбцов и строк, общего метода решения данной проблемы до настоящего времени не существует. В данной работе используются для исследования графов БКЦ на изоморфизм два метода. Первый метод (Мрутхюнджайа (T.S. Mruthyunjaya), Рагхаван (M.R. Raghavan)) основан на сравнении характеристических многочленов матриц смежности вершин графов. Несмотря на то, что данный метод относительно прост и дает хорошие результаты, имеются сведения о том, что в некоторых случаях его применение дает ошибочные результаты. С другой стороны, сведений об ошибочности результатов применительно к графам структурных групп не имеется. С учетом вышесказанного необходимым является сопоставление результатов проверки графов на изоморфизм, осуществленной различными методами. Поэтому, автором был разработан второй оригинальный метод. Идея метода состоит в поэтапном сравнении параметров, характеризующих структуру графов БКЦ. На первых этапах применяются наиболее простые критерии наличия изоморфизма, не требующие сложных и объемных вычислений. И только в случае, если их применение не дает однозначного ответа на вопрос об изоморфизме двух графов последовательно применяются более сложные и точные критерии.

Описанные структурные свойства базовых кинематических цепей и их математических моделей являются основой для реализации поставленных целей научного исследования.

Описанные структурные свойства базовых кинематических цепей и их математических моделей являются основой для реализации поставленных целей научного исследования.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена детальной разработке алгоритмов обработки информации математических моделей для структурного анализа и синтеза базовых кинематических цепей рычажных механизмов на основании методов, изложенных в предыдущей главе. В качестве математических моделей БКЦ приняты их условные графические изображения, которые являются математическими объектами, т.е. графами. Аналитическое описание математических моделей осуществляется с помощью матриц смежностей вершин, матриц инцидентности вершин и рёбер и цикловых матриц.

Алгоритм обработки информации графовых моделей для структурного анализа базовых кинематических цепей основывается на стандартном понятии Гамильтонова пути между внутренними вершинами их графов. При практической реализации алгоритма использован способ построения последовательности вершин Гамильтонова пути с возвратом к предыдущей



(1, 2, 3, 4, 5, 6), т.е. операция совмещения вершин является обратной к операции расщепления вершин. Исходному графу всегда можно сопоставить матрицу смежности (рис.4). Такая матрица содержит  $(2d+1)$  столбцов и  $d$  строк, где  $d$  – число диад исходного графа. В исходном графе пронумерованы сначала внутренние

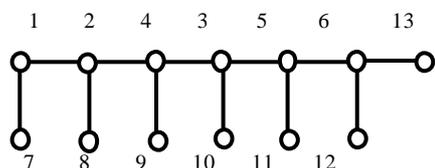


Рис.3 – Исходный граф

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	X	E					1	X	X	X	X	X	X
2	X	X	E					1	X	X	X	X	X
3		X	X	E					1	X	X	X	X
4			X	X	E					1	X	X	X
5				X	X	E					1	X	X
6					X	X						1	i

Рис.4 – Матрица исходного графа

вершины, затем висячие вершины. Матрица поэтому состоит из двух половин. В левой части матрицы расположены столбцы с номерами внутренних вершин, а в правой части – с номерами висячих.

Генерирование новых структур БКЦ производится посредством операции совмещения вершин в исходном графе и соответствует перемещению «1» вдоль строки из правой части исходной матрицы в какую-либо свободную клетку левой части. Таким образом, синтез графов БКЦ сводится к перебору вариантов размещения «1» в левой части матрицы, путем их перемещения из правой части. Перемещение «1» в пределах правой части матрицы не является основополагающим, потому что соответствует образованию начальной вершины высшей степени и является частным случаем.

Из исходного графа можно получить как граф БКЦ, так и графы более сложных кинематических цепей. Имеет практический смысл синтезировать базовые кинематические цепи отдельно. Очевидно, что при этом на перемещение «1» в исходной матрице накладываются некоторые ограничения. Во-первых, в правой половине исходной матрицы всегда должно оставаться не менее четырех «1», соответствующих четырем внешним кинематическим парам, за исключение случая, когда исходных граф содержит три диады. Во-вторых, БКЦ должна быть «неразделимой». В графе БКЦ все внутренние вершины охвачены обратными связями – это её признак, соответствующий тому, что понимается под термином «неразделимая» для групп Ассур. Наличие обратных связей в БКЦ, перекрывающих все вершины в её графе, соответствует тому факту, что уравнения, описывающие связи между вершинами в ней образуют единую систему уравнений, не распадающуюся на подсистемы, которые можно решать отдельно и последовательно друг за другом. В-третьих, в графе БКЦ не может быть двойных дуг, что означало бы наличие в кинематической цепи дублирующих звеньев. Поэтому в левой половине матрицы смежности графа БКЦ не должно быть «1», симметрично расположенных относительно главной диагонали.

Алгоритмы проверки полученных структур на изоморфизм. Как уже отмечалось, одной из основных задач при структурном синтезе является выявление возможного изоморфизма графов кинематических цепей. Для сравнения результатов и проверки их надёжности разработаны два алгоритма, в которых использованы два различных метода для проверки графов БКЦ.

Первый алгоритм для исследования графов БКЦ на изоморфизм разработан на основе известного метода сравнения коэффициентов характеристических многочленов полных матриц смежности рассматриваемых графов. Характеристический многочлен матриц имеет вид:

$$a_0x^n + a_1x^{n-1} + a_2x^{n-2} + \dots + a_{n-1}x + a_n, \quad (1)$$

где  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  – коэффициенты,  $n$  – число вершин графа.

Коэффициенты вычисляются с помощью формул Бохера:

$$a_0 = 1;$$

$$a_j = \frac{1}{j} \sum_{r=1}^j a_{j-r} s_r, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$\text{где } s_r = \text{Tr}(A^r)$$

Таким образом, для вычисления коэффициентов характеристического многочлена организуется вычисление матриц степеней от  $A$  до  $A^n$ , затем следов полученных матриц, после чего вычисляются коэффициенты по приведенным формулам (2).

Например, на рисунках 5 и 6 представлены графы и их матрицы вершин.

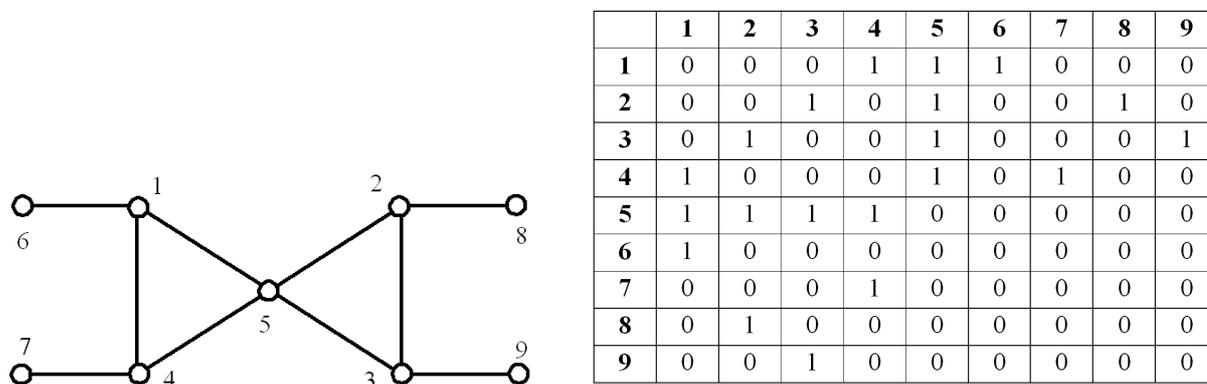


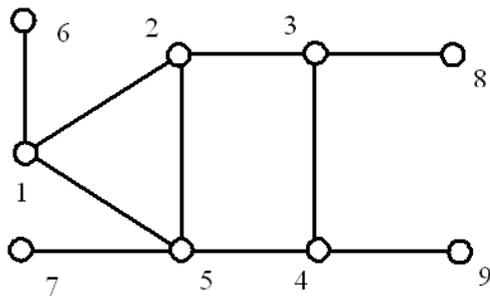
Рис.5 – Граф БКЦ и его структурная матрица смежности вершин

Характеристические многочлены для этих графов, вычисленные с помощью формул (2), имеют различия между коэффициентами.

$$x^9 - 10x^7 - 4x^6 + 27x^5 + 12x^4 - 22x^3 - 4x^2 + 5x,$$

$$x^9 - 10x^7 - 2x^6 + 25x^5 + 4x^4 - 19x^3 - 2x^2 + 4x.$$

Следовательно, графы неизоморфны.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
2	1	0	1	0	1	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	0	0	1	0
4	0	0	1	0	1	0	0	0	1
5	1	1	0	1	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Рис.6 – Граф БКЦ и его структурная матрица смежности вершин

Второй алгоритм (рис. 7) выявления изоморфных графов БКЦ является комплексным. Алгоритм основан на методе непосредственного изучения структурных особенностей графов, а значит и самих кинематических цепей, представленных данными графами.

Основные этапы разработанного метода следующие:

1. Оценка изоморфизма при помощи сравнения расширенных векторов степеней вершин графов.
2. Оценка изоморфизма графов путем исследования окрестностей их вершин и разделения вершин на классы.
3. Оценка изоморфизма графов на основе изучения и сравнения их циклического строения.

Алгоритм анализа информации, основанный на предложенном методе, предусматривает следующий порядок действий. Вектор степеней вершин графа представляет собой упорядоченный в порядке неубывания структурированный набор данных с числом элементов, соответствующим количеству вершин данного графа. При этом значение каждого элемента вектора соответствует значению степени одной из вершин графа. В данном случае вектор степеней графа представлен в расширенном виде, а именно: для каждой вершины указывается не только ее степень, но и смежность данной вершины с какой либо из висячих (начальных) вершин.

На следующем этапе использован приём, предложенный Э.Е. Пейсахом, который был модифицирован для использования в рамках предложенного алгоритма. Данный приём заключается в последовательном разбиении вершин графа на классы, каждый из которых состоит из вершин, имеющих равные степени. Степень вершины определяется количеством ребер, связывающих данную вершину с остальными вершинами графа.

Далее изучается циклическое строение графов. Под циклическим строением понимается число циклов различной длины, содержащихся в графе. Т.к. при операции совмещения вершин, приводящей к синтезу кинематической цепи, образуются циклы, то количество и длина таких циклов являются одними из основных признаков изоморфизма графов. Для определения циклов используется понятие остова графа. Из теории графов известно, что при добавлении к остову графа недостающих ребер (хорд) образуются циклы. При исследовании всех возможных остовов, выявляются

все возможные варианты циклов. При исследовании графов на изоморфизм рассматриваются независимые циклы. Поэтому из полученных наборов циклов выбирается тот, который имеет наименьшую сумму длин, входящих в него циклов.

По результатам сравнения признаков, описанных выше, делается вывод об изоморфизме (неизоморфизме) графов, без учета расположения висячих вершин. Такие вершины и инцидентные им ребра не оказывают определяющего влияния на внутреннюю структуру графа. Однако очевидно, что присоединение висячей вершины к той или иной внутренней вершине, тем не менее, вносит изменения в структуру графа. Висячие вершины обладают специфическими свойствами, поэтому применение для изучения их расположения методов, описанных выше, оказывается неэффективным. В связи с этим предложен новый способ. Суть которого состоит в следующем. В каждом из исследуемых графов выделяются подграфы, содержащие только вершины, смежные с висячими вершинами. Далее определяется количество всех путей длины от 2 до  $n$  (где  $n$  – число вершин подграфа), исходящих из вершин различных классов. Для этого используется известное из теории графов свойство полной матрицы смежности  $A$  любого графа: при ее возведении в какую-либо степень, например  $m$ , получается матрица, каждый элемент  $A^m(i,j)$  которой представляет собой количество путей длины  $m$ , проведенных из вершины  $i$  в вершину  $j$ .

**Четвертая глава** диссертации посвящена проведению компьютерных экспериментов по структурному анализу и синтезу базовых кинематических цепей при помощи созданного автором программного обеспечения, базирующегося на разработанных алгоритмах, описанных в третьей главе.

*Структурный анализ.* Как уже отмечалось, разложение БКЦ в дихотомическую цепь соответствует нахождению Гамильтонова пути между внутренними вершинами. Для этих целей разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет визуально вводить в компьютер и редактировать данные о структуре БКЦ и находить все возможные Гамильтоновы пути. При этом имеется возможность задания ограничений для решения различных задач анализа. В качестве объектов для компьютерных экспериментов по структурному анализу кинематических цепей были взяты схемы групп Ассура, приведенные в статье Э.Е. Пейсаха «Каталог восьмизвенных плоских групп Ассура», опубликованной в журнале «Теория механизмов и машин», №2, 2007, том 5. Параметры каждой группы посредством элементов интерфейса программы структурного анализа передавались в компьютер. После чего программа находила все возможные пути Гамильтона, начинающиеся в различных вершинах графа и отвечающие указанным выше условиям.

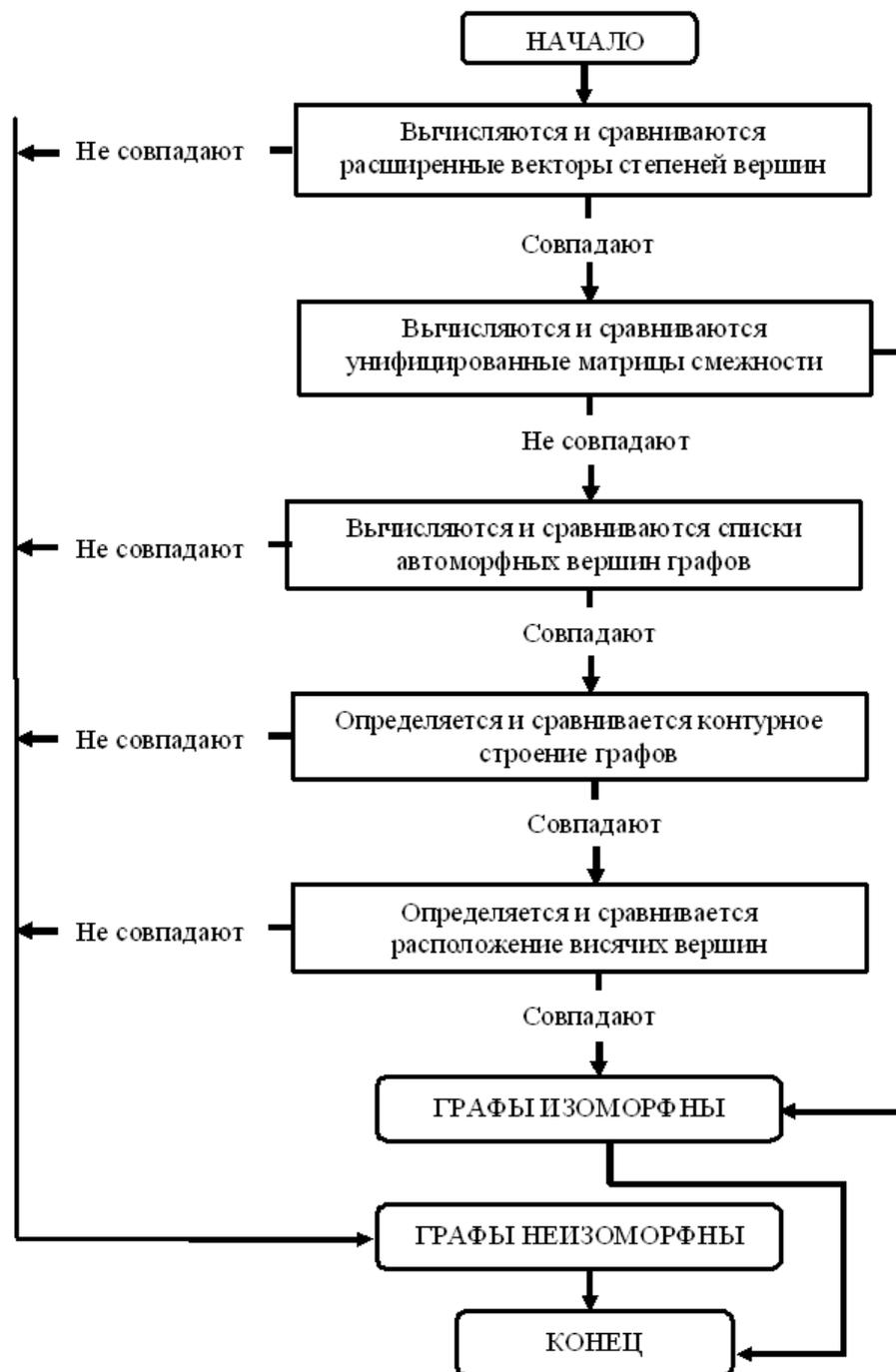


Рис.7 – Блок-схема алгоритма обработки информации о строении графов комбинированного метода проверки БКЦ на изоморфизм

Эксперименты, в частности, подтвердили, что не из любой вершины графа может быть построен путь Гамильтона и не любой путь Гамильтона соответствует разложению БКЦ в дихотомическую цепь. Так, например, если какие-либо циклы графа не имеют общего ребра, а имеют лишь общую вершину, то из такой вершины Гамильтонов путь построен быть не может.

Для всех БКЦ, соответствующих упомянутым выше группам Ассур, были получены варианты разложения.

Кроме того, эксперименты по разложению в дихотомическую цепь были проведены и для отдельных более сложных базовых кинематических цепей. Результаты анализа показали возможность разложения цепей. Таким

образом, проведенные эксперименты подтверждают гипотезу о возможности разложения БКЦ в дихотомическую цепь. Этот факт даёт возможность использования результатов структурного анализа при выполнении кинематического анализа и кинематического синтеза плоских рычажных механизмов.

**Структурный синтез.** Разработанные алгоритмы и программное (Рис. 8, 9) обеспечение дали возможность провести компьютерные эксперименты по структурному синтезу базовых кинематических цепей. Синтез проводился из исходных графов, состоящих из 5, 6, 7 и 8 диад. Результаты показали, что цепей, синтезированных из исходного графа с 5 диадами, существует 18, из них 4 неизоморфны. Для 6 диад – 250, из них 27 неизоморфны. Для 7 диад – 4449, из них 250 неизоморфны, для 8 диад – 105068 из них 3865 неизоморфны.

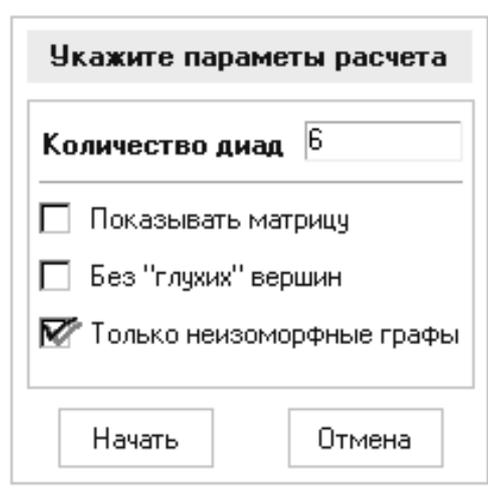


Рис. 8 – Окно ввода исходных данных для генерирования структур БКЦ

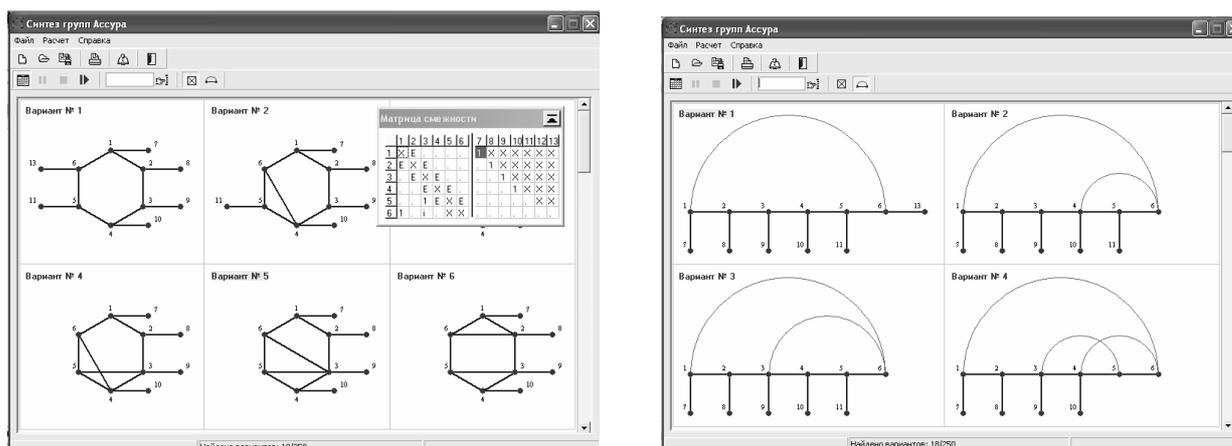


Рис. 9 – Результаты работы программы в виде графов, структурных матриц и линейных графов

На основании результатов структурного синтеза составлен каталог, содержащий все возможные структурные схемы БКЦ, состоящих из 5, 6, 7 и 8 диад. В виду значительного количества таких структур каталог представлен

в виде электронной базы данных. Данный каталог постоянно расширяется. В настоящее время он содержит порядка 4000 структурных схем базовых кинематических цепей и может быть использован в экспертных компьютерных системах.

Применение результатов структурного анализа для кинематического синтеза шарнирного направляющего четырехзвенника робота-манипулятора. Рассмотренные теоретические исследования в рамках предлагаемого подхода имеют практическое значение т.к. вопросы кинематического синтеза рычажных механизмов непосредственно связаны с их структурными свойствами. Это обстоятельство рассмотрено на примере синтеза направляющего механизма.

В общем случае задача синтеза направляющего шарнирного четырехзвенника (рис. 10), состоит в следующем. Имеется некоторая кривая  $y = f(x)$ , которая может быть задана своим уравнением или таблицей значений её координат  $x$  и  $y$ . Требуется определить размеры звеньев и положение механизма, на шатуне которого имеется точка  $C$ , описывающая кривую, мало отличающуюся от заданной кривой на некотором участке или на всём протяжении. Подлежат определению следующие параметры: линейные -  $a, b, c, d, L, L2, L3, R$  и углы -  $W, \alpha$ . Синтез направляющего механизма проводится на основании передаточной функции диады.

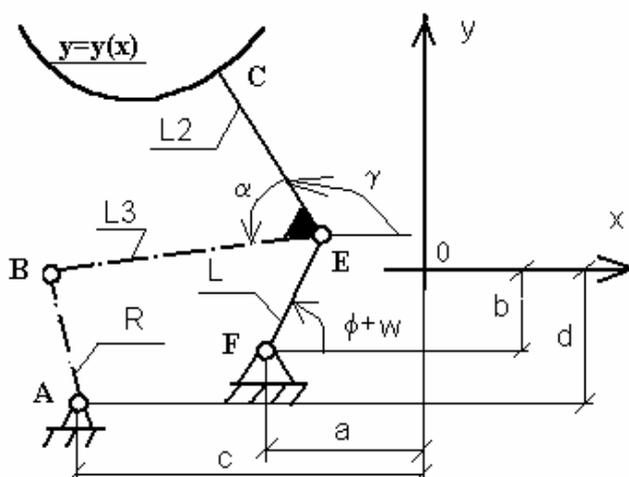


Рис. 10 – Схема механизма, состоящего из двух диад

Структурный анализ показывает, что механизм состоит из двух последовательно соединённых диад  $CEF$  и  $EBA$ , без обратных связей, поэтому синтез выполняется последовательно для каждой диады отдельно. На первом этапе варьируются параметры  $L$  и  $W$ , а в результате квадратичного синтеза определяются параметры  $a$  и  $b$ . На втором этапе варьируются параметры  $L3$  и  $\alpha$ , а в результате квадратичного синтеза определяются параметры  $R$  и координаты точки  $A$ .

Предложенный метод квадратично-оптимизационного синтеза направляющего механизма, основанный на понятии передаточной функции плоской диады, позволяет выполнить декомпозицию задачи и понизить размерность задачи с 9 до 2, а также выбрать начальные приближения длин звеньев механизма в рамках самого метода.

Применение результатов структурного анализа для кинематического синтеза шарнирного восьмизвенного механизма промышленного робота

Задачей кинематического синтеза является определение геометрических параметров звеньев с целью обеспечения в общем случае заданного движения определённого звена (звеньев) механизма и обеспечения требуемой траектории движения определённой точки (точек), принадлежащей какому-либо звену (звеньям) механизма.

На рис.11 приведена схема механизма, на которой шарниры обозначены числами, а рычаги обозначены двумя числами, соответствующими номерам шарниров, которые образует тот или иной рычаг.

Положение входного звена (3-4-10) задаётся обобщённой координатой – углом ( $\varphi + \varphi_0$ ). Требуется определить длины всех рычагов и углы начальных положений входного -  $\varphi_0$  и выходного -  $\theta_0$  звеньев, таким образом, чтобы точка 0 двигалась по заданной траектории, описываемой заданной функцией  $S=S(\varphi)$ , а выходное звено (7-8-9) совершало вращательное движение в соответствии с заданным законом  $\theta=\theta(\varphi)$  при  $\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$ .

Рычажный механизм образуется как механическая цепь последовательно соединённых диад и входных (выходных) рычагов (по числу степеней подвижности механизма). Диады образуют между собой прямые и обратные связи

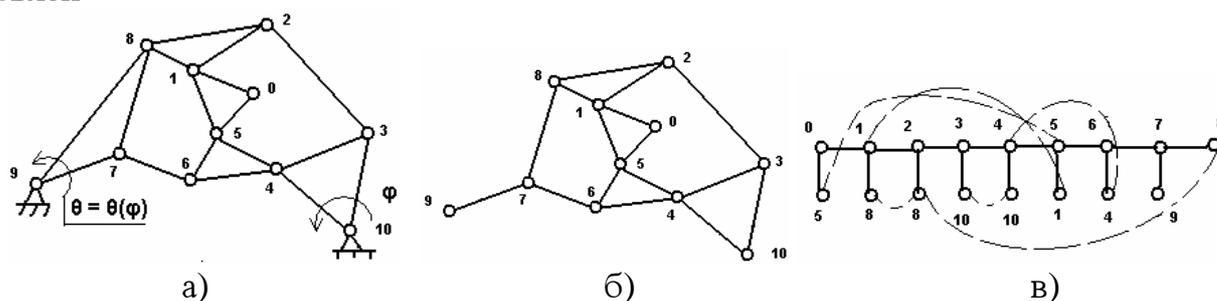


Рис. 11 – Структурная схема механизма – а), его БКЦ - б) и разложение графа БКЦ в дихотомическую цепь - в).

На первом этапе кинематического синтеза необходимо выполнить структурный анализ механизма, т.е установить в его составе входные звенья и базовые кинематические цепи и выполнить структурный анализ базовых кинематических цепей. Результаты структурного анализа БКЦ служат основой для проектирования механизма, т.е для определения его размеров.

Расчёт показывает, что механизм имеет одну степень подвижности, следовательно, и один входной рычаг. Выберем рычаг 8-9 в качестве входного.

Компьютерный структурный анализ БКЦ (рис. 11) показал, что она может быть разложена в дихотомическую цепь 64 вариантами.

Для заданных условий движения механизма необходимо выбрать вариант разложения из вершины 0, т.к. эта вершина является выходной и её закон движения необходимо обеспечить. Для этой вершины существуют два варианта с входной вершиной 9. Выберем первый из них, представленный на рис. 11.

Каждая диада является простейшим преобразующим механическим устройством с двумя входами (внешние кинематические пары) и одним выходом (внутренняя кинематическая пара). На входы «подаются» сигналы (скорости, перемещения) с одними значениями, а на выходе они «снимаются» с преобразованными значениями. Каждая диада обладает передаточной функцией.

Общая передаточная функция механизма составляется по результатам структурного анализа БКЦ из передаточных функции всех диад, входящих в его состав и является системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) относительно координат точек, в которых располагаются шарниры. В результате решения ОДУ (задачи Коши) определяются траектории движения кинематических пар механизма.

Задача кинематического синтеза механизма заключается, таким образом, в том, чтобы при решении ОДУ выбрать такие начальные условия, которые бы обеспечивали требуемые траектории движения кинематических пар при постоянстве длин всех рычагов механизма. Выбор начальных условий интегрирования системы осуществляется путём глобальной оптимизации целевой функции, построенной определённым образом. Синтез такого механизма был успешно выполнен, его результаты отражены в работе [10].

В **приложении** к диссертации приведены документы, подтверждающие практическую ценность и апробацию разработок, изложенных в диссертационной работе.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе предложены и исследованы алгоритмы обработки информации математических графовых моделей для структурного анализа и синтеза базовых кинематических цепей рычажных механизмов промышленных роботов и манипуляторов.

Теоретические исследования и компьютерные эксперименты, проведённые по результатам теоретических исследований, позволяют сформулировать следующие выводы и результаты:

1. Введено понятие базовой кинематической цепи (БКЦ) на основе установленного структурного свойства базовых кинематических цепей, а именно наличия обратных перекрывающихся связей в системе диад.
2. Разработан алгоритм обработки информации для структурного анализа базовых кинематических цепей на основе их графовых моделей. Особенностью алгоритма является анализ возможных путей Гамильтона в графе с учётом особенностей строения БКЦ.
3. Разработан алгоритм генерирования всех возможных базовых кинематических цепей плоских рычажных механизмов, образованных из исходного графа, содержащего заданное число диад.
4. Разработан метод и алгоритм обработки информации структурных матриц БКЦ для комплексного исследования их изоморфизм. Предложенный

метод и алгоритм основаны на выявленных закономерностях структурных матриц БКЦ.

5. Разработанное программное обеспечение для обработки информации математических моделей позволяет установить порядок построения диад и обратные связи в рычажной кинематической цепи механизмов роботов и манипуляторов с любым числом звеньев.

6. Разработанное комплексное программное обеспечение для обработки информации математических моделей БКЦ может служить средством создания базы данных для экспертной системы для принятия решений в процессе проектирования механизмов роботов и манипуляторов.

7. Показана эффективность использования разработанных алгоритмов и программного обеспечения для структурного анализа БКЦ при решении задач кинематического синтеза плоских рычажных механизмов манипуляторов на примере шарнирного направляющего четырёхзвенника и восьмизвенного механизма со сложной координацией движения звеньев.

## **НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Крохмаль О.Н. Разработка алгоритма и компьютерной программы структурного синтеза групп Ассур // Сборник научных трудов аспирантов и соискателей Курганского государственного университета, Курган, 2005. – С.22-23.

2. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки №. гос. рег. 50200401242, «Геометрический синтез плоского шарнирного четырехзвенного направляющего механизма» (SFLMGP) // Крохмаль Н.Н., Крохмаль О.Н. / Дата регистрации 27.10.2004.

3. Свидетельство № 5351 об отраслевой регистрации разработки, «Программа структурного синтеза групп Ассур» (Synthesis) // Крохмаль Н.Н., Крохмаль О.Н./ Дата регистрации 21.11.2005.

4. Крохмаль О.Н., Крохмаль Н.Н., Дровозов Г.П. Программное обеспечение для изучения задачи синтеза кинематических цепей рычажных механизмов. – Известия Челябинского научного центра, вып. 4(34), 2006.

5. Крохмаль О.Н., Крохмаль Н.Н. Изучение задачи структурного синтеза кинематических цепей рычажных механизмов с помощью компьютерного моделирования // Динамика систем, механизмов и машин: Сб. материалов VI Междунар. науч.- техн. конф. – Омск: ОмГТУ, 2007. – Кн.3. – С.53-57.

6. Крохмаль Н.Н., Крохмаль О.Н. Структурный анализ кинематических цепей рычажных механизмов. – Вестник Курганского госуниверситета, 2008.

7. Крохмаль Н.Н., Крохмаль О.Н. Структурный синтез кинематических цепей рычажных механизмов. – Вестник Курганского госуниверситета, 2008.

8. Крохмаль О.Н. Разработка методов анализа и синтеза групп Ассур на основе их диадного представления // Высокие технологии, фундаментальные исследования, промышленность: Сб. материалов VI Междунар. науч.- практич. конф. – СПб, 2008.

9. Крохмаль О.Н. Разработка методов анализа и синтеза групп Ассур на основе их диадного представления // Сб. материалов XX Международной интернет-ориентированной конференции молодых ученых и студентов. – М., 2008.

10. Крохмаль Н.Н., Крохмаль О.Н. Метод оптимизационного кинематического синтеза плоских рычажных механизмов на примере восьмизвенного механизма. - Вестник ЮУрГУ, серия машиностроение», выпуск, 17 № 11(228), 2011 год.

11. Krokhmal N.N., Krokhmal O.N. Structural analysis and synthesis of Assur groups based on their topological properties. Proceedings of 13th World Congress on the TMM. – Mexico, Guanajuato, 2011.

---

Подписано в печать 10.11.11. Формат 60x80 1/16. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 0,95. Уч. изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 312

---

–  
Редакционно-издательский центр КГУ  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25  
Курганский государственный университет