

На правах рукописи

**Кикин Антон Андреевич**

**ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ШЕСТИЗВЕННЫХ  
НАПРАВЛЯЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ МАШИН  
ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность: 05.02.18 – Теория механизмов и машин

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

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Энтин Виталий Яковлевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
Елимелех Игорь Моисеевич

– кандидат технических наук, доцент  
Егоров Иван Михайлович

Ведущая организация – ООО «Формаш-Нева», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «28» декабря 2010 г. в 18:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, 1 учебный корпус, ауд. 425.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
e-mail: a.evgrafov@spbstu.ru



Евграфов А.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для привода рабочих органов современных технологических машин широко используются рычажные механизмы (РМ) т.к. они могут обеспечить высокое быстродействие и точность движения рабочих органов. Отличительными особенностями современных технологических машин, используемых, например, в легкой промышленности, является:

- высокая скорость движения рабочих органов машины;
- высокая точностью и согласованность взаимодействия друг с другом различных рабочих органов (например, взаимодействующие игольницы, ушковины и платины в трикотажных машинах), приводимых от главного вала машины, в соответствии с заданными технологическими циклограммами;
- сложный характер движения рабочих органов – во многих машинах за один цикл движения может требоваться одна или две остановки заданной продолжительности в заданных положениях;
- рабочие органы многих технологических машин должны двигаться по сложным траекториям.

При проектировании многозвенных приводных РМ для реализации сложных законов движения весьма трудоёмкой задачей является синтез кинематической схемы РМ. Кинематический синтез РМ, особенно с числом звеньев больше четырех, представляет собой сложную научную задачу. Известные аналитические и оптимизационные методы синтеза достаточно сложны, громоздки и не обеспечены единой методологической базой. Фирменные методы и средства синтеза часто недоступны (являются «ноу хау») или очень дороги.

Существующие системы автоматического проектирования (САПР) машиностроительного профиля ориентированы в первую очередь на автоматизацию разработки чертежной документации и на проектирование типовых деталей и узлов машин. Практически неизвестны САПР, позволяющие автоматизировать проектирование многозвенных рычажных механизмов.

Поэтому актуальной является разработка алгоритмов, методов и специальных пакетов программ, ориентированных на проектирование высокоточных и скоростных РМ со сложными законами движения выходного звена, определяемыми технологическим циклограммами.

Работа над диссертацией велась в соответствии с планом выполнения аналитической ведомственной целевой программы «Развитие потенциала высшей школы (2006–2008 годы)», подраздел 2.1.2 «Проведение фундаментальных исследований в области технологических наук» по теме РНП 2.1.2.1286 «Развитие теории и методов оптимального структурно-кинематического и динамического синтеза механизмов технологических машин с нелинейными характеристиками». В 2007–2009 гг. работа также велась в соответствии с планом госбюджетных работ по теме Лентек 1.2.07 «Теория структурно-кинематического и динамического анализа и синтеза механизмов с нелинейными характеристиками», а в 2010 г. – по теме Лентек 1.2.10

«Исследование новых задач динамики и структурно-кинематического синтеза механизмов и приводов цикловых технологических машин».

**Цели и задачи работы.** Целью диссертации является разработка методов оптимизационного синтеза рычажных приводных механизмов, например, для машин легкой промышленности. Для достижения цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- разработка методов и алгоритмов синтеза двухопорных шестишвенных шарнирных направляющих механизмов, предназначенных для привода рабочих органов технологических машин. Разрабатываемые методы и алгоритмы ориентированы на использование современной вычислительной техники. В качестве примера, разработанные методы были проверены на задачах синтеза приводных механизмов для машин легкой промышленности;

- анализ кинематических схем механизмов машин легкой промышленности и выявление направлений в области синтеза РМ, требующих развития;

- создание электронной базы данных (электронный каталог-справочник) по РМ и подсистемы кинематического анализа РМ.

**Методы исследований.** Применялись методы теории механизмов и машин, аналитические и численные методы, методы аналитико-оптимизационного синтеза, компьютерного моделирования и программирования.

**Научная новизна** работы определяется тем, что впервые:

- разработан метод и алгоритм аналитико-оптимизационного поэтапного синтеза двухопорного шестишвенного шарнирного направляющего механизма (ШШМ) структурного типа Стефенсон 1 с определением до 12 параметров кинематической схемы;

- разработан метод и алгоритм аналитико-оптимизационного поэтапного синтеза двухопорного направляющего ШШМ структурного типа Уатт 1 с определением до 12 параметров кинематической схемы;

- разработана электронная база данных (БД) рычажных приводных механизмов для технологических машин различного назначения;

- разработана система управления базой данных (СУБД) рычажных механизмов для современных компьютерных платформ, обладающая высокой функциональностью.

**Практическая значимость результатов работы.** Научные положения работы доведены до практической реализации в виде пакетов прикладных программ, предназначенных для решения задач синтеза и анализа РМ. Применение результатов работы обеспечивает сокращение времени и улучшение качества при проектировании или модернизации технологического оборудования, имеющего приводные рычажные механизмы, за счет использования возможностей современных ЭВМ.

Материалы диссертационной работы и разработанное программное обеспечение используется в СПГУТД для научной работы, а также в курсовом и дипломном проектировании, на кафедрах «Машиноведения», «Теоретической и

прикладной механики» и «Автоматизации производственных процессов».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих четырех научных мероприятиях:

- Международной научно-технической конференции «Современные наукоемкие и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности ПРОГРЕСС – 2008» (Иваново, 2008 г.);
- 10-й Международной конференции по ТММ (Чехия, Либерец, 2008 г.);
- Международный симпозиум по науке о механизмах и машинах «AzC IFToMM 2010» (Турция, Измир, 2010 г.);
- 22-й Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС 2010) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2010 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 6 научных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 150 страниц, в том числе 100 страниц машинописного текста, 20 таблиц, 75 рисунков. Список литературы включает 77 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности развиваемого научного направления, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, сформулирована общая задача исследования.

В **первой главе** проведен обзор научной литературы в области исследований кинематического синтеза РМ с акцентом на вопросы синтеза направляющих механизмов. Большой вклад в развитие современных методов синтеза РМ внесли П.Л. Чебышев, И.И. Артоболевский, Н.И. Левитский, С.А. Чуркудинов, В.А. Зиновьев, Э.Е. Пейсах, Ю.Л. Саркисян, В.И. Доронин и целый ряд других отечественных ученых. Среди зарубежных ученых следует отметить исследования А.Г. Эрдмана, Е.А. Дийксмана, П. Лозе, а также работы ряда японских и китайских специалистов.

Анализ рассмотренных литературных источников показал, что работ, посвященных синтезу направляющих шестизвенных механизмов сравнительно немного

Далее в главе выполнен анализ направляющих приводных механизмов используемых в машинах легкой промышленности. Проведенная классификация этих механизмов по числу звеньев показала, что шестизвенные направляющие РМ встречаются довольно редко, что можно объяснить только отсутствием простых и надежных методов их синтеза.

Далее в главе приводится классификация рычажных механизмов, используемых для привода рабочих органов машин и приведены примеры использования рычажных механизмов для привода рабочих органов машин.

Помимо анализ традиционных источников в научной литературе был проведен обзор и анализ известных современных САПР и их возможностей по кинематическому синтезу и анализу рычажных механизмов. Рассмотрены возможности известных современных систем САПР в смысле возможности решения с их помощью задач синтеза приводных РМ. Все существующие системы автоматизации проектирования можно разделить на следующие три группы: 1) коммерческие САПР, включающие машиностроительные САПР общего назначения; 2) разработки инициативных групп и отдельных исследователей; 3) фирменные средства проектирования, используемые в компаниях, разрабатывающих сложные приводные рычажные механизмы. Хотя информация по этим трем группам САПР сильно отличается по полноте, из проведенного обзора современных САПР видно, что существующие системы автоматического проектирования машиностроительного профиля ориентированы в первую очередь на автоматизацию разработки чертежной документации и на проектирование типовых деталей и узлов машин. Практически неизвестны САПР, позволяющие автоматизировать проектирование многозвенных РМ.

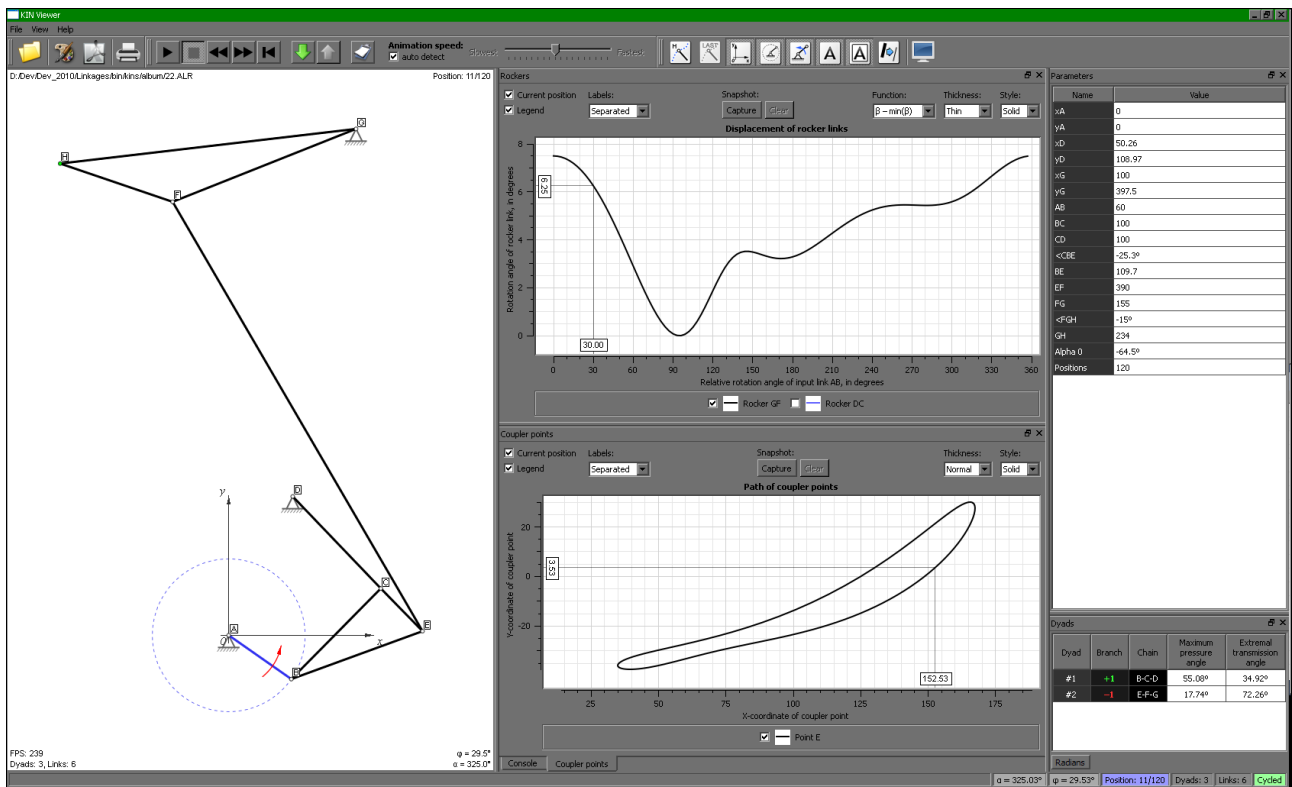
Во второй главе диссертационной работы приведены результаты работы над электронной базой данных по рычажным механизмам.

При проектировании новых приводных рычажных механизмов, обычно используют прототипы из различных справочников, каталогов и альбомов механизмов. Известно большое число справочников, каталогов и других бумажных изданий, содержащих сведения о РМ. Обычно в бумажных каталогах для каждого механизма приводится его кинематическая или полуконструктивная схема, числовые значения постоянных параметров этой схемы (или необходимые соотношения между ними), иногда – краткие сведения о назначении и примерах использования механизма. Ни в одном справочнике нет сведений об углах передачи движения в диадах механизмов, конкретных данных о точности и продолжительности выстоя (выстоев) и т.п., что затрудняет практическое использование бумажных каталогов такого рода.

Указанные недостатки бумажных каталогов, частично могут быть исправлены использованием компьютерных программ кинематического анализа РМ, обзор которых был проведен в первой главе. Наиболее удобным является комбинация программы кинематического анализа и электронной библиотеки механизмов. Впервые такая программа, названная «Альбом механизмов», была разработана в СПГУТД научной группой под руководством проф. Э.Е. Пейсаха в 1995 г. Программа была разработана для операционной системы DOS и имеет довольно скромные графические возможности.

В диссертационной работе представлено продолжение и развитие исследований в области «Альбома механизмов», реализованных в виде БД по механизмам, СУБД и программы «KIN Viewer», предназначенной для кинематического анализа  $n$ -звенных механизмов.

Разработанная электронная база данных РМ насчитывает более 150 механизмов различного технологического назначения из различных источников. В электронную базу данных введен ряд классификационных признаков (число



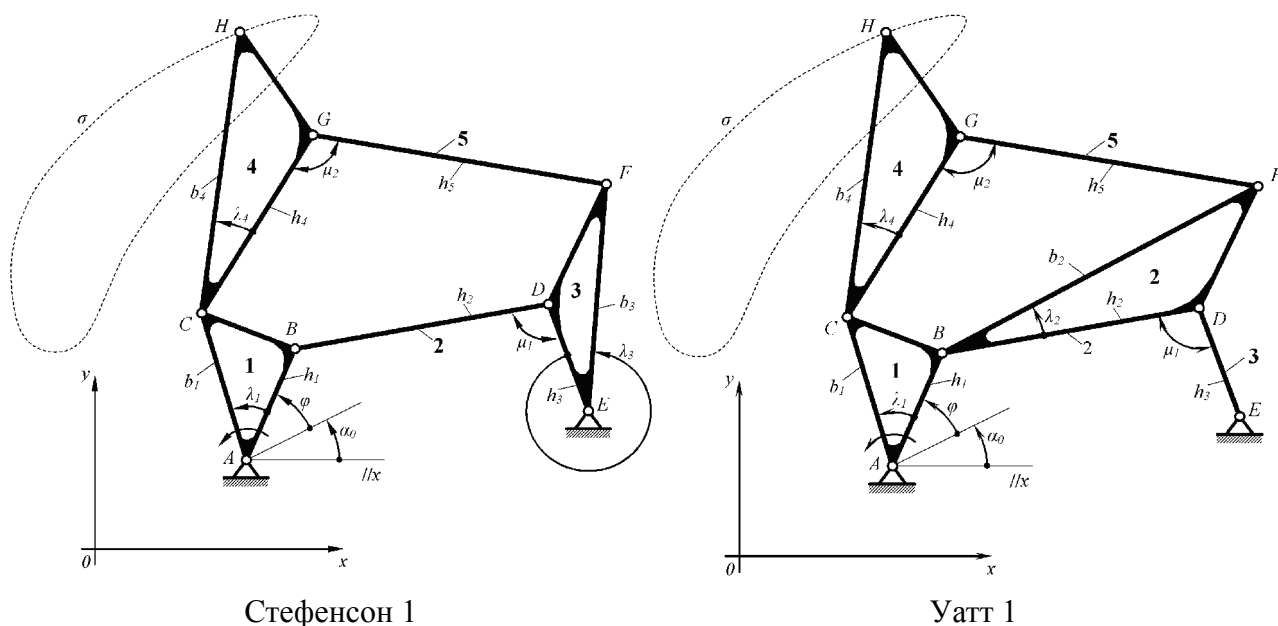
**Рисунок 1. Интерфейс программы «KIN Viewer»**

звеньев, число неподвижных опор, форма траектории, вид функции положения, технологическое назначение машины и др.) для каждого механизма, по которым возможно отбирать механизмы из БД. Например, предусмотрена следующая рубрикация по машинам легкой промышленности: механизмы трикотажных и основязальных машин; механизмы вязально-прошивных машин; механизмы ткацких станков; механизмы гребнечесальных машин; механизмы других машин легкой промышленности; механизмы различного назначения.

Универсальная программа «KIN Viewer» является подсистемой кинематического анализа и визуализации  $n$ -звенных передаточных и направляющих РМ (см. рис. 1). Программа имеет ряд уникальных возможностей, которые обычно не встречаются в известных программах анализа РМ: 1) просмотр анимации и графиков функций положения звеньев механизма для механизмов, претерпевающих разрыв кинематической цепи в процессе движения; 2) изменение вариантов сборок диад механизма; 3) декомпозиция механизма – последовательное удаление диад РМ, начиная с последней; 4) вычисление экстремальных значений углов передачи и давления для всех диад механизма; 5) возможность одновременного просмотра функций положения для всех коромысел и ползунов; 6) показ траекторий промежуточных шатунных точек (для тех РМ где они имеются). Из технических возможностей программы следует отметить возможность работы на системах с несколькими мониторами, а также возможность работы в различных операционных системах: MS Windows, Linux, MacOS, FreeBSD, QNX и других.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена задаче аналитико-оптимизационного синтеза направляющих ШШМ типов Стефенсон 1 и Уатт 1 с рабочими шатунами, присоединенными к входному звену (кривошипу).

**Синтез ШШМ типа Стефенсон 1.** Механизм типа Стефенсон 1 (рис. 2) имеет входное звено 1 ( $ABC$ ) и выходное звено 4 ( $CGH$ ), шатунная точка  $H$  которого воспроизводит траекторию  $\sigma$ . Кинематическая схема ШШМ имеет 15 постоянных параметров:  $x_A, y_A, x_E, y_E, h_1 = AB, \lambda_1 = \angle BAC, b_1 = AC, h_2 = BD, h_3 = DE, \lambda_3 = \angle DEF, b_3 = EF, h_4 = CG, \lambda_4 = \angle GCH, b_4 = CH, h_5 = FG$ .



**Рисунок 2. Двухопорные направляющие ШШМ**

Требуется синтезировать направляющий ШШМ, шатунная точка  $H$  которого должна наилучшим образом воспроизводить заданное движение по кривой  $\sigma$  (см. рис. 2). Требуемый закон движения шатунной точки  $H$  задается  $N$  тройками чисел:  $\{(x_H)_i, (y_H)_i, \varphi_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Задача синтеза состоит в определении значений всех постоянных параметров кинематической схемы ШШМ. Постоянные параметры механизма разделим на назначаемые, вычисляемые и свободные.

Назначаемые параметры: четыре размера  $h_1, h_2, h_3, AE$ , задающие базовый шарнирный четырехзвенник (ШЧ)  $ABDE$ .

Вычисляемые параметры:  $x_A, y_A, x_E, y_E, \lambda_1, b_1, \lambda_3, b_3, h_4, \lambda_4, b_4, h_5$  и  $\alpha_0$ . Кроме того, в алгоритме предусмотрено определение показателя  $r_2$  сборки второй диады  $CGF$ . В алгоритме синтеза вместо декартовых координат  $x_E$  и  $y_E$  удобнее использовать полярные координаты: угол  $\theta = \angle xAE$  и назначенный размер  $AE$ , а вместо параметров  $\lambda_4$  и  $b_4$  – декартовы координаты  $x_{4G}$  и  $y_{4G}$  точки  $G$  в системе координат  $Sx_4y_4$ , жестко связанной с шатуном 4 ( $CGH$ ). Вычисляемые параметры находятся в два этапа, причем шесть параметров находятся по формулам однозначно, один – численным решением уравнения, а остальные искомые параметры являются варьируемыми, т.е. перебираются (сканируются) с использованием специальной интерактивной методики.



Свободные параметры: направление вращения входного звена  $AB$  механизма.

Основное условие синтеза – это воспроизведение синтезированным ШШМ требуемого движения шатунной точки  $H$  по траектории  $\sigma$ . Качество выполнения основного условия будем оценивать по максимальному отклонению  $\delta_{max}$  от заданной кривой:

$$\delta_{max} = \max_{i=1,2,\dots,N} (|HH_i|) \quad (1)$$

Для сужения зоны поиска до механизмов, имеющих практическое значение, задается максимально допустимое отклонение  $(\delta_{max})_{don}$  и отбираются только те синтезированные механизмы, для которых  $\delta_{max} \leq (\delta_{max})_{don}$ .

Дополнительные условия синтеза, связанные конструктивными ограничениями выражаются следующими неравенствами:

$$(b_1)_{min} \leq b_1 \leq (b_1)_{max}; \quad (2)$$

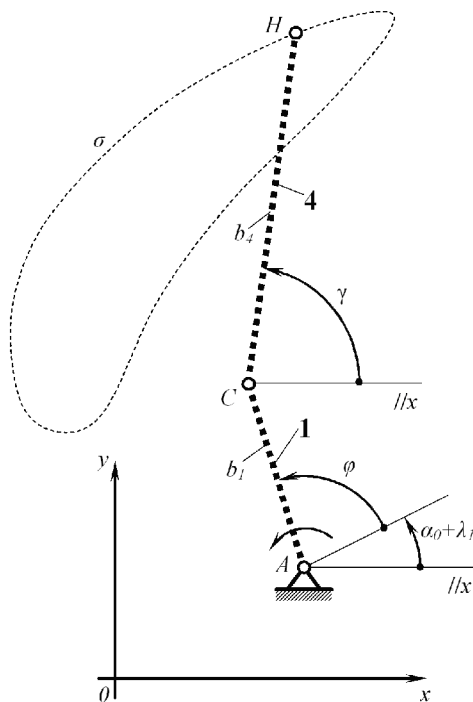
$$(b_3)_{min} \leq b_2 \leq (b_3)_{max}; \quad (3)$$

$$(x_A)_{min} \leq x_A \leq (x_A)_{max}; \quad (y_A)_{min} \leq y_A \leq (y_A)_{max}; \quad (4)$$

$$(x_{4H})_{min} \leq x_{4H} \leq (x_{4H})_{max}; \quad (y_{4H})_{min} \leq y_{4H} \leq (y_{4H})_{max}. \quad (5)$$

В число дополнительных условий синтеза входит также условие благоприятной передачи движения в синтезируемом механизме

$$\mu_{ext} \geq \mu_{don} \quad (0 \leq \varphi \leq \Phi), \quad (6)$$



**Рисунок 3. Первый этап синтеза РМ типов Стефенсон 1 и Уатт 1**

где  $\mu_{don}$  – заданный допускаемый угол передачи в синтезируемом ШШМ.

Алгоритм синтеза направляющего ШШМ основан на разделении задачи синтеза на два последовательно выполняемых этапа.

На первом этапе синтезируется двухзвенная цепь  $ACH$  механизма (см. рис. 3). Исходными данными для синтеза являются  $N$  троек чисел:  $\{(x_H)_i, (y_H)_i, \varphi_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), задающих закон движения шатунной точки  $H$  по траектории  $\sigma$ . Целью синтеза ШШМ на первом этапе является отыскание значений следующих пяти параметров:  $x_A, y_A, b_1, b_4$  и суммы углов  $(a_0 + \lambda_1)$ .

Расстояние  $l_i$  между двумя синхронно движущимися точками  $C$  и  $H$  определяется формулой

$$l_i = C_1 H_1 = \sqrt{((x_A + b_1 \cdot \cos \alpha_i - (x_H)_i)^2 + (y_A + b_1 \cdot \sin \alpha_i - (y_H)_i)^2)} \quad (7)$$

$(i = 1, 2, \dots, N),$

где  $a_i = (a_0 + \lambda_1) + v_1 \cdot \varphi_i$ . Будем считать значение параметра  $(a_0 + \lambda_1)$  известным.

Определим искомые неизвестные из условия наименьшего квадратического отклонения расстояний  $l_i$  (7) от искомого значения постоянного параметра  $b_4$ . Тогда неизвестные  $x_A, y_A, b_1, b_4$  могут быть найдены из условий минимума суммы квадратов взвешенной разности  $S = S(x_A, y_A, b_1, b_4)$ :

$$S = \sum_{i=1}^N (l_i^2 - b_4^2)^2 \quad (8)$$

Все неизвестные можно найти из условия минимума суммы (8):

$$\frac{\partial S}{\partial x_A} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial y_A} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial b_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial b_4} = 0. \quad (9)$$

Решение системы (9) может быть сведено к одному уравнению девятой степени относительно параметра  $b_1$ , ограниченного условием (2), что облегчает численный поиск корней уравнения. Для численного решения этого уравнения используется метод синхронного движения точек (СДТ) и метод автоматического сканирования координат (АСК), предложенные А.Б. Кикиным.

Для оценки качества синтеза двухзвенной цепочки  $ACH$  и отбора результатов на первом этапе синтеза критерием служит величина  $\Delta l_{max} \leq \Delta l_{don}$ , где

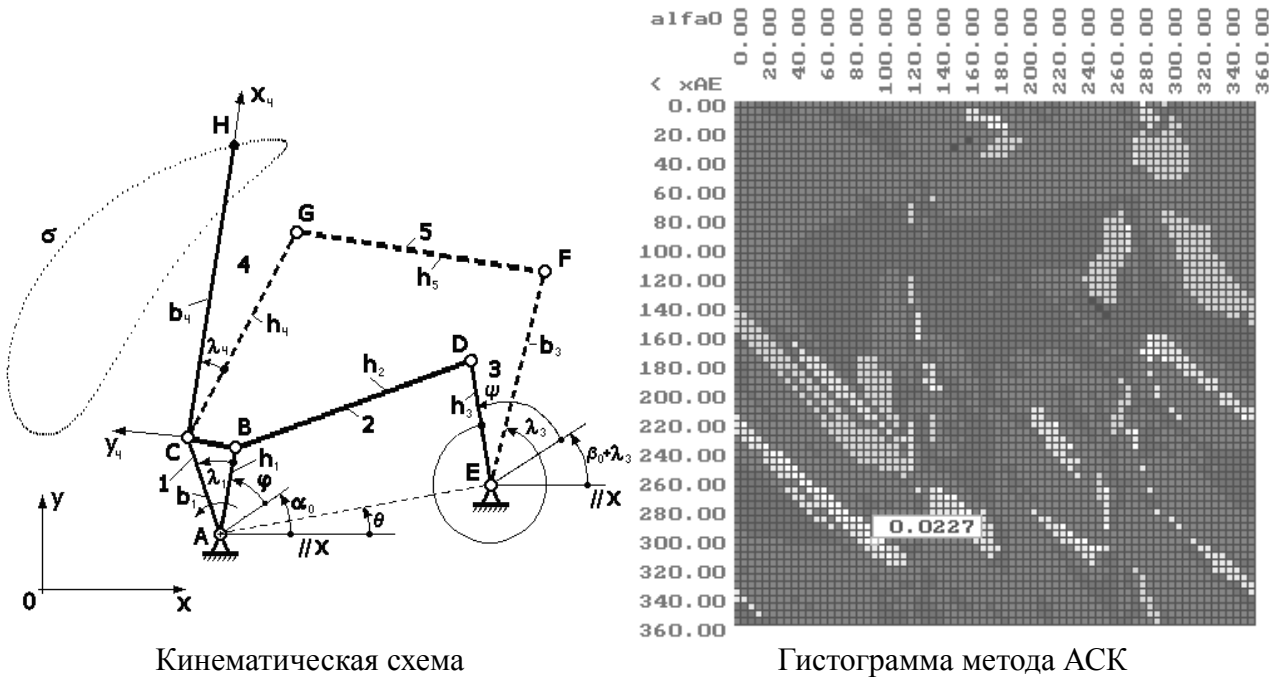
$$\Delta l_{max} = \max_{i=1,2,\dots,N} (|(CH_i - b_4)|) \quad (10)$$

На первом этапе синтеза метод АСК используется в различных вариантах сканирования: а) одного параметра  $(\alpha_0 + \lambda_1)$ , б) двух параметров  $b_1$  и  $(\alpha_0 + \lambda_1)$ , в) двух параметров  $x_A$  и  $y_A$ . Таким образом, на экране дисплея отображается наглядная цветная картина решения задачи условной минимизации критерия (10), например,  $\Delta l_{max} = \Delta l_{max}(x_A, y_A)$  с одновременным учетом ограничения (2). Гистограмма заполняется динамически, являясь одновременно индикатором хода выполнения на ПК процесса синтеза.

После завершения сканирования, когда всё поле гистограммы заполняется клетками соответствующих цветов, программа автоматически находит и отмечает на экране все имеющиеся локальные минимумы по критерию (10), или выдает сообщение об их отсутствии. Пользователь может выбрать любой из найденных программой локальных минимумов, посмотреть и оценить результаты, полученные на первом этапе синтеза и далее принять решение – забраковать этот минимум или запустить для этого локального узла процесс АСК, позволяющий автоматически уточнить сканируемые параметры вплоть до требуемой точности. Затем для любого из найденных локальных минимумов можно перейти ко второму этапу синтеза.

Для выбранного локального минимума, т.е. для некоторого найденного набора значений параметров  $x_A, y_A, b_1, b_4$  и  $\alpha_0 + \lambda_1$  производится расчет параметров плоскопараллельного движения  $\{(x_C)_i, (y_C)_i, \gamma_i\}$  шатуна  $CH$  как функции входного угла  $\{\varphi_i\}$  для  $i = 1, 2, \dots, N$  (рисунок 3).

На втором этапе синтеза методом АСК перебираются два варьируемых параметра: начальный угол  $\alpha_0$  и угол  $\theta = \angle xAE$ , определяющий координаты  $x_E$  и  $y_E$  точки  $E$  (рис. 4). Для каждого сочетания  $\alpha_0$  и  $\theta$  (узла сканирования) производится расчет движения выходного коромысла базового ШЧ  $ABDE$  и



Кинематическая схема

Гистограмма метода АСК

**Рисунок 4. Второй этап синтеза РМ типа Стефенсон 1**

должна быть решена задача синтеза в следующей постановке:

Дано: плоскопараллельное движение  $\{(x_C)_i, (y_C)_i, \gamma_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) шатуна  $CH$  и закон относительного поворота  $\{\psi_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) коромысла  $DE$  вокруг текущего положения неподвижного шарнира  $E$ , заданного координатами  $x_E$  и  $y_E$ ;

Найти: значения неизвестных постоянных параметров  $b_3, \lambda_4, h_4, h_5$ , и суммы углов  $(\beta_0 + \lambda_3)$ . Как уже отмечалось выше, вместо параметров  $\lambda_4$  и  $h_4$  удобнее вычислять координаты  $x_{4G}$  и  $y_{4G}$  точки  $G$ .

Будем считать значение параметра  $(\beta_0 + \lambda_3)$  известным. Тогда неизвестные  $b_3, h_5, x_{4G}$  и  $y_{4G}$  могут быть найдены из условий минимума суммы квадратов взвешенной разности

$$S = \sum_{i=1}^N (l_i^2 - h_5^2)^2. \quad (11)$$

Здесь  $l_i^2 = ((x_E)_i + b_3 \cos \beta_i - (x_G)_i)^2 + ((y_E)_i + b_3 \sin \beta_i - (y_G)_i)^2$ , где  $\beta_i = (\beta_0 + \lambda_3) + \psi_i$ , а  $(x_G)_i$  и  $(y_G)_i$  являются функциями от  $x_{4G}, y_{4G}, (x_C)_i, (y_C)_i$  и  $\gamma_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

Условие минимума суммы (11)  $S = S(x_{4G}, y_{4G}, b_3, h_5)$  находится из решения системы четырех уравнений:

$$\frac{\partial S}{\partial x_{4G}} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial y_{4G}} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial b_3} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial h_5} = 0. \quad (12)$$

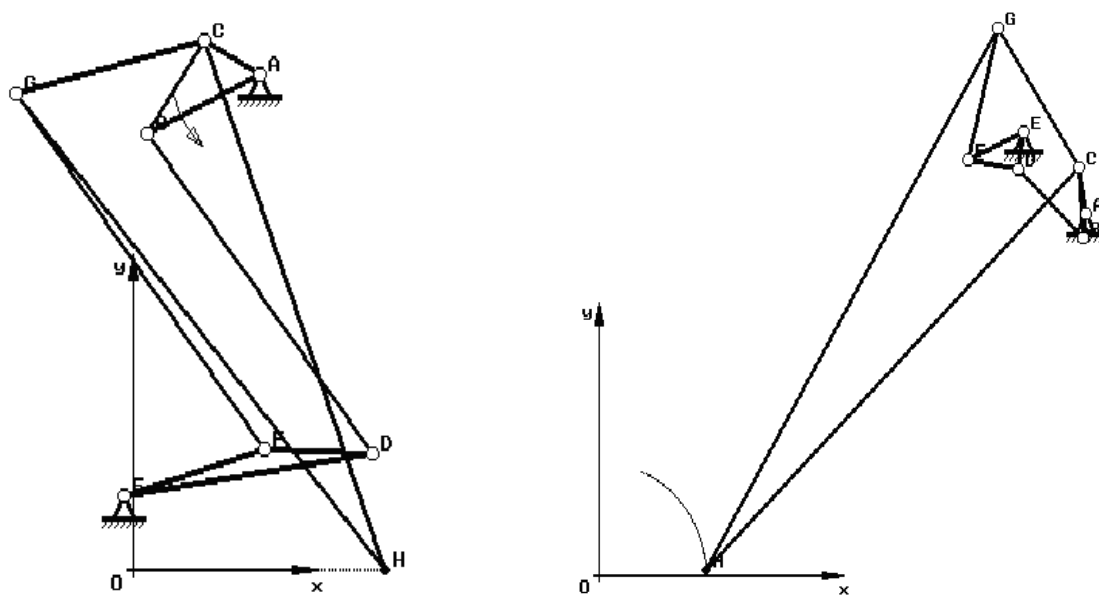
Система уравнений (12) может быть сведена к одному уравнению девятой степени относительно неизвестного параметра  $b_3$ , ограниченного условием (3), что существенно облегчает численный поиск корней уравнения. После определения корней данного уравнения, неизвестные  $h_5, x_{4G}$  и  $y_{4G}$  определяются однозначно по формулам.

Для численного нахождения значения параметра  $(\beta_0 + \lambda_3)$  (значение которого было принято известным) в заданном допустимом диапазоне его изменения используется технология АСК с перебором одного параметра в

полностью автоматическом режиме работы (без вывода на экран). Процедура синтеза на этапе 2 построена таким образом, что она ведет к автоматическому учету конструктивных ограничений (5) и (6). Дополнительно на втором этапе синтеза определяется значение показателя сборки диады  $CGF$ .

Качество выполнения основного условия синтеза – воспроизведения шатунной точкой  $H$  шестизвенника заданной траектории  $\sigma$  оценивается по максимальному отклонению  $\delta_{max}$  от заданной кривой (1).

В качестве числовых примеров успешно выполнен синтез механизмов генератора прямой линии и привода нитераскладчика мотальной машины (рис. 5) – генератора равномерного движения по дуге окружности.



Генератор прямой линии ( $\delta_{max} = 0,44$  мм)

Генератор дуги окружности ( $\delta_{max} = 0,25$  мм)

**Рисунок 5. Синтезированные ШШМ типа Стефенсон 1**

**Синтез ШШМ типа Уатт 1.** Механизм типа Уатт 1 (рис. 2) имеет входное звено 1 ( $ABC$ ) и выходное звено 4 ( $CGH$ ), шатунная точка  $H$  которого воспроизводит траекторию  $\sigma$ . Кинематическая схема ШШМ имеет 15 постоянных параметров:  $x_A, y_A, x_E, y_E, h_1 = AB, \lambda_1 = \angle BAC, b_1 = AC, h_2 = BF, \lambda_2 = \angle DBF, b_2 = EF, h_3 = DE, h_4 = G, \lambda_4 = \angle GCH, b_4 = CH, h_5 = GF$ .

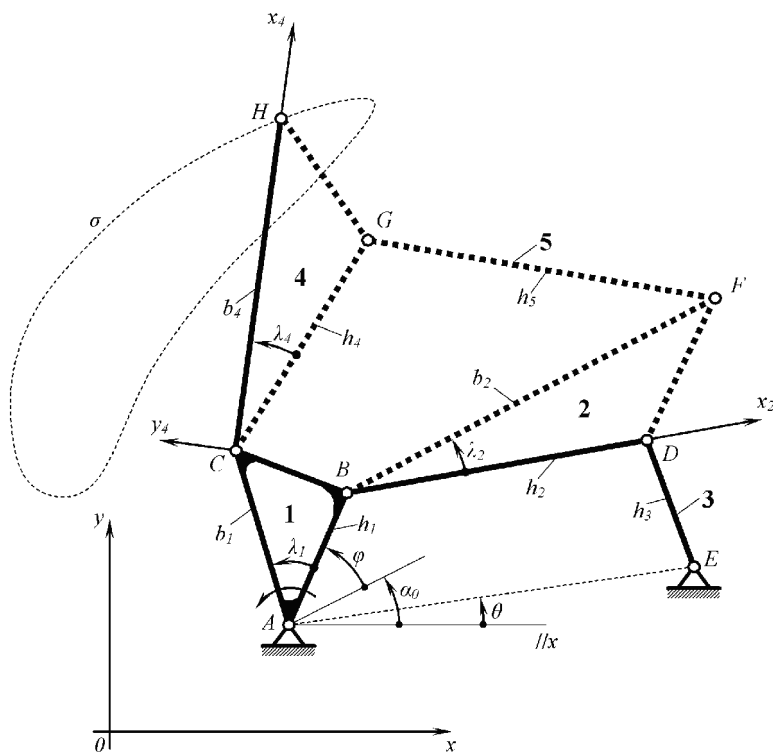
Назначаемые параметры:  $h_1, h_2, h_3, AE$ .

Вычисляемые параметры:  $x_A, y_A, x_E, y_E, \lambda_1, b_1, \lambda_2, b_2, h_4, \lambda_4, b_4, h_5, \alpha_0$  и показатель  $r_2$  сборки второй диады  $CGF$ . В алгоритме синтеза вместо декартовых координат  $x_E$  и  $y_E$  используются полярные координаты: угол  $\theta = \angle xAE$  и назначенный размер  $AE$ , а вместо параметров  $\lambda_4$  и  $b_4$  – декартовы координаты  $x_{4G}$  и  $y_{4G}$  точки  $G$  в системе координат  $Sx_4y_4$ , жестко связанной с шатуном 4 ( $CGH$ ).

Свободные параметры: направление вращения входного звена  $AB$  механизма.

Алгоритм *первого этапа* синтеза ШШМ типа Уатт 1 полностью совпадает с аналогичным алгоритмом для ШШМ типа Стефенсон 1.

На *втором этапе* синтеза методом АСК перебираются два варьируемых параметров: начальный угол  $\alpha_0$  и угол  $\theta = \angle xAE$  (рисунок 6). Для каждого сочетания  $\alpha_0$  и  $\theta$  (узла сканирования) производится расчет параметров плоскопараллельного движения шатуна  $BD$  базового ШЧ  $ABDE$ , а также значение угла  $\eta_i$  для каждого значения угла  $\varphi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) относительного



**Рисунок 6. Второй этап синтеза РМ типа Уатт 1**

поворота входного звена  $AB$  механизма и должна быть решена задача синтеза в следующей постановке:

Дано: плоскопараллельное движение  $\{(x_C)_i, (y_C)_i, \gamma_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) шатуна  $CH$  и плоскопараллельное движение  $\{(x_B)_i, (y_B)_i, \eta_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) шатуна  $BD$  (рис. 6);

Найти: значения неизвестных постоянных параметров  $\lambda_2, b_2, \lambda_4, h_4$  и  $h_5$ . Как уже отмечалось выше, вместо параметров  $\lambda_4$  и  $h_4$  удобнее вычислять координаты  $x_{4G}$  и  $y_{4G}$  точки  $G$ . Будем считать значения неизвестных  $\lambda_2$  и  $b_2$  известными. Тогда неизвестные  $h_5, x_{4G}$  и  $y_{4G}$

могут быть найдены из условий минимума суммы квадратов взвешенной разности

$$S = \sum_{i=1}^N (l_i^2 - h_5^2)^2 \quad (13)$$

Здесь  $l_i^2 = ((x_B)_i + b_2 \cos(h_1 + l_2) - (x_G)_i)^2 + ((y_B)_i + b_2 \sin(h_1 + l_2) - (y_G)_i)^2$ , где  $(x_G)_i$  и  $(y_G)_i$  являются функциями от  $x_{4G}, y_{4G}, (x_C)_i, (y_C)_i$  и  $\gamma_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

Условие минимума суммы (13)  $S = S(x_{4G}, y_{4G}, h_5)$  находится из решения системы трех уравнений:

$$\frac{\partial S}{\partial x_{4G}} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial y_{4G}} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial h_5} = 0. \quad (14)$$

Система (14) может быть сведена к системе двух линейных уравнений относительно неизвестных  $x_{4G}$  и  $y_{4G}$ . Соответственно три искомого параметра –  $h_5, x_{4G}$  и  $y_{4G}$  определяются однозначно по формулам.

Для численного нахождения значений параметров  $\lambda_2$  и  $b_2$  (ранее принятых известными) используется метод АСК в полностью автоматическом режиме работы (без вывода на экран) с перебором этих параметров в заданных допустимых диапазонах их изменения.

Дополнительно на втором этапе синтеза определяется значение показателя  $r_2$  сборки диады  $CGF$ .

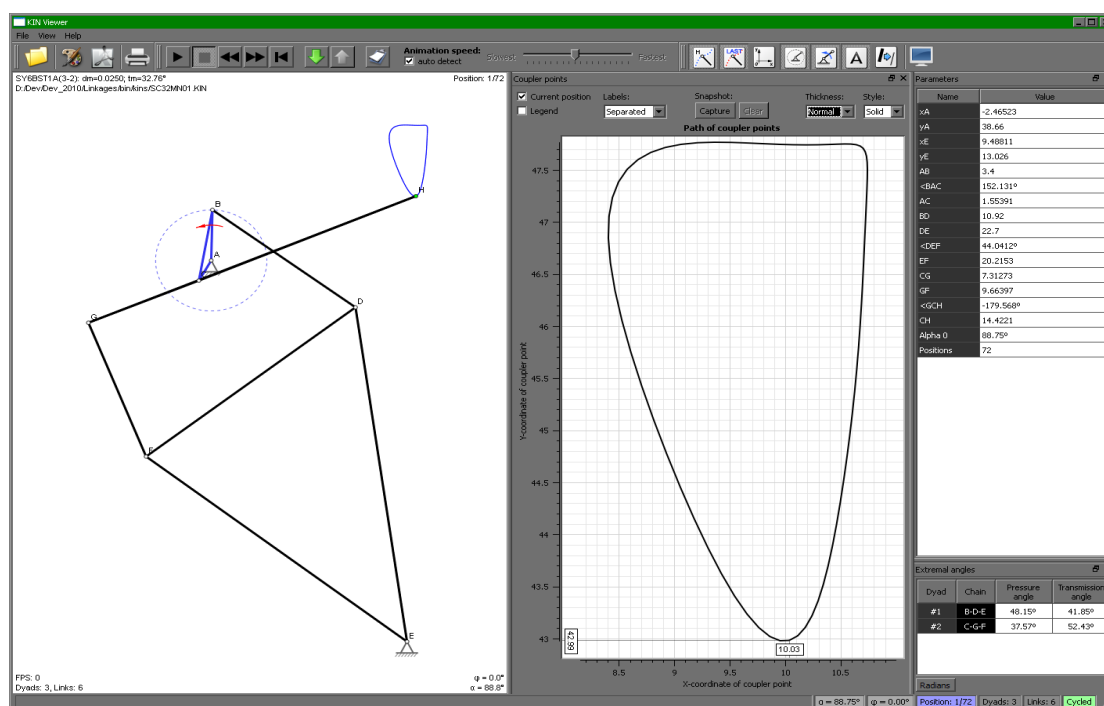
В качестве числовых примеров успешно выполнен синтез механизмов генератора прямой линии и привода нитераскладчика мотальной машины – генератора равномерного движения по дуге окружности.

Предложенные алгоритмы синтеза направляющих ШШМ типов Стефенсон 1 и Уатт 1 реализованы в интерактивных компьютерных программах SY6BST1A и SY6BWT1A.

В **четвертой главе** рассмотрено применение предложенного алгоритма и программ SY6BST1A и SY6BWT1A для решения задачи синтеза направляющего ШШМ типов Стефенсон 1 и Уатт 1 для воспроизведения замкнутой траектории, воспроизводимой десятизвенным механизмом для транспортирования ткани швейной машины с прямолинейным участком в зоне транспортирования.

После проведения линеаризации и выравнивания по горизонтали верхнего участка траектории механизма-прототипа, а также задания крутого участка подъема справа и более пологого участка спуска слева, в качестве заданных для синтеза точек были выбраны 60 положений, расположенных в рабочей верхней части траектории и 5 положений в нижней части, задающие размах траектории по вертикали. Введенные весовые коэффициенты  $\eta$  позволяют использовать для квадратического синтеза все 65 точек, а расчет отклонения проводить только по тем точкам, которые имеют весовые коэффициенты  $\eta = 1$ , т.е. только по рабочему горизонтальному участку траектории.

В качестве базового ШЧ ( $ABDE$ ) был взят механизм от десятизвенного механизма-прототипа.



**Рисунок 7. Синтезированный ШШМ типа Стефенсон 1**

Решение задачи синтеза дало следующие результаты после выполнения второго этапа синтеза: ШШМ Стефенсон 1 – 20 решений; ШШМ Уатт 1 – 13 решений. Для всех найденных решений выполняется основное условие  $\delta_{max} < 0,1$ мм. Однако ряд решений приводит к механизмам, недопустимым по компоновочным соображениям. В диссертации приведенных по 4 синтезированных ШШМ каждого типа наиболее точных и удачных по компоновке. Один из ШШМ типа Стефенсон 1 показан на рис. 7.

С помощью программы кинематического анализа было проведено исследование влияния изменения значений параметров кинематической схемы механизма на горизонтальный участок траектории рабочей точки. Выявлено, что округление значений параметров до технически приемлемых значений мало изменяет траекторию рабочей точки. Найдено, что параметр  $x_E$  (см. рис. 2) позволяет регулировать положение горизонтального рабочего участка траектории по вертикали.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1) проведенный аналитический обзор научной литературы и ранее выполненных исследований в области структурного и кинематического синтеза РМ, а также анализ современного уровня развития машиностроительных САПР показали, что актуальными являются задачи совершенствования существующих, а также разработка новых алгоритмов и методов синтеза РМ;

2) проведенный обзор РМ, используемых в технологических машинах легкой промышленности показал, что малое использование направляющих шестизвенных механизмов можно объяснить отсутствием надежных методов их синтеза;

3) разработана электронная база данных (каталог-справочник) по РМ. В базу данных входят десятки механизмов различной структуры и назначения. Система управления базой данных имеет дружественный графический интерфейс пользователя, позволяет выбирать из базы данных механизмы по целому ряду признаков (число звеньев, тип механизма, назначение, и т.п.). Подсистемы кинематического анализа и визуализации позволяют просматривать механизм в движении;

4) разработаны методы, алгоритмы и компьютерные программы для оптимизационно-аналитического синтеза двухопорных шестизвенных направляющих механизмов типов Стефенсон 1 и Уатт 1. Программы позволяют вычислить до 12 параметров кинематической схемы синтезируемого механизма;

5) программы синтеза двухопорных направляющих ШШМ двух типов были успешно протестированы на примерах синтеза механизма с прямолинейным движением шатунной точки, а также для синтеза генератора дуги;

6) успешно выполнен синтез ШШМ двух типов воспроизводящих сложную замкнутую траекторию. Механизм может быть использован для транспортирования ткани в швейной машине;

7) разработанные методы, алгоритмы и компьютерные программы в совокупности образуют автоматизированную систему для проектирования РМ приводов технологических машин;

8) проведено исследование влияния изменения значений параметров кинематической схемы синтезированного механизма на горизонтальный участок траектории рабочей точки. Выявлено, что округление значений параметров до технически приемлемых значений мало изменяет траекторию рабочей точки.

Содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Кикин А.Б., Кикин А.А. Интерактивная методика синтеза направляющих рычажных механизмов для машин легкой промышленности // Известия ВУЗов Технология легкой промышленности, 2010 №1, с. 74-79.

2. Кикин А.А., Кикин А.Б. Интерактивная методика проектирования рычажных механизмов приводов рабочих органов машин легкой промышленности. / Инновационность научных исследований в текстильной и легкой промышленности. Сб. материалов Международной научно-технической конференции. – М.: РосЗИТЛП, 2010, кн. 3, с. 68-72.

3. Кикин А.Б., Кикин А.А. Квадратический синтез направляющего шестизвенного механизма Стефенсон I / Proceedings of X. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms. Liberec, Czech Republic, Sept. 2 – 4, 2008, pp. 341-346.

4. Kikin A.B., Kikin A.A. Interactive Least-Squares Synthesis of a Watt I Six-bar Path Generator. / Proc. of International Symposium of Mechanism and Machine Science. Izmir, Turkey, Oct. 5-8, 2010, pp. 403-407

5. Кикин А.Б., Кикин А.А. Квадратический синтез направляющего шестизвенного механизма Уатт I // Известия ВУЗов Технология легкой промышленности, 2009 №2, с. 11-16.

6. Кикин А.А. Интерактивный квадратический синтез двухопорных шестизвенных направляющих механизмов. Сб. материалов XXII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения МИКМУС 2010 «Будущее машиностроения России» (секция 3) – ИМАШ, РАН. – Москва, 2010. – с. 42.