

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ  
РЕСПУБЛИКИ**

**ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ НАН КР**

Диссертационный совет Д.05.11.043

На правах рукописи  
УДК 621.01.622.23

**КОЙШЫБАЕВА ЖАНАР БИДАХМЕТОВНА**

**СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Специальность: **05.02.18 – Теория механизмов и машин**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Бишкек - 2011**

Работа выполнена в Казахском национальном техническом университете (КазНТУ) имени К.И. Сатпаева

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
профессор, академик МИА и НИА РК  
**Джолдасбеков С.У.**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук  
**Абдраимов Э.С.**  
кандидат технических наук  
**Каримбаев Т.Т.**

**Ведущая организация:** Казахстанско – Британский технический университет

Защита состоится « 22 » декабря 2011 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.05.11.043 при Институте машиноведения Национальной академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КР Института машиноведения НАН Кыргызской Республики.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной гербовой печатью, просим направлять по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23, Институт машиноведения НАН КР, Диссертационный совет Д 05.11.043, а также по email: [imash\\_kg@mail.ru](mailto:imash_kg@mail.ru)

Телефон для справок: (0312) 541149, факс: (0312) 562785

Автореферат разослан « 21 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 05.11.043  
кандидат технических наук, с.н.с.



Квитко С.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

### **Актуальность темы.**

Современная методология технологической автоматизации в промышленно развитых странах показывает растущую интеграцию электронных средств в традиционные механические устройства. Поскольку любое желаемое движение выходного объекта может быть воспроизведено средствами управления всегда существует опасность игнорирования преимуществ и широких функциональных возможностей механической части разрабатываемой машины. Между тем, именно *рациональная механика* имеет наиболее важное значение для разработки *простых, надёжных и дешёвых* машин.

Известно, что существующие методы синтеза рычажных механизмов для точного воспроизведения заданных положений точки на плоскости нашли достаточно ограниченное применение.

Более предпочтительным являются методы приближенного синтеза механизмов по произвольному числу заданных положений точек на шатунной кривой. Несмотря на кажущийся недостаток этих методов, поскольку синтезируется механизм, воспроизводящий заданные положения шатунной точки заведомо неточно, эти методы нашли широкое и достаточно успешное применение, поскольку точность аппроксимации может достигать довольно высоких пределов, даже намного превышающих требуемую точность воспроизведения.

Интерес к методам аппроксимационного синтеза механизмов стал особенно возрастать с развитием численных методов оптимизации и в связи возрастанием возможностей вычислительной техники.

Анализируя функциональные возможности механизмов, можно определить, какие задачи могут быть решены только механическими средствами, а какие – сочетанием механических и немеханических средств. Предполагается, что экспертная система функционального анализа открывает широкие перспективы для создания научных основ разработки новых мехатронных устройств, использующих механизмы «со встроенным интеллектом» («built – in intelligence») как основы простой и дешевой технологической автоматизации.

Из вышеизложенного вытекает **актуальность** тематики диссертационной работы.

### **Цель и задачи исследования.**

Целью работы - разработка эффективной методики определения выбора начального приближения для синтезируемого механизма, позволяющей, эффективным способом создавать библиотеку механизмов и на его основе создать экспертную систему анализа функциональных воз-

возможностей рычажных механизмов, позволяющей на ранних этапах проектирования оценить возможности выбранной структурной схемы и определить начальные приближения для параметров синтеза.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) сформулировать и решить задачу сравнения двух замкнутых кривых при поиске требуемого механизма из каталога механизмов, которая сведена к аппроксимационной задаче квадратического приближения.

2) разработать численно-аналитический метод определения синтеза направляющих механизмов с использованием рядов Фурье в случае заданного закона движения шатунной точки на плоскости.

3) разработать способ представления рычажных механизмов в базе данных с использованием коэффициентов ряда Фурье разложения шатунной кривой механизма.

4) разработать эффективную методику определения выбора начального приближения для синтезируемого механизма, позволяющую создавать библиотеку механизмов и достаточно быстро находить нужный механизм.

5) создать экспертную систему анализа функциональных возможностей рычажных механизмов, позволяющую на ранних этапах проектирования оценить возможности выбранной структурной схемы и определить начальные приближения для параметров синтеза.

**Научная новизна исследований** заключается в следующем:

- разработан новый способ представления рычажных механизмов в базе данных с использованием коэффициентов ряда Фурье разложения шатунной кривой механизма.

- разработана методика, представляющая собой эффективный способ выбора начального приближения для синтезируемого механизма, позволяющая, эффективным способом создавать библиотеку механизмов и достаточно быстро находить нужный механизм.

- решена задача сравнения двух замкнутых кривых при поиске требуемого механизма из каталога механизмов, которая сведена к аппроксимационной задаче квадратического приближения, при решении которого четыре искомых переменных определены аналитически.

- предложено аналитическое решение задачи синтеза направляющих механизмов с использованием рядов Фурье в случае заданного закона движения шатунной точки на плоскости.

- создана экспертная система анализа функциональных возможностей рычажных механизмов, позволяющая на ранних этапах проектирования оценить возможности выбранной структурной схемы и определить начальные приближения для параметров синтеза и, таким образом, полностью реализовать технологию "старт от нуля".

**Практическая значимость** работы заключается в разработке способа представления рычажных механизмов в базе данных с использованием коэффициентов ряда Фурье разложения шатунной кривой механизма, разработке методики систематического исследования функциональных возможностей рычажных механизмов (РМ).

**Обоснованные положения выносимые на защиту** обеспечивается корректным использованием основных положений и методов теоретической и прикладной механики, математического анализа, линейной алгебры, оптимизации, теории приближения функции.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием апробированных методов синтеза на основе квадратической аппроксимации, результатами анализа механизмов, полученных при синтезе, работоспособностью разработанной модели механизма.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных конференциях, семинарах: на семинарах кафедры «Теоретической и прикладной механики» Казахский национальный технический университет (КазНТУ) им. К.И. Сатпаева, 2010 г., на международной научной конференции «Проблемы теоретической и прикладной механики», Алматы, КазНУ им. аль-Фараби, 2006 г.; на международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения», Алматы, КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2005 г.; на III международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения», Алматы, КазНТУ 2009 г., на международной конференции «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии» (Алматы, КазНТУ 2010 г.); на первом международном Джолдасбековском симпозиуме, Алматы, 2011 г.; на расширенном научном семинаре института машиностроения КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2011 г.

**Личный вклад.** Основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, анализ полученных данных проведён самостоятельно с учетом имеющихся в литературе сведений.

Основная часть работы выполнена автором самостоятельно. В совместных работах [1, 3, 5] приоритет принадлежит автору. В работах [2, 7, 9, 10, 11, 13], выполненных совместно с научным руководителем д.т.н., профессором С.У. Джолдасбековым и д.т.н. С.М.Ибраевым, а также, к.т.н. А.Т. Нурмаганбетовой и А.Е.Тусуповой, автору принадлежит равное участие в получении результатов.

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** Выносимые на защиту результаты опубликованы в 10 научных статьях и 3-х тезисов докладов.

**Связь темы диссертации с другими НИР и программами.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных исследований «Фундаментальные вопросы физики, математики, механики и информатики» (Ф.0369) МОН РК по проектам «Разработка аналитических и численных методов синтеза и экспертной системы функционального анализа рычажных механизмов» (2003-2005 гг., № гос. регистрации 0103РК00449), «Разработка методов кинематического и динамического синтеза рычажных механизмов на основе кластерного анализа и создание принципиально новых механизмов для различных отраслей промышленности» (2006-2007 гг., № гос. регистрации 0106РК00677), в Институте механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 134 наименований, объем диссертации 181 страниц машинописного текста, 49 рисунков и 16 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит общую характеристику работы, актуальность темы, цель работы, задачи и методы исследования, защищаемые основные научные положения и результаты, которые выносятся на защиту, степень обоснованности и достоверности научных положений, степень новизны полученных результатов, связь темы диссертации с другими НИР и программами, апробацию результатов, практическую ценность и структуру работы.

**В первой главе** представлены результаты обзора и анализа научно-технической литературы по теме диссертационной работы.

Классические методы синтеза рычажных механизмов разделяются на точные и приближенные. Как известно, методы синтеза механизмов для точного воспроизведения заданных конечно-удалённых положений выходного объекта имеют ограниченное применение. Поскольку количество заданных положений является ограниченным, развивались методы синтеза по 3-ем, 4-ем и 5-ти положениям, при этом невозможно учесть форму шатунной кривой между заданными конечно-удалёнными положениями, а также невозможно закладывать не только ограничения на длины звеньев и габаритные ограничения, но и такие важные ограничения как качество передачи движения и т.д.

Учитывая выявленные недостатки, сформулирована постановка задач исследований, решение которых позволяет достичь поставленной

цели - способ представления рычажных механизмов в базе данных с использованием коэффициентов ряда Фурье разложения шатунной кривой механизма.

Важным достоинством предлагаемого способа является то, что в базе данных не нужно хранить размеры механизма. Поскольку коэффициенты Фурье зависят от способа параметризации кривой, для чисто геометрического представления кривой предложено использовать параметр, изменяющийся пропорционально длине дуги, описываемой от начала кривой до текущего положения.

**Вторая глава** посвящена численному описанию замкнутой кривой с использованием ряда Фурье. Известно, что наиболее удобным способом представления замкнутого контура в виде численных данных является использование коэффициентов Фурье. Даже первые несколько коэффициентов Фурье вполне представляют форму кривой. Этот способ представления незаменим и с точки зрения поиска нужной кривой в каталоге, поскольку поиск сводится к сравнению двух последовательностей коэффициентов Фурье, на что почти не требуется вычислительных затрат ввиду линейной природы ряда Фурье.

Параметризованный радиус-вектор  $\vec{r}(t)$  замкнутой кривой  $\gamma$  (рис. 1) может быть представлен в виде ряда Фурье как:

$$\vec{r}(t) = \vec{a}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (\vec{a}_k \cos kt + \vec{b}_k \sin kt), \quad (1)$$

где  $\vec{a}_k = [a_k^x, a_k^y]^T$ ,  $\vec{b}_k = [b_k^x, b_k^y]^T$ .

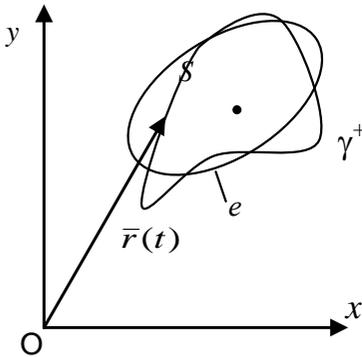


Рис. 1. Параметризованный радиус-вектор  $\vec{r}(t)$  замкнутой кривой  $\gamma$

Будем считать, что параметр меняется от 0 до  $2\pi$ . В качестве параметра  $t$  может выступать угол поворота кривошипа или время.

Требуется определить коэффициенты Фурье.

Для чисто геометрического представления кривой, независимой от времени, параметр  $t$  выбором изменяется пропорционально длине дуги, описываемой от начала кривой  $M_0(x_0, y_0)$  до текущего положения  $M(x, y)$ .

Если кривая  $\gamma$  представлена дискретной последовательностью точек на ней  $M_0, M_1, M_2, \dots, M_n \equiv M_0$  с радиус-векторами  $\vec{r}_0, \vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_{n-1}, \vec{r}_n = \vec{r}_0$ , т.е. виде многоугольника, параметризация, независимая от времени, может быть получена при  $t_0 = 0$  рекурсивно по формуле:

$$t_i = t_{i-1} + \frac{2\pi}{L} \cdot \left\| \vec{r}_i - \vec{r}_{i-1} \right\|, \quad (2)$$

где  $L$  - есть сумма длин ребер  $M_i M_{i-1}$  многоугольника

$$L = \sum_{i=1}^n \left\| \vec{r}_i - \vec{r}_{i-1} \right\|. \quad (3)$$

Коэффициенты ряда Фурье для полученного многоугольника имеют вид

$$\vec{a}_0 = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^n \left[ (t_i - t_{i-1}) (\vec{r}_i + \vec{r}_{i-1}) \right], \quad (4)$$

а для  $k > 0$ .

$$\vec{a}_k = \frac{1}{k^2 \pi} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\cos kt_i - \cos kt_{i-1}}{(t_i - t_{i-1})} (\vec{r}_i - \vec{r}_{i-1}) \right], \quad (5)$$

$$\vec{b}_k = \frac{1}{k^2 \pi} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\sin kt_i - \sin kt_{i-1}}{(t_i - t_{i-1})} (\vec{r}_i - \vec{r}_{i-1}) \right].$$

Всего несколько членов ряда Фурье уже характеризуют форму замкнутой кривой в достаточно высокой степени. Пусть, например, кривая  $\gamma$  есть шатунная кривая шарнирного четырехзвенника ABCD (рис. 2), т.е. кривая, описываемая шатунной точкой  $p$  на плоскости.

При использовании только пяти первых членов ряда Фурье отклонения аппроксимирует кривой  $\gamma_F$  от шатунной кривой  $\gamma$  составляет 0,38%. Этот эллипс описывается выражением:

$$\vec{r}_e = \vec{a}_0 + \vec{a}_1 \cos t + \vec{b}_1 \sin t$$

На рисунке 2 точка  $S$  представляет собой “центр тяжести” кривой  $\gamma$  и имеет радиус-вектор  $\vec{r}_s = \vec{a}_0$ . Она же является и центром эллипса  $e$ , соответствующего первой гармонике  $k = 1$ .

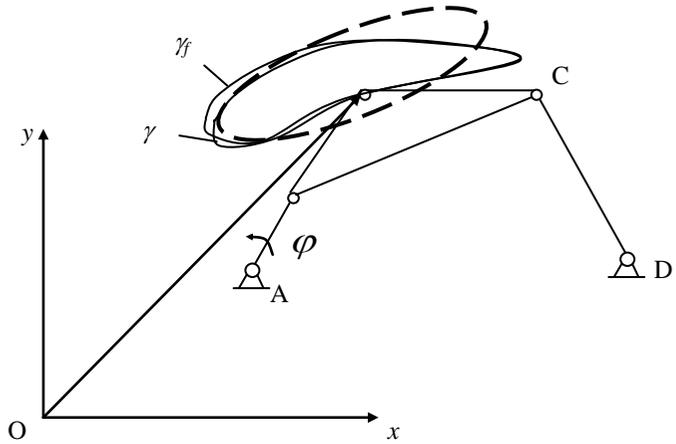


Рис. 2. Шатунная кривая шарнирного четырехзвенника ABCD

Например, при программном тесте, если входная кривая задается в следующем виде:

$$x = a \cos \varphi_i, \quad y = b \sin \varphi_i,$$

при коэффициентах  $a = 8, b = 4$ , где  $\varphi_i$  меняется от 0 до  $2\pi$ , получим данные при  $k = 5$ , представленные на рисунке 3.

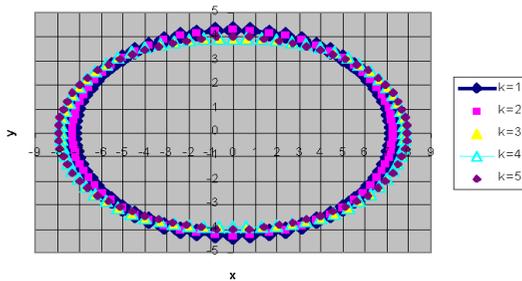


Рис. 3. Заданный эллипс и соответствующие им кривые

В итоге, анализ Фурье плоской замкнутой кривой используется для нахождения подходящего направляющего механизма посредством электронного каталога. Этот метод основывается на методах оптимизации и позволяет учитывать дополнительные требования синтеза и ограничения.

В результате увеличивается скорость вычислений, поскольку использование коэффициентов Фурье позволяет избежать трудоемкого кинематического анализа на каждом шаге спуска к минимуму.

**В третьей главе** диссертаций рассматривается методика сравнения двух замкнутых кривых при синтезе направляющих рычажных механизмов с использованием ряда Фурье. При поиске требуемого механизма из каталога механизмов выполняется сравнение шатунной кривой механизма  $\gamma$  с заданной кривой  $\gamma^*$ , которую требуется воспроизвести.

При этом необходимо учесть, что в каталоге хранятся нормализованные механизмы, т.е. в которых  $X_A = Y_A = Y_D = O$ ,  $X_D = 1$ .

Поэтому, при сравнении кривых отыскиваются также параметры поворота всей кривой как целой на угол  $\alpha$  и коэффициент растяжения-сжатия кривой  $j$ , т.е. кривая подвергается преобразованию:

$$\Gamma(\alpha, j) = \begin{bmatrix} j \cos \alpha & -j \sin \alpha \\ j \sin \alpha & j \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Кроме того, требуется найти фазовые смещения  $T$  в параметризации кривых  $\gamma$  и  $\gamma^*$ , сравниваются кривые без учета сдвига  $\bar{a}_0$  и  $\bar{a}_0^*$ , т.е. кривые рассматриваются относительно центров масс  $S$  и  $S^*$ .

Разложение в ряд Фурье этих двух кривых имеет вид:

$$\vec{r}(\tau) - \bar{a}_0 = \sum \left( \vec{a}_k \cos k\tau + \vec{b}_k \sin k\tau \right) \quad (7)$$

$$\vec{r}^*(t) - \bar{a}_0^* = \sum \left( \vec{a}_k^* \cos kt + \vec{b}_k^* \sin kt \right), \quad (8)$$

где  $\tau = t + T$ . Тогда для определения искомым переменных  $\alpha, j, T$  можно поставить задачу оптимизации:

$$f(\alpha, j, T) = \int_0^{2\pi} \left\{ \vec{r}^* - \bar{a}_0^* - \Gamma(j, \alpha) \left[ \vec{r}(t+T) - \bar{a}_0 \right] \right\}^2 dt \Rightarrow \min. \quad (9)$$

Наихудшие значения отклонений между двумя кривыми определяются из формулы:

$$\Delta = \sqrt{\frac{f_{\min}}{2\pi}}. \quad (10)$$

Воспользуемся необходимым условием минимума:

$$\frac{\partial f}{\partial p_1} \equiv \sum_{k=1}^m \left[ \left( \vec{a}_k + \vec{b}_k \right) p_1 - \vec{a}_k^{*T} \left( \vec{a}_k \cos kT + \vec{b}_k \sin kT \right) \right] -$$

$$\sum_{k=1}^m \left[ \vec{b}_k^{*T} \left( -\vec{a}_k \sin kT + \vec{b}_k \cos kT \right) \right] = 0; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial p_2} &\equiv \sum_{k=1}^m \left[ \left( \vec{a}_k + \vec{b}_k \right) p_2 + \vec{a}_k^{*T} \Gamma \left( -\frac{\pi}{2} \right) \cdot \left( \vec{a}_k \cos kT + \vec{b}_k \sin kT \right) \right] + \\ &+ \sum_{k=1}^m \left[ \vec{b}_k^{*T} \Gamma \left( -\frac{\pi}{2} \right) \cdot \left( -\vec{a}_k \sin kT + \vec{b}_k \cos kT \right) \right] = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial p_3} &\equiv \sum_{k=1}^m \left[ k \left( \left( \vec{a}_k^{*T} \vec{a}_k + \vec{b}_k^{*T} \vec{b}_k \right) p_1 + \left( \vec{a}_k^{*T} \Gamma \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot \vec{b}_k - \vec{b}_k^{*T} \Gamma \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot \vec{a}_k \right) p_2 \right) \cos kT + \right. \\ &\left. + \left( \left( \vec{a}_k^{*T} \vec{a}_k + \vec{b}_k^{*T} \vec{b}_k \right) p_1 - \left( \vec{a}_k^{*T} \Gamma \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot \vec{a}_k + \vec{b}_k^{*T} \Gamma \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot \vec{b}_k \right) p_2 \right) \sin kT \right] = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Отсюда в скалярной форме получим 3 уравнения, из которых определяем переменные  $p_1, p_2$ . После определения переменных  $p_1, p_2$ , искоемые переменные  $\alpha$  и  $j$  определяются по формулам:

$$\alpha = \arctg \frac{p_2}{p_1}, \quad (14)$$

$$j = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}. \quad (15)$$

Кривая  $\gamma$  после преобразования вида:

$$\vec{r}_1 = \Gamma(\alpha, j) \vec{r} - \vec{a}_0^* \quad (16)$$

будет в наибольшей степени приближена к заданной кривой  $\gamma^*$ . Соответствующим образом должны быть преобразованы геометрические параметры механизма: все линейные размеры механизма увеличиваются (или уменьшаются) в  $j$  раз:  $l'_i = j l_i$ , а весь механизм должен быть сдвинут относительно систему координат ОХУ на вектор  $\vec{a}_0^*$  и повернут на угол  $\alpha$  (рис. 4).

Возможность аналитического определения переменных  $\alpha, j$  позволяет ввести новую модифицированную целевую функцию  $f_m$ , зависящую от одной переменной  $T$ :

$$f_m(T) = f^0(\alpha(T), j(T), T). \quad (17)$$

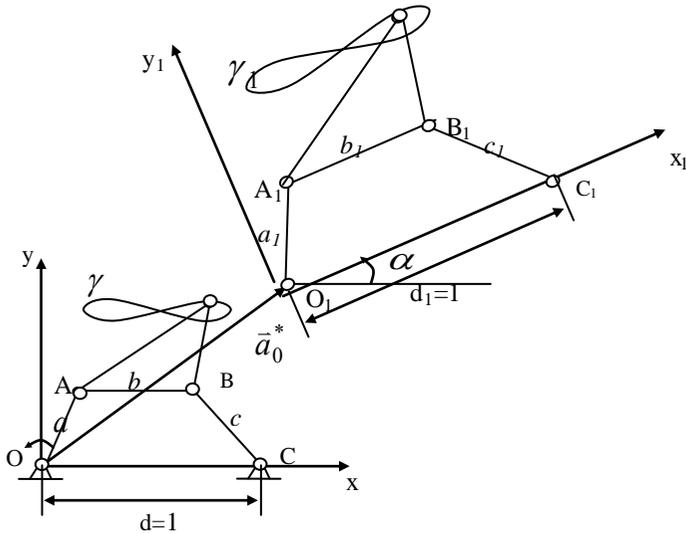


Рис. 4. Механизм сдвинут относительно систему координат OXY на вектор  $\vec{a}_0^*$

При этом важно заметить, что необходимые условия минимума (12) и (13) являются также и достаточными условиями минимума.

Для этого достаточно проверить гессиан-матрицу вторых производных:

$$A = \frac{d^2 f}{d[p_1, p_2]^2}.$$

Элементы этой матрицы будут следующие:

$$a_{11} = \frac{\partial^2 f}{\partial p_1^2} = \sum_{k=1}^m (\bar{a}_k^2 + \bar{b}_k^2),$$

$$a_{22} = \frac{\partial^2 f}{\partial p_2^2} = \sum_{k=1}^m (\bar{a}_k^2 + \bar{b}_k^2), \quad a_{12} = a_{21} = \frac{\partial^2 f}{\partial p_1 \partial p_2} = 0.$$

Отсюда очевидно, что гессиан положительно определен вместе с главным минором.

После того, как механизм найден, проверяем, будет ли рабочая область механизма (геометрическое место точек на плоскости, занимаемое всеми точками звеньев во время работы) находиться в заданной проектирующей области  $D_M$ . Кроме того, стойки механизма должны лежать в заданных областях  $D_1$  и  $D_2$  и т.д. Как область механизма  $D_M$ ,

так и области стоек  $D_1, D_2$  и т.д. задаются в виде многоугольников, т.е. в виде линейных ограничений вида

$$A_i x + B_i y + C_i \geq 0.$$

Дано обоснование разработанного способа представления рычажных механизмов в базе данных с использованием коэффициентов ряда Фурье и разложения шатунной кривой механизма, как оптимального с точки зрения быстрого поиска нужной кривой в каталоге. Поскольку поиск сводится к сравнению двух последовательностей коэффициентов Фурье и на это почти не требуется вычислительных затрат ввиду линейной природы ряда Фурье. Коэффициенты Фурье зависят от способа параметризации кривой, для чисто геометрического представления кривой предложено использовать параметр, изменяющийся пропорционально длине дуги, описываемой от начала кривой до текущего положения.

Задача сравнения двух замкнутых кривых при поиске требуемого механизма из каталога сведена к аппроксимационной задаче квадратического приближения, при решении которой четыре искомых переменных определены аналитически. Это позволило свести задачу поиска минимума по пяти переменным к минимизации функции одной переменной, характеризующей фазовый сдвиг вдоль кривой. Представлены численные примеры реализации методики сравнения кривых на основе предложенного способа представления кривых.

**В четвертой главе** описано создание электронного каталога на основе метода зондирования пространства параметров. При создании электронного каталога был выбран метод зондирования пространства параметров.

Отличительная черта рассматриваемого метода – систематический просмотр многомерных областей, в качестве пробных точек в пространстве параметров используются точки равномерно распределенных последовательностей. Для этих целей были использованы так называемые  $ЛП\tau$ -последовательности, которые обладают наилучшими характеристиками равномерности среди известных равномерно распределенных последовательностей.

При систематическом поиске в многомерных областях используется метод зондирования пространства параметров, который называется  $ЛП$ -поиском. Можно указать два класса задач, при решении которых  $ЛП$ -поиск оказался очень полезным. Во-первых, это задачи, в которых одновременно требуется оценить максимумы и (или) минимумы нескольких функций, заданных в  $n$ -мерном пространстве; так как это можно сделать по одним и тем же пробным точкам. Во-вторых, это за-

дачи, в которых для отыскания глобального экстремума многоэкстремальной функции используют локальные методы оптимизации. Для того, чтобы не попасть в какой-нибудь из локальных экстремумов вместо глобального, приходится повторять локальный поиск много раз, начиная с различных начальных точек, при этом очевидно, что начальные точки должны быть равномерно расположены в  $K^n$ . Самым эффективным способом выбора начальных точек оказалось использование точек  $ПП_\tau$ -последовательности.

Суть методики зондирования на основе  $ПП_\tau$ -последовательностей заключается в следующем. Для поиска в многомерном кубе рассмотрим единичный  $n$ -мерный куб  $K^n$ , состоящий из точек  $P$  с декартовыми координатами  $x_1, \dots, x_n$ , т.е.:  $P = (x_1, \dots, x_n)$ , удовлетворяющими неравенствам  $0 \leq x_j \leq 1$  при  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Обычно полагают, что наиболее равномерный просмотр такого куба обеспечивает кубическая решетка (рис. 5), состоящая из  $N = M^n$  точек с координатами:

$$\left( \frac{i_1 + 1/2}{M}, \frac{i_2 + 1/2}{M}, \dots, \frac{i_n + 1/2}{M} \right),$$

где  $i_1, \dots, i_n$  независимо принимают все значения  $0, 1, \dots, M-1$ .

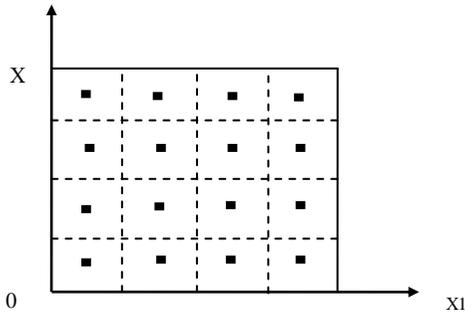


Рис. 5. Кубическая решетка при  $n=2$  ( $N=16$ )

Однако, это неверно. Такая решетка оптимальна только в одномерном случае, при  $n=1$  (рис. 6). Уже при  $n=2$  она не очень хороша, а с увеличением  $n$  «равномерность» ее быстро ухудшается. Впервые вывод о том, что кубические решетки в  $K^n$  - это плохие сетки

при больших  $n$ , был сделан в 1957 году У.А Джолдасбековым и М.М Молдабеков.

Методом зондирования пространства параметров называется  $n$ -мерное пространство, состоящее из точек  $A$  с декартовыми координатами  $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ . Таким образом, каждой точке  $A$  пространства параметров соответствует конкретный набор параметров  $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  и наоборот.

Как правило, проектировщики могут указать разумные пределы изменения каждого из параметров, которые мы будем называть параметрическими ограничениями

$$\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**} \quad j = 1, 2, \dots, n .$$

Далее для выполнения поиска в многомерном кубе также используется понятие равномерно распределенные последовательности точек в  $K^n$ . Пусть  $P_1, \dots, P_i, \dots$  - последовательность точек, принадлежащих  $K^n$ . Выберем в  $K^n$  произвольный  $n$ -мерный параллелепипед  $\Pi$  со сторонами, параллельными координатным граням (рис. 6). Обозначим через  $S_N(\Pi)$  количество точек  $P_i$  с номерами  $1 \leq i \leq N$ , принадлежащих  $\Pi$ .

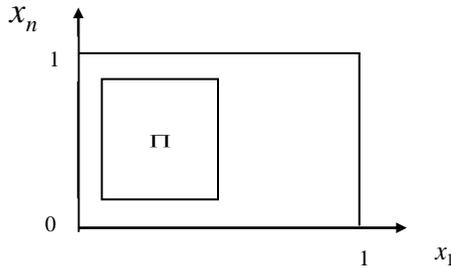


Рис. 6. - Параллелепипед  $\Pi$  в  $K^n$

Последовательность точек  $P_1, \dots, P_i, \dots$ , называется равномерно распределенной в  $K^n$ , если для любого  $\Pi$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_N(\Pi)}{N} = V_\Pi, \quad (19)$$

где  $V_\Pi$  - объем ( $n$ -мерный) параллелепипеда  $\Pi$ .

Так как наш метод основан на зондировании параллелепипеда  $\Pi$  конечным числом пробных точек, то без необходимости расширять

границы не рекомендуется, так как возрастает объем, и для просмотра может потребоваться больше точек.

Для выбора пробных точек, были использованы точки  $ЛПТ_\tau$  - последовательности  $Q_0, Q_1, \dots, Q_{i,\dots}$ . По декартовым координатам очередной точки  $Q_i = (q_{i,1}, \dots, q_{i,n})$  вычисляем декартовы координаты точки  $A^{(i)} = (\alpha_1^{(i)}, \dots, \alpha_n^{(i)})$ , принадлежащей параллелепипеду  $\Pi$ ,  $\alpha_j^{(i)} = \alpha_j^* + (\alpha_j^{**} - \alpha_j^*)q_{i,j}$   $j = 1, 2, \dots, n$

При  $A = A^{(i)}$  рассчитываем проектируемую систему и проверяем выполнение функциональных ограничений. Если они выполнены, то точка  $A = A^{(i)}$  отбирается в качестве пробной точки и вычисляются все искомые параметры целевой функции; в противном случае точка  $A = A^{(i)}$  отбрасывается.

Используя выражения:  $\alpha_j^{(i)} = \alpha_j^* + (\alpha_j^{**} - \alpha_j^*)q_{i,j}$  при  $j = 1, 2, \dots, n$  находим  $ЛПТ_\tau$ -последовательности точек, которые имеют функциональное ограничение. И далее для каждой пробной точки вычисляем коэффициенты Фурье шатунной кривой  $\gamma$ . По каждому найденному значению  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_5$  выполняем анализ. Для каждой  $S$  положение сборки, оно принимает значение +1 или -1. Если анализ пройдет успешно далее вычисляем коэффициенты Фурье, которые в свою очередь хранятся в выходном файле и в итоге будет образована база данных, т.е. электронный каталог, в противном случае точки  $ЛПТ_\tau$ -последовательностей отбрасывается и переходят к следующей точке, до конца, пока число точек не превысит заданное конечное число  $Aend$   $ЛПТ_\tau$ -последовательности. В итоге получим базу данных механизмов, где хранятся номер  $ЛПТ_\tau$ -последовательностей и 5 первых коэффициентов Фурье. Как мы показывали в предыдущих разделах 4 - 5 - ти коэффициентов Фурье вполне достаточно для приближенного описания шатунных кривых шарнирного четырехзвенника. По номеру  $ЛПТ_\tau$ -последовательности  $A^{(i)}$  очень просто восстанавливаются размеры механизма. Таким образом, хранить размеры механизма нет необходимости, что очень существенно сокращает объем информации, хранящейся в базе данных.

Далее выбираем любые исходные точки  $P$  шатунной кривой, координаты которых считываем из файла. Сравниваем исходные кривые с кривыми нормализованного механизма, для этого кривых считываем с

электронного каталога информацию описываемую в виде кривые, т.е. коэффициенты Фурье для каждой точки  $ЛПП_{\tau}$ -последовательностей. В ходе реализации задачи вычисляются искомые параметры целевой функции, угол поворота и коэффициент растяжения-сжатия для каждого механизма. Далее вставив эти найденные значения проверяем соответствие по каждой точке  $ЛПП_{\tau}$ -последовательностей и вычисляем значение целевой функции. После чего упорядочиваем все выходные значения по возрастанию. По первым десяти кривым, которые приближенно описывают исходную кривую, указывается номер точки  $ЛПП_{\tau}$ -последовательностей, значение целевой функции, которое приближенно к нулю, и сборку этого механизма. По этим результатам можно считать что поставленная задача выполнена.

Важным достоинством предлагаемого способа является то, что в базе данных не нужно хранить размеры механизма. При формировании базы данных используются  $ЛПП_{\tau}$  последовательности, равномерно распределённые в зондируемой области, и поэтому вместо хранения геометрических размеров механизма достаточно иметь порядковый номер  $ЛПП_{\tau}$  последовательности.

Программа создания базы данных механизмов представлена в приложении 1, а в приложении 2 представлены подпрограммы, использованные в ходе выполнения программы.

Установлено, что зондируемая область состоит из двух кластеров, при этом границы областей разброса параметров более чётко разделяются при увеличении ограничения на угол давления  $MU > 30^{\circ}$  и  $MU > 45^{\circ}$ . Так, получены кластеры разброса параметров при функциональных ограничениях.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе дано решение актуальной задачи функционального синтеза рычажных механизмов посредством создания электронного каталога

При решении задачи получены следующие выводы:

1. Разработан способ представления рычажных механизмов в базе данных с использованием коэффициентов ряда Фурье. Дано обоснование этого способа представления как оптимального с точки зрения быстрого поиска нужной кривой в каталоге.

2. Для формирования базы данных используются  $ЛП\tau$  - последовательности, равномерно распределённые в зондируемой области, и поэтому вместо хранения геометрических размеров механизма достаточно иметь порядковый номер  $ЛП\tau$  - последовательности.

3. Установлено, что зондируемая область состоит из двух кластеров, при этом границы областей разброса параметров более чётко разделяются при увеличении ограничения на угол давления.

4. Решена задача сравнения двух замкнутых кривых при поиске требуемого механизма из каталога механизмов. Она сведена к аппроксимационной задаче квадратического приближения, при решении которой четыре искомого переменных определены аналитически. Это позволило свести задачу поиска минимума по пяти переменным к минимизации функции одной переменной, характеризующий фазовый сдвиг вдоль кривой.

5. Представлены численные примеры реализации методики сравнения кривых на основе предложенного способа представления кривых.

6. На основе полученных аналитических результатов разработаны программы синтеза на алгоритмическом языке C++ для персонального компьютера.

7. Создана экспертная система анализа функциональных возможностей рычажных механизмов, позволяющая на ранних этапах проектирования оценить возможности выбранной структурной схемы и определить начальные приближения для параметров синтеза механизмов и, таким образом, полностью реализовать технологию "старт от нуля". Предложенная система позволяет намного повысить эффективность применения численных методов приближенного синтеза механизмов, поскольку полностью решает проблему начального приближения, являющегося слабым звеном всех численных методов.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. **Койшыбаева Ж.Б.** Использование анализа Фурье для синтеза направляющих механизмов [Текст] / С.М.Ибраев, Койшыбаева Ж.Б., М.К.Бибосынова// «Ізденіс» - «Поиск», Серия естественных и технических наук. Научное приложение международного журнала «Высшая школа Казахстан». - Алматы, 2005. - С. 248-352.

2. **Койшыбаева Ж.Б.** Кинестатика трехконтурного механизма с заданным относительным движением подвижных звеньев [Текст] / А.Т.Нурмаганбетова, А.Е.Тусупова, Д.Н.Тусупов, Койшыбаева Ж.Б. // Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева, № 4 (54) – Алматы, 2006.- С. 142-146.

3. **Койшыбаева Ж.Б.** Создание экспертной системы функционального анализа рычажных механизмов [Текст] / С.М.Ибраев, Койшыбаева Ж.Б.// Тезисы и докладов Международной научной конференций «Проблемы теоретической и прикладной механики» – Алматы, 2006. - С. 124.

4. **Койшыбаева Ж.Б.** Компьютерное моделирование кинематики и кинестатики преобразующего механизма привода штанговых насосных установок [Текст] / С.М.Ибраев, Н.С.Иманбаева, Койшыбаева Ж.Б.// «Ізденіс»-«Поиск». Серия естественных и технических наук. Научное приложение международного журнала «Высшая школа Казахстана». №4 – Алматы, 2010. - С. 308-311.

5. **Койшыбаева Ж.Б.** Численное описание замкнутого контура с использованием ряда Фурье. [Текст] / С.М.Ибраев, Койшыбаева Ж.Б., М.К.Бибосынова, Н.С.Иманбаева// Труды международной конференции «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии» – Алматы, 2010. - С. 298-301.

6. **Койшыбаева Ж.Б.** Кинематика ГПМ на основе многоконтурных МВК [Текст] / С.М.Ибраев, Койшыбаева Ж.Б., А.Т.Нурмаганбетова// «Ізденіс»-«Поиск». Серия естественных и технических наук. Научное приложение международного журнала «Высшая школа Казахстана», №4 – Алматы, 2010. – С. 302-307.

7. **Койшыбаева Ж.Б.** Сравнение двух замкнутых кривых использованием ряда Фурье [Текст] / С.М.Ибраев, Койшыбаева Ж.Б.// Вестник Центрально-Азиатского Университета, №1(24) – Алматы, 2011. – С. 92-95.

8. **Койшыбаева Ж.Б.** Оптимизация схем привода грузоподъемного механизма с заданным относительным движением несмежных звеньев на примере одного варианта соединения [Текст] / С.М.Ибраев, А.Т.Нурмаганбетова, Койшыбаева Ж.Б., М.М.Акимжанова // Тезисы и докладов Первого международного Джолдасбековского симпозиума – Алматы, 2011. – С. 71.

9. **Койшыбаева Ж.Б.** Применимость ряда Фурье к сравнительному анализу двух замкнутых кривых при синтезе направляющих рычажных механизмов [Текст]/ Койшыбаева Ж.Б.// «Известия вузов», №3 – Бишкек, 2011. – С. 40-43.

10. **Койшыбаева Ж.Б.** Аналитический синтез направляющих механизмов с использованием рядов Фурье в случае заданного закона движения шатунной точки на плоскости [Текст] / Койшыбаева Ж.Б. // «Наука и новые технологии», №3 – Бишкек, 2011. – С. 29-33.

11. **Койшыбаева Ж.Б.** Создание электронного каталога шатунных кривых рычажных механизмов на основе коэффициентов Фурье [Текст] / Койшыбаева Ж.Б. // «Известия вузов» №3 – Бишкек, 2011. – С. 59-64.

12. **Койшыбаева Ж.Б.** Оптимальное уравнивание привода штанговой насосной установки роторным и комбинированным способом уравнивания [Текст] / С.М.Ибраев, Н.С.Иманбаева, Койшыбаева Ж.Б., Т.И.Акилбаев // Тезисы и докладов Первого международного Джолдасбековского симпозиума – Алматы, 2011. – С. 72.

13. **Койшыбаева Ж.Б.** Способ представления шатунных кривых рычажных механизмов в электронном каталоге на основе коэффициентов Фурье [Текст] / С.М.Ибраев, Койшыбаева Ж.Б. // Вестник Центрально-Азиатского университета, №1(24) – Алматы, 2011. – С.88-91.

## РЕЗЮМЕ

**Койшыбаева Жанар Бидахметовнанын «Калтектшц механизмдерди функционалдык талдоонун эксперттик системасын тшцшц» темасындагы диссертациясы 05.02.18 – машиналардын Жана механизмдердин теориясы адистиги боюнча техникалык илимдердин кандидаты илимий даражасын коргоого кёрсөтцлгөн.**

**Ачкыч сөздөр:** калтектшц механизм, кинематикалык чынжыр, тшцшцшцшцшц – кинематикалык тшцмөлөё, квадраттык жакындоо.

**Изилдөөлөрдүн объектиси:** жалпак калтектшц механизмдер.

**Иштин максаты:** жалпак калтектшц механизмдердин функциялык талдоонун усулдары, тшцмөлөёншц алгоритмдери жана программалары.

**Усулдар:** машиналардын жана механизмдердин теориясынын, сызыктуу алгебранын жана оптимизация теориясынын усулдары.

**Натыйжалар:** баштапкы жакындатуу проблемасын толук чечшцшц, механизмдерди жакындатып синтездөөшц сандык усулдарын колдонуунун эффективтшцшцшцшц жогорулатуучу, калтектшц механизмдерди функционалдык талдоонун эксперттик системасы сунушталган. Фурьенин катарынын коэффициенттерин колдонуп, берилгендердин базасында калтектшц механизмдерди чагылдыруунун эффективтшц амалы иштелип чыккан. Мында механизмди издөө маселеси квадраттык жакындатуунун аппроксимациялык маселесине келтирилген. Бул амал өзгөрцшцмөлөрдшцн бир бөлшцшцн аналитикалык жол менен аныктоого мшцкшцшцшц берет. Жумушта Фурьенин катарын колдонуп, шатундун чекитинин тегиздиктеги берилген кыймылнын мыйза-

мынын мисалында багыттоочу механизмди синтездөө маселесин аналитикалык жол менен чечүү сунушталган. Берилгендердин базасын тизүүдө жөнделүүчү аймак эки кластерден турары аныкталган. Анын ичинде, параметрлердин жайгашуу аймагынын чеги басым бурчуна коюлган чектөөлөр көбөйгөндө аныгыраак бөлүнөт.

Демек, долбоорлоонун баштапкы этаптарында тандалган структуралык тизүүчү баалоого мүмкүнчүлүк берген, калпектуу механизмдердин функционалдык мүмкүнчүлүктөрүн талдоонун эксперттик системасы тизүүгөн. Алынган аналитикалык натыйжалардын негизинде персоналдык компьютер учун C++ тилинде программалар иштелип чыккан, тесттик мисалдардын натыйжалары келтирилген.



## РЕЗЮМЕ

диссертации Койшыбаевой Жанары Бидахметовны на тему:  
«Создание экспертной системы функционального анализа рычажных механизмов», представленной к защите на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.02.18- «Теория механизмов и машин»

**Ключевые слова:** рычажные механизмы, кинематические цепи, структурно-кинематический синтез, квадратическое приближение,  $ЛП_7$  - последовательности.

**Объектом исследований** являются плоские рычажные механизмы.

**Цель работы** - разработка методов, алгоритмов и программ синтеза и функционального анализа плоских рычажных механизмов.

Предложена экспертная система функционального анализа рычажных механизмов, которая позволяет намного повысить эффективность применения численных методов приближенного синтеза механизмов, и полностью решает проблему начального приближения для параметров синтеза. Разработан эффективный способ представления рычажных механизмов в базе данных с использованием коэффициентов ряда Фурье, при котором задача поиска механизма сведена к аппроксимационной задаче квадратического приближения. Это позволило значительную часть переменных определить аналитически. Предложено аналитическое решение задачи синтеза направляющих механизмов с использованием рядов Фурье в случае заданного закона движения шатунной точки на плоскости. Установлено, что при создании базы данных зондируемая область состоит из двух кластеров, при этом границы областей разброса параметров более четко разделяются при увеличении ограничения на угол давления.

Создана экспертная система анализа функциональных возможностей рычажных механизмов, позволяющая на ранних этапах проектирования оценить возможности выбранной структурной схемы и определить начальные приближения для параметров синтеза и, полностью реализовать технологию "старт от нуля". Разработаны программы синтеза на языке C++ для персонального компьютера.

## THE SUMMARY

**Koyshibaeva Zhanar Bidahmetovna «Creating an expert system of functional analysis of lever mechanisms» provided for the protection for the degree of candidate of technical sciences on a specialty 05.02.18 - "Theory of Mechanisms and Machines"**

**Keywords:** lever mechanisms, kinematical chains, structural and kinematical synthesis, a quadratic approximation.

**The objects** of research are flat lever mechanisms.

**The purpose** of the work - development of methods, algorithms and software of synthesis and functional analysis of flat lever mechanisms.

The results: A expert system functional analysis of of lever mechanisms that allows much increase the efficiency application of numerical methods for the approximate synthesis of mechanisms, completely solve the problem of the initial approximation.

The effective way of presenting of lever mechanisms to the database using the coefficients of the Fourier series at which problem of finding a mechanism is reduced to the problem of approximation of the quadratic approximation was developed.

This a significant part of the variables to determine analytically was allowed.

Proposed as An analytic solution of the problem of synthesis of the guide mechanisms with the use Fourier series in the case of a given law of motion of connecting rod point on the plane.

During database creation the probed region consists of two clusters, with the boundaries of the regions dispersion parameters more explicitly are divided by increasing restrictions on the pressure angle was established.

Thus, an expert system analysis features of lever mechanisms allows for early design stages to evaluate the possibility of a selected block diagram and determine the initial approximation for the parameters of synthesis and, thus, to fully implement the technology "start from scratch" was created.

On the basis of analytical results programs of synthesis in C++ for the PC were developed, the results of test cases were presented.