

**Институт машиноведения и автоматики
Национальной академии наук Кыргызской Республики
Кыргызский государственный технический университет
им. И. Раззакова
Министерство образования и науки Кыргызской Республики**

Диссертационный совет Д 05.18.576

На правах рукописи
УДК 621.01, 622.23

Коколеева Уларкан Уркунбаевна

**Разработка методов структурного синтеза кулачковых
механизмов со сложным толкателем**

05.02.18 – теория механизмов и машин

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек –2019

Работа выполнена на кафедре «Механика и промышленная инженерия» Кыргызского государственного технического университета (КГТУ) им. И. Раззакова.

Научный руководитель: Садиева Анаркуль Эсенкуловна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Пищевая инженерия» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Официальные оппоненты:

Абдраимов Эмиль Самудинович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института машиноведения и автоматики НАН КР;

Баялиев Алтынбек Жакыпбекович, кандидат технических наук, с.н.с., заведующий кафедрой «Механика» Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. И. Исанова.

Ведущая организация: Ошский технологический университет им. М. Адышева, кафедра «Прикладная механика» (Кыргызская Республика, г. Ош, ул. Н. Исанова, 81).

Защита состоится 20 декабря 2019 года в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 05.18.576 при Институте машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики (г. Бишкек ул. Скрябина, 23, <http://imash.kg>) и Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова Министерства образования и науки Кыргызской Республики (г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, <https://kstu.kg>) по адресу: г. Бишкек ул. Скрябина, 23. Код доступа к конференции: 857-352-6426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института машиноведения и автоматики НАН КР и Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова и на сайте: <http://imash.kg/index.php/soiskatel-kokoloeva-ularkan-urkunbaevna>.

Автореферат разослан «___» ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., с.н.с.



Квитко С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Экономическое развитие любого государства тесно связано с совершенствованием машиностроительной отрасли производства. В последние годы в Кыргызской Республике интенсивно развиваются легкая и пищевая промышленности. В целях дальнейшего усовершенствования применяемых в производстве машин создаются и внедряются новые механизмы. Соответственно создание новых машин и механизмов возможно лишь на основе серьезных научных исследований современных тенденций машиностроения.

В настоящее время в практике машиностроения широко применяются плоские механизмы, как зубчатые и кулачковые. Исследованиями структурного синтеза плоских механизмов занимались такие ученые как А. И. Тайнов, Л. А. Тимошкин, Г. Г. Баранов, Л. Т. Дворников и др. Задачи кинематического исследования кулачковых механизмов решали такие ученые как К. В. Тир, Г. А. Ротбарт, И. Я. Артоболевский, Я. И. Колчин, Н. Л. Левитский, Н. Н. Попов, Л. Н. Решетов, С. Н. Кожевников и др. Задачи кинестатического исследования кулачковых механизмов решались в работах С. И. Артоболевского, Н. И. Левитского, А. С. Кореняко и др.

Настоящая работа посвящена синтезу структур, кинематическому и кинестатическому исследованию кулачковых механизмов, которые пока ещё полностью не исследованы. Поэтому задача синтеза структур, кинематическое и кинестатическое исследование кулачкового механизма со сложным толкателем является актуальной.

Создание новых машин начинается с исследования их структуры и с поиска алгоритмов их структурного синтеза. Структура кулачковых механизмов включает в своем составе кинематические пары пятого p_5 и четвертого p_4 классов.

Связь темы диссертации с крупными научными программами (проектами) и основными научно-исследовательскими работами. Работа выполнялась в соответствии НИР КГТУ по теме: «Анализ и синтез машин и механизмов для работы в особых условиях» (2012-2015 гг.).

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методов структурного синтеза, с помощью которого возможно синтезировать многообразие схем кинематической цепи с заданной подвижностью, включая и нулевую подвижность (группы Ассура), кинематическое и кинестатическое исследование кулачковых механизмов со сложным толкателем.

Задачи исследования:

1. изучение современного состояния вопросов исследования плоских кулачковых механизмов;

2. изучение особенностей плоских кулачковых механизмов и разработка метода синтеза структур плоских кулачковых механизмов с одной кинематической парой четвертого классов p_4 ; обоснование алгоритма нахождения всего многообразия плоских кулачковых механизмов, включая механизмы со сложно движущимся толкателем;

3. разработка общих методов кинематического исследования кулачковых механизмов со сложным толкателем и методов описания профиля кулачка по заданному закону движения толкателя;

4. разработка метода кинетостатического исследования кулачкового механизма со сложным толкателем под действием приложенных сил и определение реакций в кинематических парах.

Научная новизна полученных результатов:

– разработана методика синтеза структур кулачковых механизмов с кинематическими парами пятого и четвертого классов при условии, когда кулачок соприкасается со звеньями одной парой четвертого класса ($p_4=1$), которая позволяет определить необходимые параметры механизмов: число подвижных звеньев n и число звеньев, добавляющих в цепи кинематических пар n_i , число кинематических пар пятого p_5 и четвертого классов p_4 , число ветвей цепи γ ;

– получены зависимости для определения скоростей и ускорений характерных точек звеньев кулачковых механизмов со сложным толкателем;

– установлены условия равновесия каждого из звеньев сложного толкателя кулачкового механизма с одной поступательной парой, позволяющие определить реакции в кинематических парах;

– разработан пятизвенный кулачкового механизма с двумя коромыслами, отличающаяся от известных тем, что одно коромысло толкателя движется поступательно, а второе устанавливается на неподвижном звене через упругие элементы, новизна которой защищена патентом КР№ 1665.

Практическая значимость полученных результатов:

– разработанный кулачковый механизм со сложным толкателем, позволяющий обеспечить сложное движение выходного звена, рекомендуется для использования в качестве рабочего органа машин;

– методика синтеза кулачковых механизмов, позволяющая определить необходимые параметры кулачковых механизмов, внедрена в учебный процесс КГТУ им. И. Раззакова при чтении лекций и проведении практических и лабораторных занятий для обучения студентов, направления «Прикладная механика», «Технологические машины и

оборудование», «Материаловедение и технология материалов».

Экономическая значимость полученных результатов. Экономическая эффективность использования разрабатываемого кулачкового механизма со сложным толкателем доказывается тем, что при его применении в машинах различного назначения существенно повышается срок их службы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Методика синтеза структур кулачковых механизмов с кинематическими парами пятого и четвертого классов при условии, когда кулачок соприкасается со звеньями одной парой четвертого класса равной единице ($p_4 = 1$), позволяющая определить полное многообразие плоских кулачковых механизмов с необходимыми и достаточными параметрами.

2. Зависимости, описывающие движение звеньев кулачковых механизмов со сложным толкателем, позволяющие определить скорости и ускорения характерных точек кулачковых механизмов со сложным толкателем с вращательными парами и с одной поступательной парой.

3. Зависимости, устанавливающие связь между действующими нагрузками (силы полезного сопротивления, силы инерции, моменты сил инерции, силы тяжести) и моментами, позволяющие определить полные реакции в кинематических парах.

Личный вклад соискателя. Основные научные результаты исследования получены соискателем лично. В соавторстве разработана схема пятизвенного кулачкового механизма со сложным толкателем. Разработана методика структурного синтеза кулачковых механизмов и выполнено кинематическое и кинетостатическое исследование кулачковых механизмов со сложным толкателем.

Апробации и результатов исследований. Основные положения диссертационной работы обсуждены на: научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития», посвященной 60-летию юбилею КГТУ им. И. Раззакова (Бишкек, 2014 г.); научно-практических конференциях: «Современные проблемы теории машин» (Новокузнецк, 2013 г.), «Теория машин и рабочих процессов», посвященной 90-летию со дня рождения академика О.Д.Алимова (Бишкек, 2013 г.), «Актуальные проблемы механики машин», посвященной 70-летию С. Абдраимова (Бишкек, 2014 г.); международных научно-практических конференциях: «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (Алматы, 2014 г.), «Результаты научных исследований: теория и практика» (Вологда, 2015 г.); «Фундаментальные основы механики» (Новокузнецк, 2017 г.), «Механика и машиностроение. Наука и практика» (Санкт-

Петербург, 2018 г.).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, из них: 6 статей – в научных журналах, индексируемых системой РИНЦ, опубликованных в Кыргызской Республике; 5 статей – в научных журналах, индексируемых системой РИНЦ, опубликованных за пределами Кыргызской Республики, 3 патента КР на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и 4 приложений. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 98 рисунков, 1 таблицу и библиографический список из 77 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, дается общая характеристика содержания работы. Приведены основы методики исследований, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен обзор и анализ известных научных исследований и вариантов применения в технике плоских кулачковых механизмов. Кулачковые механизмы предназначены для преобразования вращательного или поступательного движения кулачка в возвратно-вращательное или возвратно-поступательное или сложное движение толкателя. Важным преимуществом кулачковых механизмов является возможность обеспечения точных выстоев выходного звена. Это преимущество определило их широкое применение в простейших устройствах цикловой автоматики и в механических счетно-решающих устройствах (арифмометры, календарные механизмы). Кроме этого, кулачковые механизмы применяются в машиностроении: в двигателях внутреннего сгорания, металлорежущих станках, в полиграфическом оборудовании, ткацких станках и различных технологических машинах. Из анализа и обзора известных решений кулачковых механизмов следует, что кулачковые механизмы обладают важным преимуществом – возможность получения не только поступательного и вращательного, но и сложного движения толкателя.

Вторая глава посвящена обзору известных методов структурного синтеза, кинематического и кинетостатического исследования трехзвенных кулачковых механизмов.

Объект исследования: кулачковые механизмы.

Предмет исследования: структура, кинематические и динамические параметры пятизвенных кулачковых механизмов со сложным тол-

кателем.

В работах А. И. Тайнова, А. И. Тимошкина кулачковые механизмы в структурном отношении, рассматриваются как совокупность целых групп звеньев, т.е. групп Ассура, построены принципиальные схемы кулачковых механизмов путем наслоения на стойку и к ведущему звену. Для определения параметров кулачковых механизмов применены структурные формулы академика П. Л. Чебышева и В. В. Добровольского.

В работах И. И. Артоболевского, А. С. Коренько рассматривается задача кинематического исследования трехзвенных кулачковых механизмов. Задача о положениях кулачковых механизмов, у которых радиусы кривизны отдельных участков профиля кулачка не заданы, решается методом обращения движения. Аналитические и графические методы кинематического исследования трехзвенных кулачковых механизмов решались в работах А. С. Коренько, А. П. Малышева, Г. Г. Баранова, В. Н. Кудрявцева.

В работах А. С. Коренько, С. И. Артоболевского рассматривается задача кинетостатического исследования трехзвенных кулачковых механизмов. Определены давления в кинематических парах, равнодействующая всех, сил приложенных к толкателю, в зависимости от действующих нагрузок: силы инерции звеньев и сил натяжения пружины.

В третьей главе разработан метод структурного синтеза, рассмотрены особенности кинематического и кинетостатического исследования кулачковых механизмов со сложным толкателем с вращательными парами и с одной поступательной парой.

В 1993 году профессором Л. Т. Дворниковым была разработана универсальная структурная система поиска структур механизмов, которая дает возможность целенаправленно решать задачи синтеза структур кинематических цепей, в том числе кулачковых механизмов с кинематическими парами четвертого и пятого классов.

Любая кинематическая цепь описывается универсальной структурной системой профессора Л. Т. Дворникова, имеющей вид:

$$\begin{cases} \sum p_k = \tau \cdot n_\tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1, \\ n = n_\tau + n_{\tau-2} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1 + n_0, \\ W = (6 - m)n - \sum_{k=5}^{m+1} (k - m)p_k. \end{cases} \quad (1)$$

где p_k – количество кинематических пар k -го класса, τ – количество кинематических пар наиболее сложного базисного звена цепи, n_i – число звеньев, добавляющих в цепь i кинематических пар, n_τ – число звеньев,

добавляющих в цепь кинематических пар n - число подвижных звеньев, W - подвижность кинематической цепи, m - параметр В. В. Добровольского, определяющий семейство механизмов; для плоских механизмов $m=3$, k - класс кинематических пар.

Универсальная структурная система для плоских кинематических цепей с кинематическими парами четвертого и пятого классов была рассмотрена в диссертационной работе профессора А. Э. Садиевой и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n, \\ W = 3n - 2p_5 - p_4. \end{cases} \quad (2)$$

где p_4 и p_5 число кинематических пар соответственно четвертого и пятого классов.

Рассмотрим кулачковые механизмы, когда кулачок соприкасается со звеньями одной парой четвертого класса т.е.

$$p_4 = 1. \quad (3)$$

Найдем структуры кулачковых механизмов, в которых $\tau = 2$, т.е. наиболее сложное звено есть линейное или «двухугольник».

Если задать подвижность механизма $W=1$, то количество кинематических пар p_5 можно определить из системы (2):

$$\begin{cases} p_5 = 2 + n_1 - 1, \\ n = 1 + n_1. \end{cases} \quad (4)$$

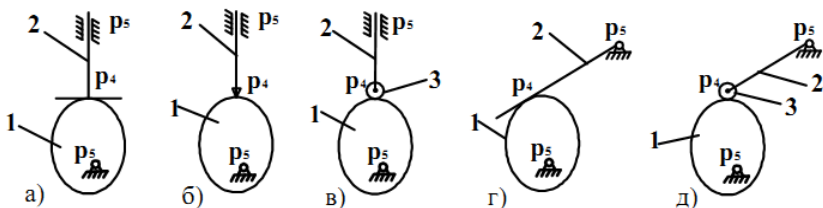
Система (4) дает решение $n = 2$, $p_5 = 2$, $n_1 = 1$. Это решение реализуется механизмами, приведенными на рисунках 1 а, б, в, г, д.

Примем за наиболее сложное базисное звено - треугольное звено, т.е. зададим $\tau = 3$. Система (2) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 = 3 + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_2 + n_1, \\ W = 3n + 2p_5 + p_4. \end{cases} \quad (5)$$

Из второго уравнения системы (5) выразим n_1 , это звенья, добавляющиеся в цепь одну кинематическую пару:

$$n_1 = n - 1 - n_2. \quad (6)$$



1 – кулачок, 2 – толкатель, 3-ролик.

Рисунок 1- Схемы трехзвенных кулачковых механизмов при $\tau = 2$ с парами p_4 и p_5 : с плоским толкателем (а); с поступательно движущимся толкателем с острием на конце (б); с поступательно движущимся толкателем и роликом (в); с вращательно движущимся толкателем и роликом (д)

Подставим значение n_1 в первое уравнение системы (4), получим

$$n = p_5 + p_4 - n_2 - 2. \quad (7)$$

Далее, подставив значение n из формулы (7) в третье уравнение системы (2), при $W = 1$, получим:

$$p_5 + 2p_4 - 3n_2 = 7. \quad (8)$$

Пусть $p_4 = 1$, $n_2 = 0$, тогда формулы (6), (7), (8) и (3) дают решения $n_2 = 0$, $n_1 = 3$, $n = 4$, $p_5 = 5$, $p_4 = 1$.

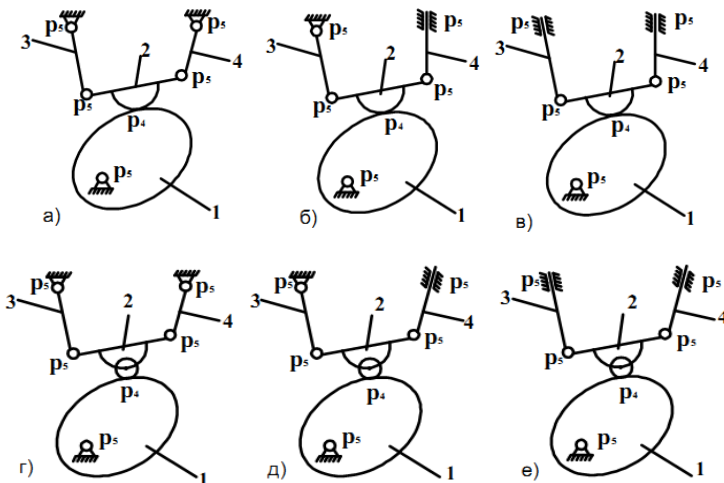
На рисунках 2 а, б, в, г, д, е приведены кулачковые механизмы, удовлетворяющие данному решению. Они представляют собой пятизвенные кулачковые механизмы со сложным толкателем. Заменяя одну вращательную кинематическую пару звена 4 механизма (рисунок 2 а) на поступательную, получаем схему кулачкового механизма, представленную на рисунке 2 б.

Каждая схема будет отличаться числом ветвей. Число ветвей кинематической цепи определяется по следующей формуле:

$$\gamma = p - (n - 1). \quad (9)$$

Таким образом, для создания (синтезирования) нового кулачкового механизма, необходимо выполнить действия по следующему алгоритму:

1. Задается подвижность кулачкового механизма $W = 1$.



1 – кулачок, 2 – промежуточное звено, 3, 4 – коромысла.

Рисунок 2 - Схемы пятизвенных кулачковых механизмов с параметрами $\tau = 3, p_5 = 5, p_4 = 1, n_2 = 0, n_1 = 3, n = 4$: с вращательными парами (а); с одной поступательной парой (б); с двумя поступательными парами (в); с двумя вращательными парами и роликом (г); с одной поступательной парой и роликом (д); с двумя поступательными парами и роликом (е)

2. Выбирается наиболее сложное звено цепи τ , например: $\tau = 2, \tau = 3, \tau = 4$ и т. д.

3. Определяется количество подвижных звеньев:

$$n = p_5 + p_4 - n_2 - 2.$$

4. Определяется количество звеньев, добавляющих в цепь одну кинематическую пару:

$$n_1 = n - 1 - n_2.$$

5. Определяется количество кинематических пар пятого класса:

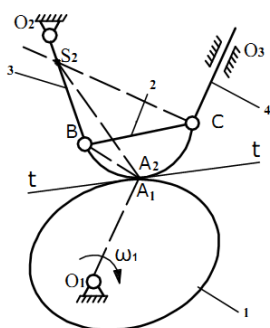
$$p_5 = 7 - 2p_4 + 3n_2.$$

6. Определяется число ветвей кинематической цепи:

$$\gamma = p - (n - 1).$$

7. Строится схема кулачкового механизма.

Далее рассмотрено кинематическое исследование кулачкового механизма со сложным толкателем с одной поступательной парой. С целью расширения возможностей воспроизведения закона движения ведомого звена, плоские кулачковые механизмы могут создаваться со сложным толкателем, получающим движение от специально выполненного шатуна, взаимодействующего с кулачком. Закон движения такого сложного толкателя определяется законом движения входного кулачка и кривой, по которой очерчивается профиль кулачка. Такие механизмы до настоящего времени еще не исследованы. На рисунке 4 показан кулачковый механизм со сложным толкателем, в котором одно из звеньев



1 - кулачок, 2 - промежуточное звено, 3, 4 - коромысла.

Рисунок 4 – Пятизвенный кулачковый механизм со сложным толкателем

(выходное) перемещается относительно стойки поступательно. На этот механизм получен патент Кыргызской Республики на изобретение и выполнено его кинематическое исследование.

Работает этот механизм следующим образом. Кулачок 1, взаимодействуя со звеном 2, приводит в движение звенья 3 и 4. Выходным звеном является звено 4, которое движется поступательно. В высшей (точной) кинематической паре A , через которую ведущее звено 1 передает движение шатуну 2, выделим две точки A_1 и A_2 , принадлежащие соответственно звеньям 1 и 2. Заданной является угловая скорость кулачка ω_1 .

Заддим кулачку 1 закон движения и найдем скорости и ускорения звеньев: шатуна 2, а также звеньев 3 и 4.

Найдем скорость точки A_1 , принадлежащей кулачку 1, которая направлена в сторону вращения кулачка перпендикулярно к O_1A_1 (рисунок 5). Она определится формулой:

$$\vec{V}_{A_1} = \omega_1 \cdot \vec{l}_{O_1A_1} \text{ при } \vec{V}_{A_1} \perp O_1A_1, \quad (10)$$

где $\vec{l}_{O_1A_1}$ – радиус вектор точки A_1 кулачка.

Скорость точки A_2 второго звена определится через скорость проскальзывания звена 2 относительно кулачка по касательной $t-t$ (рисунок 4), а также относительно точки S_2 , мгновенного центра скоростей

звена 2, которая лежит на пересечении продолжения линии звена O_2B и перпендикуляра к поступательно движущемуся звену 4 CO_3 , проведенного из центра шарнира C . Эта точка является мгновенно неподвижной и находится в полюсе плана скоростей.

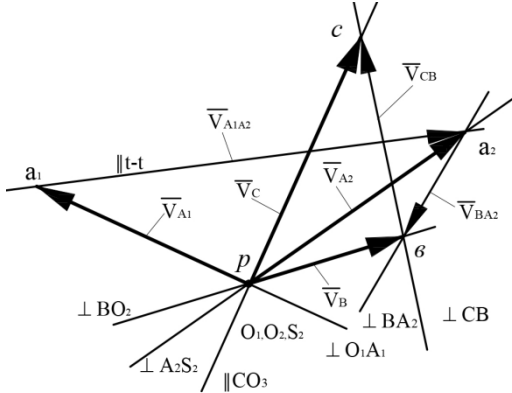


Рисунок 5 - План скоростей кулачкового механизма со сложным толкателем

С учетом изложенного составим систему уравнений для скорости точки A_2 :

$$\begin{cases} \bar{V}_{A_2} = \bar{V}_{A_1} + \bar{V}_{A_2A_1}, & \bar{V}_{A_2A_1} \parallel t-t, \\ \bar{V}_{A_2} = \bar{V}_{S_2} + \bar{V}_{A_2S_2}, & \bar{V}_{S_2} = 0, \bar{V}_{A_2S_2} \perp A_2S_2, \end{cases} \quad (11)$$

где относительная скорость $\bar{V}_{A_2A_1}$ направлена параллельно касательной $t-t$; скорость \bar{V}_{S_2} равна нулю, а скорость $\bar{V}_{A_2S_2}$ перпендикулярна направлению A_2S_2 . Проведя из полюса плана известный вектор \bar{V}_{A_1} , из конца его линии параллельно $t-t$, а из полюса - линию параллельно A_2S_2 , найдем скорость A_2 .

После нахождения скорости \bar{V}_{A_2} , появляется возможность определения скорости точки B из соотношений:

$$\begin{cases} \bar{V}_B = \bar{V}_{O_2} + \bar{V}_{BO_2}, & \bar{V}_{O_2} = 0, \bar{V}_{BO_2} \perp BO_2, \\ \bar{V}_B = \bar{V}_{A_2} + \bar{V}_{BA_2}, & \bar{V}_{BA_2} \perp BA_2. \end{cases} \quad (12)$$

Для этого из точки a_2 плана (рисунок 5) проводим линию, перпендикулярную BA_2 , а из полюса плана линию, перпендикулярную BO_2 , и на их пересечении найдем точку b , определяющая скорость \bar{V}_B .

Скорость точки C определится из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \bar{V}_C = \bar{V}_B + \bar{V}_{CB}, \bar{V}_{CB} \perp CB, \\ \bar{V}_C \parallel CO_3, \end{cases} \quad (13)$$

где вектор скорости \bar{V}_{CB} точки C относительно B направлен перпендикулярно звену CB , а скорость точки C параллельна CO_3 .

С использованием приведенных зависимостей на рисунке 5 построен план скоростей всего механизма.

Рассчитаны ускорения звеньев и точек кулачкового механизма (рисунок 6). Так как угловая скорость кулачка $\omega_1 = const$, ускорение точки A_1 первого звена определится как

$$a_{A_1}^n = \omega_1^2 \cdot l_{O_1A_1}, \quad a_{A_1}^n \parallel O_1A_1. \quad (14)$$

Это ускорение направлено параллельно линии O_1A_1 к центру вращения. Далее определим угловые скорости звеньев 2 и 3:

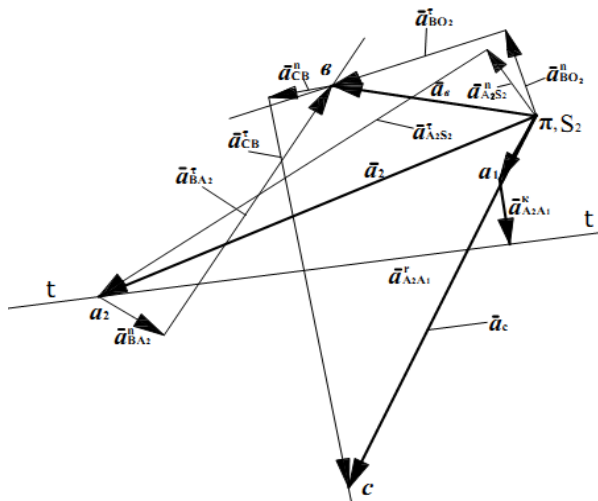


Рисунок 6 - План ускорений кулачкового механизма со сложным толкателем

$$\omega_2 = \frac{V_{BA_2}}{l_{BA_2}}, \quad \omega_3 = \frac{V_{BO_2}}{l_{BO_2}},$$

где l_{BA_2} - расстояние от точки В до точки A_2 , l_{BO_2} - расстояние от точки В до точки O_2 .

При построении плана ускорений учитывалось, что движение точки A_2 относительно A_1 поступательное, а потому между ними возникает кориолисово $\overline{a}_{A_2A_1}^k$ и релятивное $\overline{a}_{A_2A_1}^r$ ускорения, т. е. ускорение точки A_2 второго звена определится системой уравнений:

$$\begin{cases} \overline{a}_{A_2} = \overline{a}_{A_1} + \overline{a}_{A_2A_1}^k + \overline{a}_{A_2A_1}^r, \\ \overline{a}_{A_2} = \overline{a}_{S_2} + \overline{a}_{A_2S_2}^n + \overline{a}_{A_2S_2}^t. \end{cases} \quad (15)$$

где \overline{a}_{S_2} - ускорение точка S_2 ; $\overline{a}_{A_2S_2}^n$, $\overline{a}_{A_2S_2}^t$ - нормальная, тангенциальная составляющая ускорения точки A_2 относительно S_2 .

Значение кориолисового ускорения определяется по формуле: $\overline{a}_{A_2A_1}^k = 2\omega_1 \overline{V}_{A_2A_1}$, $\overline{a}_{A_2A_1}^k \perp t-t$ и направлено в сторону вращения кулачка, а релятивное ускорение $\overline{a}_{A_2A_1}^r // t-t$, направлено параллельно касательной $t-t$.

Ускорение точки В определится из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \overline{a}_B = \overline{a}_{A_2} + \overline{a}_{BA_2}^n + \overline{a}_{BA_2}^t, \\ \overline{a}_B = \overline{a}_{O_2} + \overline{a}_{BO_2}^n + \overline{a}_{BO_2}^t. \end{cases} \quad (16)$$

Значения нормальных ускорений точки В относительно A_2 - $\overline{a}_{BA_2}^n$, и точки В относительно O_2 - $\overline{a}_{BO_2}^n$ определяются по следующим формулам:

$$a_{BA_2}^n = \omega_2 \cdot l_{BA_2} \text{ и } a_{BO_2}^n = \omega_3 \cdot l_{BO_2}.$$

Вектор ускорения $a_{BA_2}^n$ направлен от точки В к точке A_2 параллельно направлению BA_2 , а вектор ускорения $a_{BO_2}^n$ направлен от точки

B к точке O_2 параллельно направлению BO_2 . Таким образом, найдены нормальные ускорения $a_{BA_2}^n, a_{BO_2}^n$ по величине и направлению. Векторы $\vec{a}_{BA_2}^\tau, \vec{a}_{BO_2}^\tau$ известны только по направлению. Первый вектор направлен перпендикулярно к направлению BA_2 , второй – перпендикулярно к направлению BO_2 .

Далее, пользуясь системой уравнений (16), откладывая и направляя векторы ускорения, определяется ускорение точки B .

С учетом изложенного составим систему уравнений для определения ускорения точки C второго звена толкателя:

$$\begin{cases} \vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}_{CB}^n + \vec{a}_{CB}^\tau \\ \vec{a}_C \parallel CO_3. \end{cases} \quad (17)$$

Откладывая значение векторов и их направление, получаем значение ускорения точки C на плане ускорений (рисунок 6).

Далее решается задача кинетостатического исследования пятизвенного кулачкового механизма, приведенного на рисунке 7. Выполнен силовой анализ группы Ассур (рисунок 8).

Силы инерции определяются как:

$$\vec{F}_{u_1} = -m_1 \cdot a_{q_1}, \vec{F}_{u_2} = -m_2 \cdot a_{q_2}, \vec{F}_{u_3} = -m_3 \cdot a_{q_3}, \vec{F}_{u_4} = -m_4 \cdot a_{q_4}$$

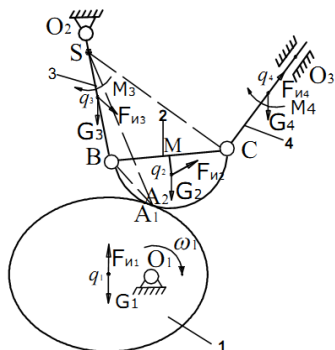
и направлены в сторону, обратную направлениям ускорений – $a_{q_1}, a_{q_2}, a_{q_3}, a_{q_4}$, где \vec{F}_u – сила инерции, m – масса звеньев, a_q – ускорения.

Определяем нормальную составляющую реакции в шарнире $O_3(R_{O_3}^n)$ из уравнения равновесия четвертого звена, она направлена перпендикулярно направляющей $X-X$:

$$\sum_{\text{звено 4}} M(C) = 0 \Rightarrow \vec{R}_{O_3}^n.$$

Составив сумму моментов всех сил, действующих на группу относительно точки S (центр мгновенных скоростей звена 2), можно определить реакцию R_{12} в кинематической паре A

$$\sum_{\text{групп}} M(S) = 0 \Rightarrow \vec{R}_{12}.$$



1 - кулачок, 2 - промежуточное звено, 3, 4 – коромысла.

Рисунок 7 – Расчетная схема пятизвенного кулачкового механизма с одной поступательной парой

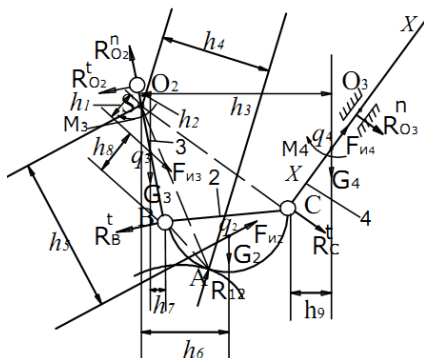


Рисунок 8 - Расчетная схема трехзвенной группы Ассура с одной кинематической парой p_4 и одной поступательной парой p_5

Для определения реакции R_C составим векторную сумму всех сил, действующих на звено

$$\sum_{\text{звено 4}} \bar{F} = 0 \Rightarrow \bar{R}_C.$$

Уравнение решается графическим построением плана сил (рисунок 9).

Рассматривая далее равновесие второго и третьего звеньев из векторных уравнений суммы сил, действующих на них, находим полные реакции в шарнирах B и O_2 (рисунок 10):

$$\sum_{\text{звено 2}} \bar{F} = 0 \Rightarrow \bar{R}_B, \quad \sum_{\text{звено 3}} \bar{F} = 0 \Rightarrow \bar{R}_{O_2}$$

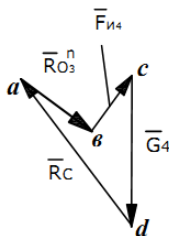


Рисунок 9 - План сил для четвертого звена

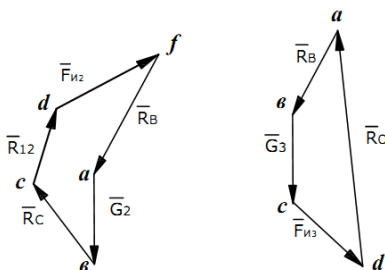


Рисунок 10 – Планы сил для второго и третьего звеньев

Для определения неизвестной силы реакции \bar{R}_{O_1} составим уравнение:

$$\bar{G}_1 + \bar{R}_{12} + \bar{F}_{и1} + \bar{R}_{O_1} = 0.$$

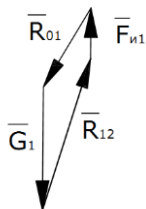


Рисунок 11 - План сил для первого звена

На основании приведенного векторного уравнения построим план сил и определим реакцию в кинематической паре O_1 (рисунок 11).

На основании проведенного кинетостатического исследования кулачкового механизма со сложным толкателем с помощью планов сил можно установить, что сложный пятизвенный кулачковый механизм является кинетостатически вполне разрешимым.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе дано решение актуальной задачи синтеза структур плоских кинематических цепей с кинематическими парами пятого и четвертого классов, кулачковых механизмов и их кинематическое и кинетостатическое исследование. При этом получены следующие результаты:

1. Общее решение универсальной структурной системы для плоских механизмов, позволяет по независимым параметрам подвижности W и количества пар базисного звена τ находить число подвижных звеньев n , число звеньев n_i , добавляющих в цепь i кинематических пар, и кинематических пар пятого класса p_5 кулачковых механизмов и построить схему механизма.

2. Разработан универсальный метод синтеза структур кулачковых механизмов с одной кинематической парой $p_4 = 1$, который позволяет получить необходимые и достаточные параметры цепей и определить их отличия.

3. Построены схемы трехзвенных кулачковых механизмов с количеством пар базисного звена, равным двум ($\tau = 2$) и трем ($\tau = 3$), пятизвенных (при $\tau = 3$) и семизвенных (при $\tau = 3$) кулачковых механизмов.

4. Разработан алгоритм синтеза структур кулачковых механизмов, позволяющий построить схемы кулачковых механизмов отличаю-

щихся числом ветвей кинематических цепей.

5. Определены скорости и ускорения характерных точек звеньев кулачковых механизмов со сложным толкателем на основе их кинематического исследования. Построен профиль кулачка кулачкового механизма со сложным толкателем с применением метода обращения движения.

6. Определены реакции в кинематических парах звеньев кулачковых механизмов со сложным толкателем путем построения планов сил на основе кинетостатического исследования.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Методика синтеза структур кулачковых механизмов с кинематическими парами пятого и четвертого классов при условии $p_4 = 1$ может быть использована при построении различных структурных схем кулачковых механизмов с применением универсальной структурной системы.

2. Результаты кинетостатического исследования кулачковых механизмов со сложным толкателем могут быть использованы для определения массо– геометрических параметров кулачковых механизмов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Садиева, А. Э. Синтез структур механизмов третьего семейства [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова // Известия КГТУ им. И. Раззакова №26.- Бишкек: Техник, 2012.- С.57-61.

2. Садиева, А. Э. Исследование трехзвенных и четырехзвенных кулачковых механизмов [Текст] / А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, Н. М. Байгалопов // Материалы 54-й научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Наука-основа инновации», КГТУ им. И. Раззакова, - Бишкек: Техник, 2012. -С. 22-26.

3. Патент Кыргызской Республики №1515. Уравновешенный двухсателлитный самоустанавливающийся планетарный механизм. [Текст] / Л. Т. Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова ; заявл. 15.07.201; опубл. 31.12.2012, Бюл. №12. -4с.

4. Садиева, А. Э. Определение скоростей характерных точек кулачковых механизмов со сложным толкателем [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева** // Материалы 55-й научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Научные исследования - основа научно – технического прогресса», КГТУ им. И. Раззакова.- Бишкек: Техник, 2013. -С. 56-58.

5. Дворников, Л. Т. Методика синтеза плоских групп нулевой подвижности с кинематическими парами пятого и четвертого классов [Текст] / Л. Т. Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева** // Материалы Первой Международной научно- практической конференции «Современные проблемы теории машин».- Новокузнецк: СиБГИУ, 2013. -С.57-60.<https://elibrary.ru/item.asp?id=20889941>.

6. Дворников, Л. Т. Синтез структур групп Ассура кулачковых механизмов [Текст] / Л. Т. Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева** // Материалы Международной научно-практической конференции «Теория машин и рабочих процессов» посвященная 90 – летию со дня рождения академика О. Д. Алимова.- Бишкек: ИМаш НАН КР, 2013.- С. 67-69.

7. Садиева, А. Э. Кинематический синтез кулачкового механизма со сложным толкателем [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова //Материалы международной научно- технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновация – вектор для молодежи», КГТУим. И. Раззакова.- Бишкек: Техник, 2014. - С. 168-170.

8. Дворников, Л. Т. Вопросы структурного синтеза кулачковых механизмов [Текст] / Л. Т. Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева** //Материалы IV международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения».- Алматы: Куанышев, 2014.- С.233-236.

9. Садиева, А. Э. Вопросы структурного синтеза трехзвенных и пятизвенных групп Ассура кулачковых механизмов [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова // Материалы международной научно-технической конференции «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития», посвященной 60-летию юбилею КГТУ им. И. Раззакова.- Бишкек: Техник, 2014.-С.236-238.

10. Садиева, А. Э. Кинематическое исследование кулачкового механизма со сложным толкателем [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова // Материалы республиканской научно – практической конференции «Актуальные проблемы механики машин» посвященная 70-летию со дня рождения член – кор. НАН КР, первого президента Инженерной академии КР С. А. Абдраимова. -Бишкек: ИМаш НАН КР, 2014. -С. 20-22.

11. Патент №1665 Кыргызская Республика.Пятизвенный кулачковый механизм со сложным толкателем.[Текст] / Л. Т. Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова; заявл.13.06.2013;опубл. 29.08.2014,Бюл. №8. – 5 с.

12. Садиева, А. Э. Кинетостатическое исследование кулачкового механизма со сложным толкателем [Текст] /А. Э. Садиева,

У. У. Кокоева// Материалы международной научно- технической конференции молодых ученых и студентов «Молодежь в инновационных исследованиях », КГТУ им. И. Раззакова.- Бишкек: Техник, 2015. - С. 254-256.

13. Дворников, Л. Т. Разработка методики нахождения схем кулачкового механизма с виртуальными парами [Текст] / Л. Т. Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева** // Научно-технический журнал №1(1)Бишкек: ИМаш НАН КР, 2015. -С. 4-7.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=28213909>

14. Садиева, А. Э. Кинематические исследования кулачкового механизма со сложным толкателем графо – аналитическим методом[Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова // Материалы I Международной научно–практической конференции «Результаты научных исследований: теория и практика». - Вологда: Форум, 2015. -С.30-35.

15. **Кокоева, У. У.** Особенности кинематического исследования кулачкового механизма со сложным толкателем [Текст] /У. У. Кокоева, А. Э. Садиева // Материалы девятой научно-методической конференции. - Новокузнецк: СибГИУ, 2015. -С.41-46.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24846196>

16. Садиева, А. Э. Силовой анализ пятизвенных кулачковых механизмов [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душенова // Материалы Международной научно–практической интернет конференции «Инновационный потенциал развития науки и технологии», посвященной юбилею академика МИА, д.х.н., проф. Баткибековой М. Б. КГТУ им. И.Раззакова.- Бишкек: Техник, 2015. -С.164-168.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=30291545>

17. Садиева, А. Э. Геометрический синтез кулачкового механизма со сложным толкателем [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, А. К. Токтогулова // Материалы Международной научно–практической конференции «Инновационные подходы и технологии для повышения эффективности производств в условиях глобальной конкуренции», посвященная памяти проф. Е. Т. Тулеуова. - Семей: Государственный университет имени Шакарима, 2016. -С.318-322.

18. Садиева, А. Э. Построение профиля пятизвенного кулачкового механизма со сложным толкателем [Текст] /А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, Ш. Суеркулова, А. Момуналиев // Материалы научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодежь – движущая сила науки» КГТУ им. И. Раззакова.– Бишкек:Техник, 2016. -С.152-154.

19. **Кокоева, У. У.** Вопросы структурного синтеза семизвен-

ных групп Ассура кулачковых механизмов [Текст] / У. У. Кокоева// Известия КГТУ им. И.Раззакова №3(39) часть II.–Бишкек: Техник, 2016. -С.9-11. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27421975>

20. Садиева, А. Э. Аналитическое кинематическое исследования кулачкового механизма со сложным толкателем [Текст] / А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**// Материалы Международной научно – практической конференции, посвященной памяти проф. Б. А. Нурунбетова, Известия ОшТУ им. М. Адышева №2.- Ош: ОшТУ им. М. Адышева, 2016. -С.72-76. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28843502>

21. Садиева, А. Э. Вопросы применения кулачковых механизмов в различных отраслях промышленности [Текст] / А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, Т. Керимкалыйев // Материалы научно- технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодой ученый – вызовы и перспективы» КГТУ им. И. Раззакова. - Бишкек: Техник, 2017.-С.256-258.

22. Садиева, А. Э. Разработка методики нахождения схем семизвенных кулачковых механизмов с виртуальными парами [Текст] / А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**// Материалы Международной научно – технической практической конференции ученых, инженеров, магистров и студентов «Инновационная технология – основы инженерного творчества», посвященной 25 – летию образования Токмокского филиала им. Академика Х. А. Рахматулина при КГТУ. - Бишкек: Техник, 2017.- С.129-132. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29004705>

23. Дворников, Л. Т. Силовой анализ пятизвенного кулачкового механизма с одной поступательной парой [Текст] / Л. Т.Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**// Материалы международной научно – практической конференции «Фундаментальные основы механики».- Новокузнецк: НИЦ МС, №2, 2017. - С.45-48. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30291545>

24. Дворников, Л. Т. Методика синтеза кулачковых механизмов [Текст] / Л.Т.Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**и др.// Машиноведение, №1(7). -Бишкек: ИМаш НАН КР, 2018. -С. 10-14. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36468573>

25. Садиева, А. Э. Методика синтеза структур кулачковых механизмов [Текст] / А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева** // Материалы международной научно-практической конференции «Механика и машиностроение. Наука и практика», №1. –С.- Пб:СПбФ НИЦ МС, 2018. -С.10-14. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36861048>

26. Садиева, А. Э. Синтез структур кулачковых механизмов с двумя высшими парами [Текст] / А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, К. Э. Базарбаев, А. К. Токтогулова // Материалы международной научно-

практической конференции «Механика и машиностроение. Наука и практика», №1. –С.-Пб: СПбФ НИЦ МС, 2018. –С.17-19.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=36861050>

27. Патент № 256 Кыргызская Республика. Пятизвенный кулачковый механизм со сложным толкателем с геометрическим замыканием. [Текст] / Л.Т. Дворников, А. Э. Садиева, **У. У. Кокоева**, М. А. Душеннова; заявл. 09.01.2018;опубл. 28.02.2019, Бюл. №2. - 5 с.

Көкөлөева Уларкан Үркүнбаевнанын 05.02.18 – механизмдердин жана машинелердин назарияты адистиги боюнча техникалык илимдердин кандидатыгы боюнча окмуштуулук даражасын изденүү үчүн “Татаал түрткүчтүү муштумчалуу механизмдердин түзүлүштүк түзмөлөө ыкмасын иштеп чыгуу ” темасына жазылган диссертациясынын РЕЗЮМЕСИ

Түйүн сөздөр: тогоо, негиздик тогоо, кинематикалык жуптук, кыймылдуулук, кинематикалык чынжырлар, тегиздиктеги механизмдер, бутактардын саны, муштумчалуу механизмдер, түзмөлөө, түрткүч.

Изилдөө объекти: муштумчалуу механизмдер.

Изилдөө предмети: беш тогоолуу муштумчалуу механизмдин түзүлүштүк, кинематикалык жана динамикалык көрсөткүчтөрү.

Изилдөөнүн максаты: берилген кыймылдыктагы нөлдүк кыймыл санды кошкондо (Ассур топторун), кинематикалык чынжырлардын түзүлүштөрүнүн көп түрүн түзмөлөөгө мүмкүн болгондой түзүлүштүк түзмөлөөнүн ыкмаларын иштеп чыгуу.

Изилдөө усулдары жана аппараттары: диссертацияда муштумчалуу механизмдерди талдоонун белгилүү ыкмалары, муштумчалуу механизмдин кинематикасын жана кинетостатикасын изилдөөнүн графо –аналитикалык ыкмалары колдонулган.

Алынган жыйынтыктардын илимий жаңылыгы: -механизмдердин керектүү көрсөткүчтөрүн: n – кыймылдуу тоголордун, n_i – чынжырга i – кинематикалык жуптугун кошо алган тогоолордун, p_5 и p_4 кинематикалык жуптугунун, γ -чынжырдын бутактарынын санын аныктаган жана $p_4=1$ шартын канааттандыра алган төртүнчү жана бешинчи класстагы кинематикалык жуптугу бар татаал түрткүчтүү муштумчалуу механизмдин түзүлүштүк түзмөлөөсүнүн ыкмалары иштелип чыккан; - татаал түрткүчтүү муштумчалуу механизмдин берилген чекиттеринин ылдамдыгынын жана ылдамдануусунун ортосундагы көз карандылык; -кинематикалык жуптуктардагы реакция күчтөрүн аныктоого мүмкүнчүлүк берген, муштумчалуу механизмдин татаал түрткүчүнүн ар бир тогоосунун тен салмактуулугу отнотулган;- бир термелгичи түз сызыктуу умтулма кыймыл жасаган, экинчиси серпилгичтүү элемент аркылуу тирөөчкө бекитилгендиги менен айырмаланган беш тогоолуу муштумчалуу механизмдин схемасы иштеп чыгарылган.

Колдонуу даражасы: алынган жыйынтыктар «Ак тилек» ААКдажана И. Раззаков атындагы КМТУнун окуу процессинде колдонулган.

Колдонуу тармагы : муштумчалуу механизмдерди эсептөө жана иштеп чыгуу.

РЕЗЮМЕ

диссертации Коколоевой Уларкан Уркумбаевны на тему:
**«Разработка методов структурного синтеза кулачковых механизмов со сложным толкателем» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.02.18 – теория механизмов и машин**

Ключевые слова: звено, базисное звено, кинематическая пара, подвижность, кинематические цепи, плоские механизмы, число ветвей, кулачковые механизмы, синтез, толкатель.

Объект исследования: кулачковые механизмы.

Предмет исследования: структура, кинематические и динамические параметры пятизвенных кулачковых механизмов со сложным толкателем.

Цель работы: разработка методов структурного синтеза, с помощью которого возможно синтезировать многообразие схем кинематической цепи с заданной подвижностью, включая и нулевую подвижность (группы Ассура), кинематическое и кинетостатическое исследование кулачковых механизмов со сложным толкателем.

Методы исследования и аппаратура: использованы методы анализа кулачковых механизмов, графо-аналитические методы кинематического и кинетостатического исследования кулачкового механизма.

Научная новизна полученных результатов: разработана методика синтеза структур кулачковых механизмов с кинематическими параметрами пятого и четвертого классов при условии, когда кулачок соприкасается со звеньями одной парой четвертого класса ($p_4=1$), которая позволяет определить необходимые параметры механизмов: число подвижных звеньев $л$ и число звеньев, добавляющих в цепи кинематических пар $л_i$, число кинематических пар пятого и четвертого классов p_5 и p_4 , число ветвей цепи γ ; установлены зависимости для определения скоростей и ускорений характерных точек звеньев кулачковых механизмов со сложным толкателем; установлены условия равновесия каждого из звеньев сложного толкателя кулачкового механизма с одной поступательной парой, позволяющие определить реакции в кинематических парах; разработана схема пятизвенного кулачкового механизма с двумя коромыслами, отличающаяся от известных тем, что одно коромысло толкателя движется поступательно, а второе устанавливается на неподвижном звене через упругие элементы.

Степень использования: Полученные результаты внедрены в ОАО «Ак тилек» и в учебный процесс КГТУ им. И. Раззакова.

Область применения: разработка и проектирование кулачковых механизмов.

SUMMARY

on the dissertation of the Kokoloeva Ularkan Urkunbaevna on the theme: «Development of methods for the structural synthesis of cam mechanisms with a complex pusher» the degree of the candidate of technical sciences on specialty 05.02.18 - theory of mechanisms and machines

Key words: chain, basic chain, kinematic pair, mobility, kinematic chains, plane mechanisms, number of branches, cam mechanisms, synthesis, push rod.

Object of research: cam mechanisms.

Subject of research: structure, kinematic and dynamic parameters of five-chain cam mechanisms with a complex pusher.

Objective of the research: development of methods of structural synthesis, using which it would be possible to synthesize a variety of schemes of the kinematic chain with a given mobility, including zero mobility (Assur group), kinematic and kinetostatic research of cam mechanisms with a complex pusher.

Research methods and equipment: the thesis uses well-known methods of analysis of cam mechanisms with a complex pusher, graph-analytical methods of kinematic and kinetostatic studies of the cam mechanism with a complex pusher.

Results obtained and their novelty: a method of synthesis of cam mechanisms with kinematic pairs of the fifth and fourth classes has been developed, provided ($p_4 = 1$), which allows to determine the necessary parameters of the mechanisms: the number of moving chains $-n$ and the number of chains that add to the chain i - kinematic pairs n_i , the number of kinematic pairs of the fifth and fourth classes p_5 and p_4 , the number of branches of the chain γ ; dependencies have been established for determining the speeds and accelerations of characteristic points of links of cam mechanisms with a complex pusher; -the equilibrium conditions of each of the links of the complex cam follower of the cam mechanism with one translational pair were established, allowing to determine the reactions in kinematic pairs; a five-link cam mechanism is developed with two rocker arms, differing from the known ones in that one pusher arm moves progressively, and the second is mounted on a fixed chain through elastic elements.

Degree of use: the method of synthesis of structures of cam mechanisms are implemented in the JSC "AkTilek" and in the educational process of KSTU. I. Razzakov.

Field of application. development and projection of cam mechanisms.

