М290558

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

МОСКОВСКОЕ
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ имени Н.Э. БАУМАНА

ПАВЛОВА Лидия Антоновна

На правах рукописи

МЕТОД ГРАФОВ В СТРУКТУРНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

/01.02.02 - теория механизмов, машин и автоматических линий/

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1976

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

МОСКОВСКОЕ
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ имени Н.Э. БАУМАНА

ПАВЛОВА Лидия Антоновна

На правах рукописи

МЕТОД ГРАФОВ В СТРУКТУРНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

/01.02.02 - теория механизмов, машин и автоматических линий/

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1290558
Павлова Л.А. Метод графов
М990 558

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1976

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - заслуженный изобретатель РСФСР, доктор технических наук, профессор РЕШЕТОВ Л.Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор КРАЙНЕВ А.Ф.

кандидат технических наук, доцент ШАМАЙДЕНКО Н.Е.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан "28" мая 1976г.

Защита диссертации состоится " " июня 1976г. на заседании Совета по машиностроению Общетехнического факультета МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатями, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Ученый секретарь Совета
к.т.н. ПОГОВ П.К.

Лит. № Л-57010 Объем 1 п.л. Тип. МВТУ Зак.1297 Тир. 100

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Повышение качества, надежности и долговечности машин, а также снижение их себестоимости являются актуальными задачами современного машиностроения. Они могут быть решены путем совершенствования существующих конструкций и создания принципиально новых механизмов. Одним из направлений, обуславливающих эти решения, является научно-обоснованное проектирование структуры кинематических цепей. Поэтому разработка метода структурного анализа механизмов, позволяющего провести их качественную оценку и определить пути обеспечения работоспособности, является необходимой.

Цель работы - создание метода структурного анализа пространственных кинематических цепей, обеспечивающего возможность установления количества и характера избыточных (пассивных) связей и подвижностей.

Метод исследования. Методом исследования является математическая модель кинематической цепи в виде ее графа, определяющего контурное строение цепи и позволяющего выявить взаимосвязь независимых контуров.

Научная новизна. Разработаны: новый инженерный метод структурного анализа пространственных кинематических цепей на основе расчета их графов и контурных сетей, позволяющий установить количество и характер избыточных связей и подвижностей и пути их устранения; метод расчета механизмов, содержащих гибкие звенья; метод расчета матриц подвижностей независимого контура. Сформулирована и доказана теорема об определении подвижностей звена (группы звеньев) в контуре. Дан принцип образования пространственных механизмов путем присоединения групп структурных элементов, образующих независимые контуры; предложена классификация этих групп. Получен ряд новых зависимостей в виде теорем теории структуры. Приведена общая схема формального структурного синтеза пространственных кинематических цепей на базе теории графов, который в перспективе может послужить основой для получения новых, оригинальных схем механизмов.

Научная достоверность результатов диссертационной работы

подтверждена: рядом известных ранее зависимостей теории структуры, полученных предлагаемым методом исследования структуры кинематических цепей; совпадением результатов расчета структуры механизмов с данными других исследователей и полученными практически.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенный в ней метод структурного анализа представляет возможность провести качественное сравнение структуры кинематических цепей при проектировании изделий и указать пути обеспечения и улучшения работоспособности механизмов обоснованным назначением подвижностей кинематических пар. Анализ ряда механизмов данным методом позволил выявить в них избыточные связи и вредные подвижности и разработать практические рекомендации по повышению надежности этих узлов.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на:

I. Научном и методическом семинаре кафедры "Теория механизмов" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1975 и 1976гг.

2. Технических семинарах инженеров-конструкторов в 1974 и 1975гг.

Предлагаемый в диссертации метод структурного анализа механизмов с гибкими звеньями внедрен при расчетах новых конструкций волновых редукторов в МВТУ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов. Изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 13 таблиц и библиографию из 170 наименований.

Введение. Одной из фактически неизученных областей в теории структуры кинематических цепей является раздел многочисленных пространственных механизмов. Сознание недостаточности сведений, накопленных в этой сфере знаний, а также необходимость решения задач, поставленных научно-технической революцией, обусловили два основных направления развития теории структуры кинематических цепей - разработку методов, позволяющих осуществление рационального конструирования механизмов с целью их совершенствования и создание принципиально новых схем механизмов методами формального структурного синтеза.

Глава 1. Структура кинематических цепей. Состояние вопроса.

Проведен всесторонний обзор состояния теории структуры механизмов. Определены основные направления развития в этой области, указаны причины трудностей, сформулированы задачи, требующие разрешения и возможности решения этих задач. Разработкой вопросов теории структуры кинематических цепей занимались многие отечественные ученые - Чебышев П.Л., Сомов П.О., Ассур Л.В., Малышев А.П., Артоболевский И.И., Добровольский В.В., Колчин Н.И., Решетов Л.Н., Озол О.Г., зарубежные - Рело Ф., Грюблер М., Кутцбах К., Рёсснер В., Кроссли Ф., Ву Л., Манолеску Н. и другие. В их трудах освещены вопросы определения подвижности кинематических цепей различных видов механизмов, классификации кинематических пар и механизмов, метода образования механизмов и перечисления возможных структурных схем и ряд других. Однако некоторые проблемы теории структуры кинематических цепей нельзя считать решенными в полном объеме. Например, задача выявления избыточных связей и подвижностей в структурных схемах сложных пространственных механизмов до сих пор еще является затруднительной. Современная классификация кинематических пар не позволяет проведение математической обработки видов относительного движения, обусловленного парой, в структурных уравнениях. Иными словами, уравнения не учитывают характер подвижностей /линейная, угловая или винтовая/, допускаемых парой; предусматривается лишь количество всех подвижностей.

Уравнения Малышева А.П. и Озола О.Г., которыми пользуются при проведении структурного анализа механизмов, тождественны и содержат по две неизвестных величины - подвижности и избыточные связи. Поэтому в сложных многоконтурных пространственных механизмах их определение затруднительно. Кроме того, эти уравнения не учитывают характер контурного строения механизма и взаимосвязь контуров, одни из которых могут содержать избыточные связи, другие - местные подвижности звеньев, третьи - и то и другое вместе, а четвертые - не иметь ни избыточных связей, ни местных подвижностей звеньев. Контурное уравнение кинематической цепи Попова-Озола позволяет установить только число контуров k, по которым должен производиться расчет

цепи. Но количество контуров сложной кинематической цепи значительно превышает k, и вопрос о том, какие из них должны быть выбраны для расчета, остается открытым.

Метод определения избыточных связей Решетова Л.Н., возглавившего отечественную школу рационального конструирования механизмов, свободен от указанных недостатков. Метод учитывает характер относительных движений звеньев, допускаемых кинематическими парами, взаимозаменяемость подвижностей пар и связь контуров в механизме. Однако в многоконтурных пространственных механизмах при переходе из одной системы координат в другие решение задачи данным способом становится довольно сложным.

К сожалению, точное значение величин подвижностей и избыточных связей, которое может быть получено методами исследования кинематики механизма, предложенными Морошкиным Ю.Ф., Кислицыным С.Г., Диментбергом Ф.М., Дж.Денавитом, А.Якгом, Ф.Фрейденштейном и рядом других авторов, также затруднено при увеличении числа контуров в механизме.

В главе приведен обзор методов структурного синтеза механизмов. Показано, что в настоящее время за рубежом ведутся интенсивные исследования в этом направлении на основе теории графов.

Исходя из вышесказанного, была поставлена цель данной работы - создание инженерного метода структурного анализа пространственных кинематических цепей. Для этого было необходимо решить следующие задачи:

1. Применить математический аппарат, позволяющий учитывать при проведении структурного анализа вид относительного движения звеньев, допускаемый кинематической парой.

2. Разработать метод определения подвижностей звеньев /групп звеньев/ в контуре.

3. Исследовать процесс образования пространственных механизмов и выявить его закономерности.

4. Определить закономерности взаимосвязи контуров кинематической цепи и предложить математический аппарат для исследования этих закономерностей.

5. Разработать метод расчета подвижности цепи с учетом взаимодействия контуров.

6. Дать метод расчета кинематических цепей, содержащих гибкие звенья.

7. Предложить общую схему структурного синтеза пространственных кинематических цепей.

Глава П. Основные определения, понятия и теоремы теории графов. Графы механизмов.

Проведено обоснование выбора математического аппарата для исследования структуры кинематических цепей. Теория графов может служить математической моделью для всякой системы, содержащей бинарное отношение. Соответствие между изучаемым объектом и его представлением в виде графа позволяет естественным образом формулировать высказывания, вытекающие непосредственно из графа на основании уже изученных и доказанных теорем теории графов. Теория графов, получившая в настоящее время широкое распространение, позволяет также строить формальные алгоритмы преобразований и при использовании их матричных эквивалентов обработку на ЭВМ. Приведены основные определения, понятия и теоремы теории графов, используемые в последующих главах. Показаны способы матричного задания графов и их циклов /контуров/. Построена аналогия структуры кинематических цепей и соответствующих ей графов.

Математическая модель кинематической цепи - граф, в котором вершины обозначают звенья цепи, а ребра, соединяющие вершины, являются кинематическими парами. Вершины графа метятся цифрами в соответствии с номерами звеньев цепи. Для различия ребер графа применяются обозначения кинематических пар в виде трехзначного числа, введенные Харрисбергером Л. На первом месте этого числа ставится количество независимых вращательных движений, допускаемых кинематической парой, на втором - линейных, на третьем - винтовых. Тогда вращательная пара может быть записана в виде - 100, поступательная - 010, винтовая - 001, шаровая - 300, плоскостная - 120 и т.д. Приведена таблица возможных видов кинематических пар. Предложена запись этих чисел в виде матриц подвижностей кинематических пар.

Если в кинематической цепи есть гибкое звено, соответствующая ему вершина в графе имеет петлю, помеченную числом подвижностей гибкого звена, которые должны быть учтены при применении к звену аксиомы отвердевания. Степень вершины графа,

т.е. число ребер, инцидентных ей, покажет, во сколько кинематических пар входит звено, соответствующее этой вершине. Соединение двух звеньев, более, чем одной кинематической парой, характеризуется наличием кратных ребер, инцидентных соответствующим вершинам в графе. Наличие в механизме двойных и более кинематических пар обусловит граф, имеющий условные ребра. Замена действительных ребер графа условным приведет к эквивалентным графам, описывающим один и тот же механизм.

Независимый контур механизма определяется независимым циклом его графа, т.е. простой замкнутой цепью, в которой все n вершин различны и $n \geq 3$. В мультиграфах, допускающих наличие кратных ребер, n может быть равно 2. Показан метод получения набора всех k независимых контуров механизма.

Открытой кинематической цепи соответствует дерево – граф, не имеющий ни одного замкнутого цикла. Взаимосвязь независимых контуров обусловлена деревом графа.

На основании теорем теории графов и их следствий получен ряд закономерностей теории структуры, известных по работам Грюблера М., Попова А.Ф., Озола О.Г. и Морошкина Ю.Ф. Это подтверждает правильность выбора математического аппарата и возможность его применения при исследовании структуры пространственных кинематических цепей. Кроме того, получены новые экстремальные критерии и структурные зависимости кинематических цепей, сформулированные в виде 19 теорем теории структуры.

Глава III. Структурный анализ замкнутых пространственных кинематических цепей методом расчета их графов и контурных сетей.

Основное содержание диссертационной работы изложено в данной главе.

Раздел первый. Математическая модель кинематической цепи позволила установить, что расчет цепи должен проводиться по ее независимым контурам. Сформулированы два основных свойства независимого контура кинематической цепи: свойство замкнутости и свойство подвижности. Подвижности кинематических пар, необходимые для обеспечения свойства замкнутости контура, предложено обозначать в виде матрицы – $\|3301\|$, где первый элемент есть число независимых угловых подвижностей, второй – линей-

ных, а третий – винтовых. Тогда условия существования независимого контура при самом общем расположении осей /поверхностей или линий сопряжения/ кинематических пар в пространстве могут быть математически выражены как:

$$\|W\| \Leftarrow \sum_{1}^{n} \|f\|_i \Rightarrow \|3301\| \qquad /1/$$

Иными словами, из свойств суммы матриц подвижностей кинематических пар контура следуют свойства его замкнутости и подвижности. Предложен матричный метод расчета подвижностей и связей контура по уравнению:

$$\|W\| = \sum_{1}^{n} \|f\|_i + (-1)\|3301\| \qquad /2/,$$

с последующим нахождением алгебраической суммы элементов матрицы – W по следующим правилам. Винтовые подвижности могут заменять отсутствующие линейные и угловые; угловые подвижности /не более двух одного звена/ могут восполнить недостаток линейных подвижностей. Иными словами, при отрицательном или равном нулю значении второго элемента матрицы – W находится алгебраическая сумма всех элементов матрицы. Если этих пар только две /т.е. контур имеет одно подвижное звено/, второй элемент матрицы – $f'=3$, а первый – $f''=6$, то равное I значение первого элемента должно быть исключено из алгебраической суммы, как положительное. При положительном значении второго элемента матрицы находится алгебраическая сумма только первого и третьего элементов. Отрицательные значения элементов матрицы – W после нахождения их алгебраической суммы дадут значение числа и характера избыточных связей, а положительные – подвижностей контура.

Анализ независимых контуров механизмов показал, что имеют место случаи, когда либо свойство замкнутости контура, либо свойство его подвижности, либо оба вместе обеспечиваются специальными требованиями к расположению осей кинематических пар в пространстве. Выявлены закономерности этого явления по суммам матриц подвижностей кинематических пар. Разработана и предложена классификация независимых контуров, предусматривающая 4 их вида: полные, нулевые, неполные и условно-неполные. Представлена таблица видов независимых контуров с рядами сумм матриц подвижностей кинематических пар, определяющих данный вид контура.

Раздел второй. Дано понятие дерева механизма, как такой

открытой кинематической цепи, которая содержит все звенья механизма, но не имеет ни одного замкнутого контура. Дерево механизма можно получить удалением из механизма количества кинематических пар, равного числу независимых контуров - k. На основании анализа процесса образования механизма по его дереву получено новое структурное уравнение кинематической цепи:

$$W = \sum_{j=1}^{p_1} f_j - \sum_{i=1}^{k} p_{xi} + q \qquad /3/,$$

где f_j - подвижность j-ой кинематической пары дерева механизма;

p_{xi} - количество удаленных для получения дерева кинематических пар /хорд графа/ i-го класса.

Доказано, что уравнение /3/ может быть получено из известного уравнения Малышева А.П. для пространственных кинематических цепей.

Анализом видов независимых контуров одноконтурных или однородных многоконтурных механизмов установлена зависимость допускаемых движений звеньев механизма в пространстве от отсутствующих в контуре /контурах/ видов подвижностей. Дана таблица этой зависимости, дополняющая классификационную таблицу механизмов Колчина Н.И.

Раздел третий. Сформулирована и доказана теорема об определении подвижностей звеньев /групп звеньев/ в контуре. Уравнение /2/ дает возможность определить количество и характер подвижностей и связей, но оно не указывает, какие звенья контура имеют подвижности.

Назовем упорядоченной r - выборкой звеньев зафиксированную последовательность r звеньев в контуре.

Теорема. Подвижность упорядоченной r - выборки звеньев равна сумме подвижностей ее кинематических пар плюс число подвижностей, необходимых для замыкания контура, взятых с обратным знаком, и плюс количество подвижностей всех упорядоченных выборок от 1 до $r-1$, принадлежащих r, также взятых с обратным знаком:

$$\|f\|_r = \sum_{i=1}^{r+1} \|f\|_i + (-1)^{1330} + (-1) \sum_{j=1}^{r-1} \|f\|_{j=r} \qquad /4/.$$

Сущность теоремы заключается в проверке наличия подвижности r - выборки звеньев относительно оставшейся части контура, к которой применен принцип отвердевания.

Показан пример применения данной теоремы на основе рас-

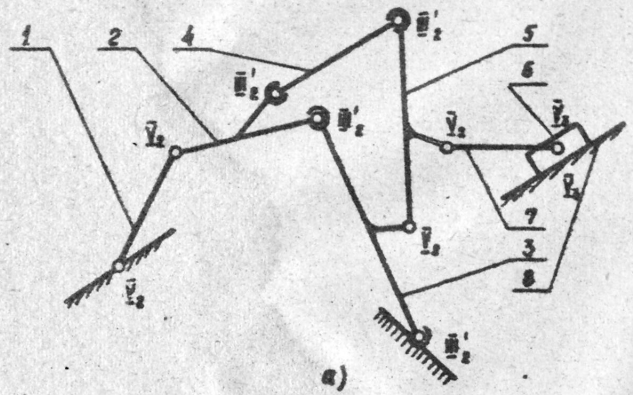
чета независимого контура планетарного редуктора с шевронным зацеплением.

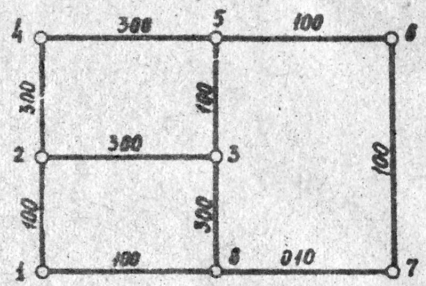
Раздел четвертый. Рассмотрен процесс образования пространственной кинематической цепи как появление новых независимых контуров. Каждый новый независимый контур образуется присоединением группы структурных элементов к двум имеющимся звеньям: ведущему звену и стойке или звеньям предыдущих контуров. Дано определение присоединяемой группы. Показано, что в отличие от групп Ассура Л.В. и диад Брусвича Н.Г., присоединяемые группы представляют последовательную цепь звеньев и кинематических пар и могут состоять из: одной кинематической пары, одного звена и двух кинематических пар, двух звеньев и трех пар и т.д. Анализ присоединяемых групп показал, что они могут налагать или не налагать связи на соединяемые ими элементы, иметь или не иметь собственную подвижность своих звеньев. На этой основе предложена аналогичная независимым контурам классификация присоединяемых групп, предусматривающая также 4 вида групп: полные, нулевые, неполные и условно-неполные. Представлена классификационная таблица с рядами сумм матриц подвижностей, характеризующих каждый вид присоединяемых групп. Показано, что расчет каждого независимого контура кинематической цепи на наличие свойств его замкнутости и подвижности может быть сведен к расчету присоединяемой группы, образующей данный контур, на наличие свойства ее замкнутости по уравнению:

$$\|f\|_{n} = \sum_{i=1}^{n} \|f\|_{i} + (-1)^{n+1} \|3 3 0\| \qquad /2^{I}/.$$

Доказано, что ни выбор варианта дерева кинематической цепи, ни последовательность расчета независимых контуров, определяющих присоединяемые группы элементов, не влияют на конечный результат структурного анализа.

Раздел пятый. Структурный анализ пространственной кинематической цепи сводится к расчету присоединяемых групп, характеризующих каждый независимый контур, на наличие подвижностей, обуславливающих свойство замкнутости группы, с последующим анализом возможности обеспечения этого свойства за счет подвижности соединяемых группой элементов. Для этого по кинематической цепи /рис. Iа/ строится граф /рис. Iб/. Определяются присоединяемые группы всех независимых контуров по дере-


1
2
4
5
6
7
3
8
а)


4
5
6
2
3
1
8
7
300
100
300
100
100
300
100
100
010
б)

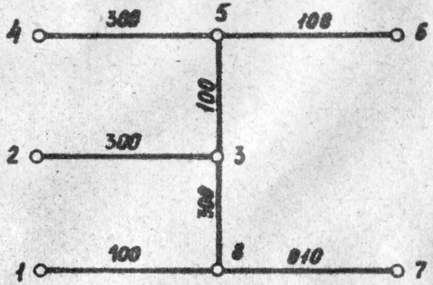

4
5
6
2
3
1
8
7
300
100
300
100
100
300
100
010
в)

Рис. 1.

ву /рис. Iв/ графа. Проводится расчет групп по уравнениям /2[1]/ и /4/. Строится контурная сеть /рис. 2/, в которой каждый контур обозначается прямоугольником. В последний вносятся данные, полученные при расчете группы. Если группа данного контура соединяется с вершиной, образующей предыдущий контур, то прямоугольники соединяются линией. На линии ставится номер вершины, к которой присоединяется группа. Линии контурной сети отражают взаимосвязь независимых контуров, заключающуюся в том, что подвижности кинематических пар дерева, как принадлежащие одновременно нескольким независимым контурам, могут быть в равной степени отнесены ко всем этим контурам.

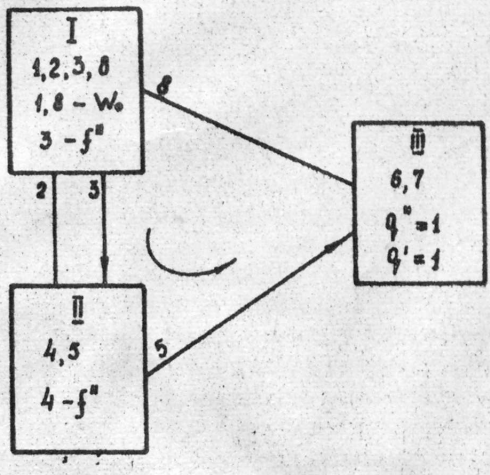


Рис. 2.

Проводится анализ контурной сети по ряду выведенных правил, основное из которых следующее: отсутствующая в присоединяемой группе контура подвижность – q может быть восполнена соответствующей подвижностью – f элемента, к которому группа присоединяется. Соответствие подвижностей обозначает, что отсутствующая линейная подвижность – q' может быть заменена линейной – f', угловой – f'' и винтовой – f'' подвижностями, а угловая – q'' – угловой – f'' и винтовой – f''.

Невосполненные отсутствующие подвижности в контурах дадут число избыточных связей в кинематической цепи, а нереализованные подвижности - количество ее обобщенных координат. В приведенном примере отсутствующая линейная подвижность контура Ш может быть восполнена угловой подвижностью звена 3 через контур П, так как в последнем нет избыточных связей. В результате в механизме останутся: основная подвижность - $W_0 = 1$ звеньев 1,8; угловая подвижность звена - 4 и угловая избыточная связь в группе звеньев - 6,7.

Контурная сеть позволяет установить пути устранения связей и подвижностей при необходимости. Она указывает, в каких группах структурных элементов необходимо ввести или ликвидировать подвижности и характер последних.

Приведен метод упрощения структурного анализа по сжимающему отображению графа кинематической цепи. Показаны приемы получения сжимающего отображения. Даны уравнения, определяющие подвижности ребер сжимающего отображения графа.

Глава IУ. Примеры применения предложенного метода структурного анализа пространственных кинематических цепей.

Дано шесть примеров применения предлагаемого метода. Рассмотрены: шарнирно-рычажный восьмизвенный механизм; механизм токоприемника с двойными кинематическими парами; шевронный планетарный редуктор с двумя плавающими звеньями; механизм с замкнутым гибким звеном для перемещения платформы; механизм управления регулируемого многостворчатого сопла газотурбинного двигателя /74 контура/; узел диффузора форсажной камеры газотурбинного двигателя.

Подробно проиллюстрированы и доказаны все правила анализа контурной сети, сформулированные в предыдущей главе. Подтверждено доказанное ранее положение о том, что выбор варианта дерева и последовательность расчета присоединяемых групп независимых контуров не влияют на окончательный результат структурного анализа. Показано, что графы с условными ребрами, характеризующими наличие двойных кинематических пар, описывают структурно-эквивалентные схемы. Дан метод расчета механизмов с гибкими звеньями. На примере механизма управления регулируемого сопла показан метод упрощения структурного ана-

лиза по сжимающему отображению графа с учетом его регулярной структуры. Исследовано применение предлагаемого метода при анализе механических систем - кинематических цепей с общей степенью подвижности, равной нулю. Показаны приемы устранения избыточных связей и вредных подвижностей методами подразбиения ребер графа, снижением или повышением классов кинематических пар. Разработаны практические рекомендации по повышению надежности и снижению трудоемкости монтажных работ узлов регулируемого сопла и диффузора форсажной камеры газотурбинного двигателя. Получена хорошая сходимость предлагаемого метода с результатами других исследований и практически определенными на изделиях.

Глава У. Приложения теории графов к структурному синтезу пространственных кинематических цепей.

Формальный структурный синтез механизмов можно охарактеризовать как систематический процесс отыскания новых структурных схем заданной совокупности параметров без учета геометрии элементов механизма. Хотя решение задач формального синтеза представляется на данном этапе несколько академическим, их перспективы можно видеть в получении принципиально новых схем механизмов, решении задач кинематики структурных групп и классификации механизмов. Математическая модель кинематической цепи в виде ее графа позволяет сформулировать задачу нахождения всех структурных схем определенного набора параметров как комбинаторную задачу перечисления графов. Последняя решается на основе классической теоремы перечисления Дж.Пойя и ее следствий. Поскольку задача перечисления графов является сложной даже для современных ЭВМ, в мировой практике существует тенденция создания эвристических экономически оправданных программ, позволяющих получить достаточно точное решение.

В работе приведена общая схема метода формального структурного синтеза пространственных кинематических цепей на основе теории графов. Задача решается построением эвристических алгоритмов. Укрупненно она может быть разбита на следующие этапы:

1. Построение всех графов, отвечающих заданной совокупности числа вершин /звеньев/ - n и числа ребер /кинематических

пар/ - p , решением системы уравнений

$$\begin{cases} 2n_2 + 3n_3 + \dots + \alpha n_\alpha = 2p \\ n_2 + n_3 + \dots + n_\alpha = n \end{cases} \qquad /5/,$$

где n_α - число вершин /звеньев/ степени - α .

2. Проверка графов на изоморфизм и исключение изоморфных графов, как описывающих структурно-эквивалентные кинематические цепи.

3. Назначение подвижностей ребер независимых контуров на основе обеспечения свойств замкнутости и подвижности каждого контура.

4. Получение всех возможных графов методом взаимного обмена подвижностями, допускаемым контурной сетью, с учетом конструктивных особенностей кинематических пар.

Общие выводы.

I. Разработан метод структурного анализа пространственных кинематических цепей расчетом их графов и контурных сетей; метод позволяет установить число и характер избыточных связей и подвижностей и пути их устранения при необходимости.

2. Дан принцип образования пространственных кинематических цепей на основе присоединяемых групп структурных элементов; проведена классификация этих групп.

3. Сформулирована и доказана теорема об определении подвижностей звеньев /групп звеньев/ в контуре.

4. Получен ряд новых структурных параметров и экстремальных критериев кинематической цепи в виде I9 теорем, развивающих теорию структуры.

5. Предложен и внедрен метод расчета кинематических цепей, содержащих гибкие звенья.

6. Предложена общая схема метода структурного синтеза пространственных кинематических цепей на основе теории графов.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

I. Павлова Л.А. Об устранении избыточных связей в диффузорах. Межвузовский сборник "Теория механизмов и детали машин", Уфа, I974, вып. I, с.69-73.

2. Решетов Л.Н., Павлова Л.А. К вопросу об устранении избыточных связей в механизме управления регулируемого сопла. Труды МВТУ, № 227, Теория механизмов, вып. 7, I975, с.33-38.