

УДК 681.3:621.01

ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА СТРУКТУР ПЛОСКИХ ШАРНИРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

А.В. Степанов

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

E-mail: stepanov@sibsiu.ru

Описан принципиально новый подход к проблеме компьютерного синтеза структур механических систем, базирующийся на использовании универсальной структурной системы и объектно-ориентированной методологии формирования структурных схем плоских шарнирных механизмов.

Ключевые слова:

Компьютерный синтез, структурная схема, объектно-ориентированная технология, виртуализация, механизм, формализованное символическое представление.

Введение

Плоские шарнирные механизмы, обладая широкими возможностями воспроизведения требуемых движений, высокой надежностью и долговечностью, а также простотой их изготовления, находят широкое применение при создании различных видов механических устройств и систем.

Одним из ответственных этапов создания механизма является синтез его структуры. На этом этапе сначала определяют параметры структурной схемы: номенклатуру и числа звеньев той или иной сложности, виды и количества кинематических пар, соединяющих звенья между собой, а затем приступают к собственно синтезу, соединяя звенья между собой в соответствии с определенной стратегией. Собственно синтез представляет собой процедуру анализа решений многовариантной задачи и выбора наиболее подходящего варианта. Многовариантность задачи синтеза обусловлена тем, что при одной и той же номенклатуре и числе звеньев той или иной сложности получается достаточно большое количество структур, отличающихся топологией или порядком соединения между собой звеньев, имеющихся в наличии. Для выбора наиболее рациональной структуры механизма необходимо сформировать и проанализировать полное многообразие вариантов соединения звеньев между собой. При небольшом количестве звеньев задача получения полного многообразия вариантов структурных схем решается вручную, поскольку число различных вариантов соединений — небольшое. При увеличении количества звеньев число различных вариантов структур увеличивается нелинейно. При восьми звеньях — это сотни вариантов, при десяти — тысячи и т. д. Совершенно очевидно, что уже при восьми звеньях и выше ручное построение полного многообразия структурных схем за разумный интервал времени не представляется возможным.

Математический аппарат для определения параметров структурной схемы

Попытки создания математического аппарата, позволяющего корректно осуществлять синтез

структур механизмов, были предприняты еще в семидесятых годах девятнадцатого века. У истоков русских работ по теории механизмов и машин лежат научные труды П.Л. Чебышёва, в которых он впервые в мировой литературе для решения задач по теории механизмов применил математические методы и заложил основы аналитических методов синтеза механизмов [1].

Математическую зависимость, связывающую между собой параметры механизма, называют структурной формулой. В таблице приведены структурные формулы различных ученых в хронологическом порядке их появления и совершенствования. Последняя формула считается универсальной, аккумулирующей в себе все предшествующие разработки. Она функционально связывает общее число звеньев и кинематических пар с подвижностью системы. Задаваясь подвижностью и количеством звеньев можно определить число кинематических пар, необходимых для соединения звеньев между собой.

Все приведенные в таблице структурные формулы имеют весьма существенный недостаток. По ним невозможно определить номенклатуру звеньев, потребных для синтеза структурных схем, что существенно осложняет решение задачи синтеза структур.

Таблица. Развитие математического аппарата, описывающего структуру механизмов

Структурная формула	Структура зависимости
П.Л. Чебышёва	$3n - 2(p' + v) = 1$ или $W = 3n - 2p_5$
П.О. Сомова	$N - (m - 1)(n + 1) = 2$ или $W = 6n - 5p_5$
Х.И. Гохмана	$W = 6n - s$
А.П. Малышева	$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6n - \sum k p_k$
В.В. Добровольского	$W = (6 - m)n - \sum (k - m)p_k$

Работая над проблемой создания математического описания структурных схем кинематических цепей, профессор Л.Т. Дворников в качестве параметра, отличающего звенья друг от друга, выбрал число кинематических пар, привносимых ими в систему [2]. Это стало отправным моментом для получения двух уравнений, представляющих собой

две суммы: числа звеньев различной сложности и числа кинематических пар, привносимых ими. Добавление к этим уравнениям структурной формулы В.В. Добровольского позволило ему получить изящную систему уравнений, представляющую собой математическую модель кинематической цепи любой сложности [2]:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^s p_k \cdot h(k-m) = \tau + (\tau-1)n_{\tau-1} + \dots + i n_i + \dots + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1, \\ W = (6-m)n - \sum_{k=1}^s (k-m)p_k \cdot h(k-m). \end{cases}$$

Здесь: n – общее число звеньев; W – подвижность системы; m – число наложенных связей; k – класс применяемых кинематических пар; τ – количество вершин наиболее сложного звена; $n_1, n_2, \dots, n_i$ – звенья структурной схемы.

Анализируя структурную формулу В.В. Добровольского, профессор Л.Т. Дворников обнаружил в ней математическую некорректность, заключающуюся в том, что при формальной подстановке в нее любых значений параметров m и k могут получаться неверные результаты [2]. Для устранения этой некорректности, проявляющейся при работе компьютерных программ, предназначенных для поиска решений системы, он предложил добавить к структурной формуле В.В. Добровольского единичную функцию вида:

$$h(k-m) = \begin{cases} 1, & m < k, \\ 0, & m \leq k. \end{cases}$$

Поскольку полученная модель позволяла использовать ее для всего многообразия кинематических цепей, она была названа автором универсальной структурной системой. Принципиальным отличием универсальной структурной системы от другого рода математических зависимостей, функционально связывающих параметры структурной схемы кинематической цепи, является объединение в ее составе уравнений, содержащих полную номенклатуру звеньев ($n_1, n_2, \dots, n_i$) и кинематических пар (p_k), необходимых для построения структурной схемы цепи. Получаемые целочисленные решения системы дают исследователю числа звеньев той или иной сложности и кинематических пар различных видов, необходимых для реализации множества вариантов структурных схем для заданных исходных данных.

Можно смело утверждать, что с появлением этой модели стало возможным решение целого класса задач, связанных с поиском полного многообразия вариантов структурных схем механизмов при заданном числе звеньев.

Скрупулезный анализ системы показывает, что это – необычная система, не приводимая к «классическому» виду. Структура самой системы непостоянна: количество одночленов, входящих в левые и правые части уравнений, и число неизвестных меняется от расчета к расчету. Число неизвестных, как правило, превышает число уравнений системы, а их значения могут быть только целыми числами.

Для поиска целочисленных решений этой системы с использованием компьютерных средств была разработана поисковая процедура и компьютерная программа, позволяющая полностью автоматизировать этот процесс [3]. Таким образом, задача компьютеризации этого этапа, предваряющего собственно синтез структур, может считаться решенной.

Виртуализация

Использование универсальной структурной системы для решения задач синтеза структур механизмов, требует понимания того факта, что целочисленные решения этой системы дают номенклатуру и количества не реальных, а виртуальных звеньев.

Виртуальный объект или устройство имеет, чаще всего, два параметра: имя и назначение. Точно также виртуальные звенья, входящие в уравнения системы, имеют имена: $n_1, n_2, \dots, n_i$, и назначение, характеризующееся одним единственным параметром – количеством кинематических пар, привносимых этими звеньями в кинематическую цепь. В реальные звенья, с точки зрения их графического изображения, они превратятся лишь на этапе конструирования структурной схемы. Механизм превращения виртуальных звеньев в реальные можно проиллюстрировать рис. 1, на котором показаны три возможных случая развития фрагмента структурной схемы. Штриховыми линиями обозначены звенья уже имеющегося фрагмента, а сплошной линией добавляемое звено. Во всех трех случаях, изображенных на рис. 1, к уже имеющемуся фрагменту кинематической цепи добавляется виртуальное звено n_1 , имеющее различную фактическую реализацию.

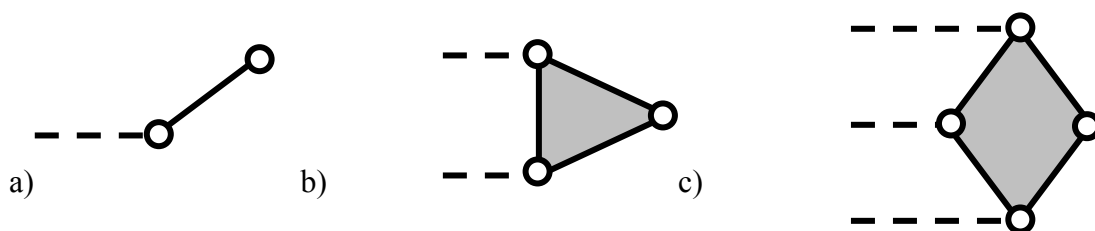


Рис. 1. Превращение виртуальных звеньев n_1 в реальные звенья

После получения количества звеньев, привносящих в цепь различное число кинематических пар, приступают к формированию разнообразных вариантов структур. Формирование любого варианта структурной схемы должно начинаться с построения τ -угольника, поскольку это единственное виртуальное звено, сложность которого в точности соответствует сложности реального звена кинематической цепи.

Построив самое сложное звено структурной схемы, получим минимально возможный фрагмент кинематической цепи, имеющий ограничивающие стороны, заканчивающиеся свободными кинематическими парами. Если к свободным парам фрагмента присоединять оставшиеся в наличии звенья, соединенные между собой в различном порядке, то можно получать различные варианты структурных схем.

Компьютерная технология формирования гарантированно полного многообразия структур

Попытки использования электронных вычислительных машин для автоматизации структурного синтеза механизмов были предприняты еще в семидесятых годах прошлого столетия. Наиболее удачно это осуществлено Э.Е. Пейсахом и В.А. Нестеровым [4]. Предлагаемый ими метод получения полного состава структурных схем механизмов основывается на теории графов. Для ее успешного использования были введены некоторые новые понятия, такие как: «высота механизма», «правильная нумерация вершин графа» и др., доказана теорема о единственности разложения одноподвижного механизма второго класса на группы Ассур второго класса и механизм первого класса. Алгоритм работы программы основан на реализации процедуры «перечисления неизоморфных графов». Полученные на ЭВМ структуры графов преобразовывались затем в эквивалентные варианты структурных схем.

Разработчики метода, очевидно, не сумели разработать алгоритм прямого конструирования структурных схем с помощью компьютера. Основная причина этого состоит в том, что получение математической модели, основанной на парадигме процедурно-ориентированного подхода, которая корректно отображала бы все шаги процесса синтеза в форме уравнений, неравенств, логических условий, и других зависимостей, описываемых в структурной теории механизмов в словесной форме, весьма проблематично.

Мотивацией к рассмотрению этой задачи вновь служат: развитие теории структуры механических систем, принципиально новые возможности аппаратных средств, событийно-управляемая модель функционирования компьютерных программ, объектно-ориентированный подход, используемый при разработке методов компьютерного моделирования систем.

В упрощенном виде программное обеспечение для автоматизированного синтеза структур плоских шарнирных систем должно состоять из двух частей: формирователя гарантированно полного множества вариантов структур и распределенного фильтра для отбраковки неприемлемых и изоморфных вариантов (рис. 2).

Формирователь гарантированно полного многообразия вариантов соединения звеньев между собой должен представлять собой модуль, осуществляющий планирование и непосредственное конструирование вариантов структурных схем.

Для создания проекта такого модуля может быть использована объектно-ориентированная технология формирования структурных схем [5], в соответствии с которой, все множество вариантов получаемых структурных схем условно разбивается на два подмножества: структуры с изменяемыми замкнутыми контурами и без таковых. Технология формирования структурных схем без изменяемых замкнутых контуров является модификацией технологии формирования структурных схем с контурами. Структурная схема с одним или несколькими изменяемыми замкнутыми контурами представляется, в свою очередь, условно состоящей из двух частей: гнезда контуров и периферийной части. В первую очередь формируется гнездо контуров, а затем добавляется периферийная часть.

Гнездо контуров представляет собой фрагмент структурной схемы, содержащий один или несколько изменяемых замкнутых контуров, внешние стороны которого образуют полигональную модель без всякого рода ответвлений. Периферийная часть представляет собой ответвления от гнезда контуров, присоединяется к свободным кинематическим парам звеньев гнезда и содержит, в основном, поводки и некоторое количество более сложных звеньев, оставшихся в наличии после формирования гнезда контуров.

Получающиеся варианты структурных схем необходимо пропускать через специальный фильтр,

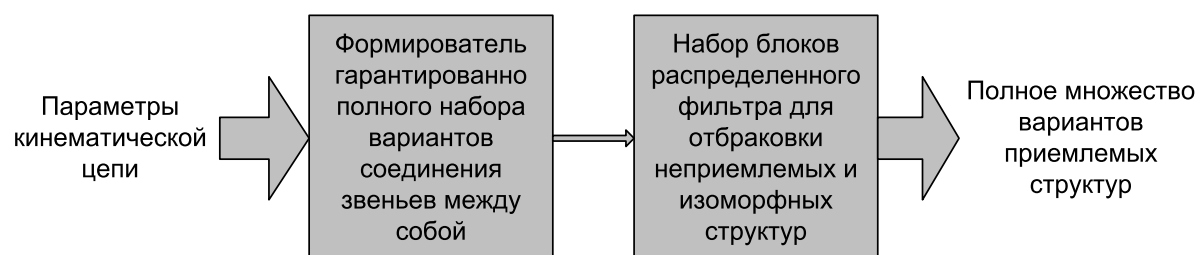


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема программы синтеза структур

отбраковывающий неприемлемые и изоморфные или подобные структуры. Проверка графических образов на конгруэнтность с помощью компьютерной программы, хотя и возможна путем предварительного и опосредованного масштабирования, поворота и отображения структурной схемы, является достаточно сложным и неоправданным решением. Использование для этих целей адекватных идентификаторов значительно упрощает процесс сравнения структур. В качестве идентификаторов структурных схем удобно использовать их формализованные символьные представления (ФСР).

ФСР гнезда представляет собой набор целых положительных чисел. Каждое из чисел соответствует тому или иному параметру конструируемой схемы, а все они вкуче однозначно идентифицируют вариант реализации гнезда контуров, не требуя предварительной нумерации звеньев. В качестве таких параметров идентификации выбраны: количество вершин наиболее сложного звена; количество контуров и их сложность; количество сторон полученного фрагмента; количество участков на

его сторонах; сложность и порядок размещения звеньев на сторонах [6].

Заключение и выводы

Для проверки правильности основных положений, изложенных в настоящей статье, был разработан проект компьютерного приложения, состоящий из основной программы и набора компьютерных процедур (26 единиц), реализующих отдельные этапы конструирования структурных схем. Тестирование приложения на задаче поиска полного многообразия структур восьмизвенных механизмов подтвердило правильность идей и работоспособность компьютерных процедур для автоматизации процесса синтеза структур плоских шарнирных механизмов. Компьютерные процедуры, входящие в состав программного обеспечения, могут быть использованы, кроме того, для формирования гарантированно полного многообразия структурных групп нулевой подвижности (групп Ассур), конструктивных схем строительных ферм и других шарнирных механических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов А.Н. Советская школа механики машин. — М.: Наука, 1975. — 178 с.
2. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов. — Новокузнецк: СибГГМА, 1994. — 102 с.
3. Степанов А.В. Решение универсальной структурной системы проф. Л.Т. Дворникова // Вестник КузГТУ. — 2007. — № 3. — С. 43–47.
4. Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. Система проектирования плоских рычажных механизмов / Под ред. К.В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1988. — 232 с.
5. Степанов А.В. Объектно-ориентированная технология компьютерного синтеза структур плоских рычажных механизмов // Вестник КузГТУ. — 2007. — № 6. — С. 105–110.
6. Степанов А.В. Идентификация структурных схем плоских кинематических цепей с вращательными парами пятого класса // Вестник КузГТУ. — 2008. — № 2. — С. 75–78.