

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.01:681.3

А.В. Степанов

РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА СОСТАВА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Создание любой системы начинается с этапа разработки и утверждения ее будущей структуры. Этот этап называют структурным синтезом. Лишь после того, как определена структура механической системы, можно проводить кинетостатическое, динамическое и другие виды исследований создаваемого механизма.

Логично предположить, что структурный синтез механизмов осуществляется путем реализации двух относительно самостоятельных этапов. На первом этапе необходимо определить состав кинематической цепи (количество звеньев той или иной сложности и количества кинематических пар, разрешенных к применению классов), а на втором этапе, путем непосредственного соединения звеньев между собой различным образом имеющимися в наличии кинематическими парами, можно получить некоторое многообразие вариантов структурных схем [1]. Из этого многообразия отбирают те структуры, которые удовлетворяют определенному набору требований и ограничений.

В данной статье приводится новый математический аппарат, позволяющий определять состав кинематических цепей любой сложности при заданном числе подвижных звеньев, максимально допустимой их сложности, подвижности цепи, а также разрешенных к применению классов кинематических пар.

Попытки установления математических зависимостей, связывающих номенклатуру звеньев с числом кинематических пар предпринимались около ста лет тому назад [2], однако универсальный математический аппарат для расчета состава кинематических цепей любой сложности был предложен лишь в последнем десятилетии прошлого века профессором Л. Т. Дворниковым [3]. Это система трех уравнений, первое из которых представляет собой развернутую сумму числа кинематических пар цепи, второе – сумму звеньев различной сложности, не превышающей заданную, а третьим уравнением системы является формула В.В. Добровольского.

$$\begin{aligned} \sum_{k=m+1}^5 p_k = \\ = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + 2n_2 + n_1 \end{aligned}$$

$$n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1$$

$$W = (6 - m)n - \sum_{k=m+1}^5 (k - m)p_k$$

Исходными данными для расчета состава цепи являются: подвижность - W , число общих связей, наложенных на систему - m , максимально допустимая сложность звеньев - τ и общее их число n . Целочисленные решения этой системы представляют собой числа звеньев различной сложности - n_i и числа кинематических пар различных классов - p_k .

При небольшом количестве звеньев цепи целочисленные решения системы могут быть получены вручную путем несложных математических преобразований. При увеличении количества звеньев и максимально допустимой их сложности ручные расчеты становятся уже непосильными. Для автоматизации процесса поиска целочисленных решений системы был разработан метод, алгоритм и компьютерные программы, позволяющие определять состав структурных схем любых механических систем [1]. Основой метода является поисковая процедура, осуществляющая направленное движение по узлам двух дискретных пространств (пространства звеньев и пространства кинематических пар). Первое из пространств имеет размерность, на единицу меньшую максимально допустимой сложности звеньев. Размерность второго пространства равна числу разрешенных к применению классов кинематических пар. Структура поискового алгоритма была получена на основе объектно-ориентированного подхода и представлена на рис. 1.

Подробное описание алгоритма и компьютерной программы опубликовано в [4]. Реальные расчеты показали, что при имеющейся структурной классификации кинематических цепей пространство получаемых решений может быть достаточно велико. Деление механизмов на семейства оказалось грубым, особенно это касается механизмов нулевого, первого и второго семейств. Профессором Л.Т. Дворниковым было предложено разбивать семейства на подсемейства [5]. В качестве отличительного признака подсемейств было предложено принять совокупность классов кинематических пар, разрешенных к применению. Даль-

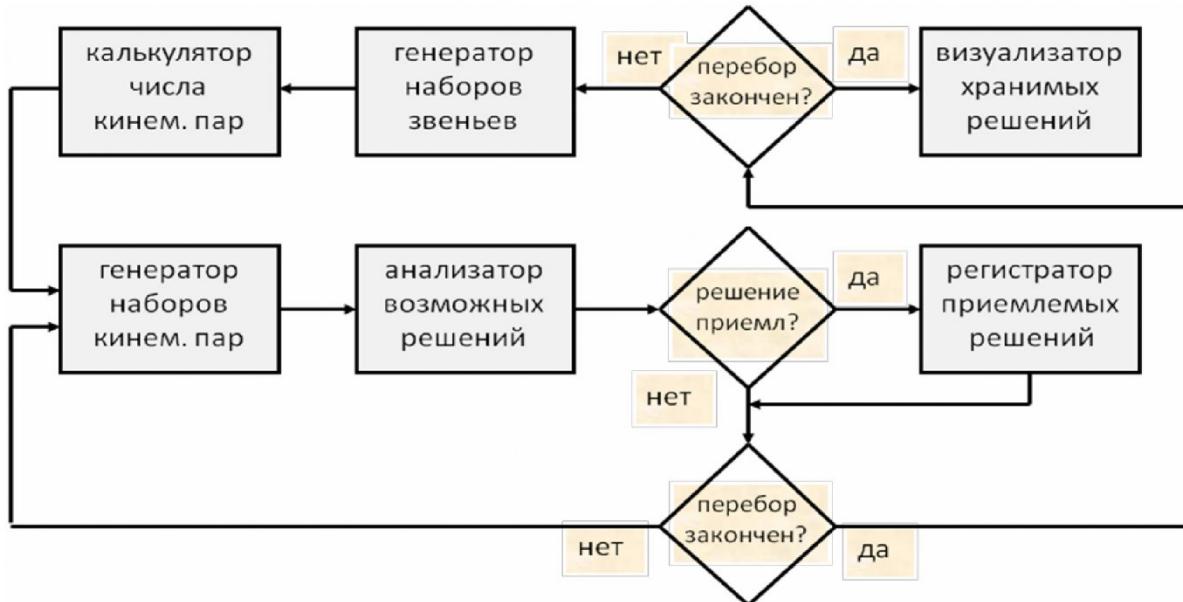


Рис 1. Структура поисковой процедуры

нейшее развитие алгоритма потребовало соответствующей корректировки компьютерных программ.

Важной особенностью рассмотренной системы является то, что при ее создании сложность звеньев отождествлялась с числом кинематических пар, привносимых звеном в кинематическую цепь. Исходя из этого, звено, привносящее в цепь одну кинематическую пару, может быть и двухпарным, и трехпарным и т.д. Другими словами численные значения $n_1, n_2, \dots, n_i, n_{t-1}$ представляют собой количества, так называемых, виртуальных звеньев [6]. Напомним, что виртуальным объектом называют некоторую абстракцию реального объекта, имеющую, по крайне мере, два параметра: имя и назначение. Эти звенья имеют имена $n_1, n_2, \dots, n_i, n_{t-1}$ и назначение – вносить в цепь соответственно 1, 2, ..., $i, t-1$ пар. В реальные звенья они превращаются лишь в процессе построения структурной схемы. Сложность звена при этом определяется числом выходов фрагмента цепи, к которому оно присоединяется, и числа кинематических пар, привносимым этим звеном в цепь.

Если принять общее число звеньев n – равное четырем, подвижность цепи W – равной нулю, максимальную сложность применяемых звеньев t – равное трем, разрешенный класс кинематических пар – пятый (шарниры), то получим следующее решение: $t = 3, n_1 = 3, p_5 = 6$.

При конструировании структурной схемы самое сложное звено цепи привносит в цепь три кинематические пары, это – трехпарное звено. Присоединяя к каждой из вершин τ -угольника по одному из звеньев n_i , привносящих в цепь по одной кинематической паре, получим структурную схему, изображенную на рис. 2, а. На этой схеме все звенья n_i представляют собой двухпарные звенья.

Возможна и другая сборка цепи. Присоединяя

к двум вершинам τ -угольника по одному из звеньев n_i получим фрагмент структурной схемы, изображенный на рис. 2, б. На нем звенья n_i представляют собой двухпарные звенья. Если оставшимся в наличии звеном n_j соединить свободные концы двухпарных звеньев, то оно должно быть трехпарным, поскольку привнося в кинематическую цепь одну пару, присоединяется к двум выходам построенного ранее фрагмента (рис. 2, в).

Математический аппарат, предложенный профессором Л.Т. Дворниковым, является, пожалуй, единственным для реализации первого этапа структурного синтеза механизмов. Технология структурного синтеза механизмов с его использованием была показана на примере получения полного состава восьмизвездных плоских рычажных механизмов и опубликована в [7].

Несмотря на то, что в расчетах и в технологии построения структур все четко formalизовано и безупречно, применение универсальной структурной системы (УСС) для структурного синтеза механизмов и сама УСС неоднозначно воспринимается специалистами в области теории механизмов и машин, причиной чему является аппарат виртуализации. Поскольку одна и та же кинематическая цепь может быть собрана из различных наборов виртуальных звеньев, пространство получаемых целочисленных решений системы увеличивается. Получив решения системы, мы не можем сказать, сколько двухпарных звеньев, трехпарных и т.д. необходимо иметь для сборки кинематической цепи. Кроме того, поскольку реальная сложность звеньев определяется лишь на этапе конструирования структурных схем, оба этапа являются жестко связанными.

Получение целочисленных решений в виде набора реальных, не изменяющих своей сложности звеньев, уже на первом этапе структурного

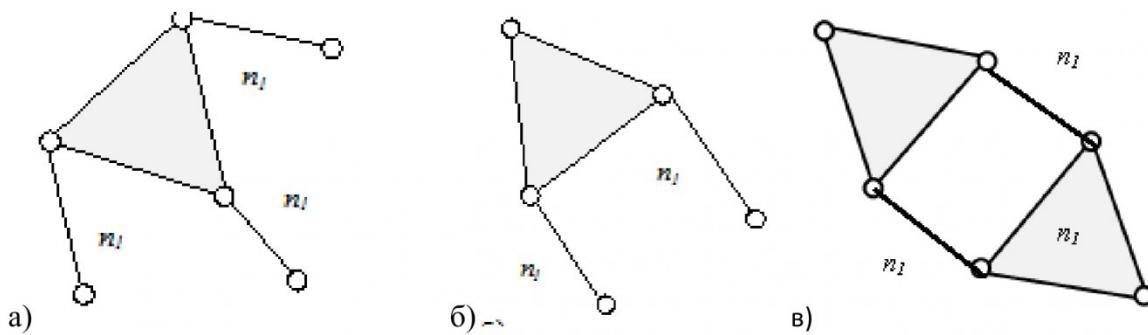


Рис. 2. Различная сборка звеньев при конструировании цепи

синтеза позволило бы сделать эти этапы независимыми друг от друга, уменьшить пространство получаемых целочисленных решений системы и упростить процесс сборки кинематических цепей.

В основу предлагаемого метода положены следующие соображения. В реальном механизме звенья соединяются друг с другом посредством геометрических элементов, представляющих собой специальным образом обработанные поверхности. Геометрические элементы двух соединяемых звеньев образуют кинематическую пару. На структурной схеме звенья изображаются с помощью геометрических фигур, чаще в виде многоугольников с прямолинейными или криволинейными сторонами. Геометрическими элементами многоугольника являются его стороны и углы. Количество сторон и углов у любого многоугольника одинаково. Графические образы геометрических элементов кинематических пар отображаются в углах многоугольников. Таким образом, на

структурной схеме звенья изображаются с помощью геометрических фигур, чаще в виде многоугольников с прямолинейными или криволинейными сторонами. Геометрическими элементами многоугольника являются его стороны и углы. Количество сторон и углов у любого многоугольника одинаково. Графические образы геометрических элементов кинематических пар отображаются в углах многоугольников. Таким образом, на

структурной схеме число геометрических элементов кинематических пар соответствует сумме сторон многоугольников (звеньев). Свободные геометрические элементы звеньев являются выходами кинематической цепи. Если к числу геометрических элементов кинематической цепи добавить число геометрических элементов, равное числу ее выходов, то все геометрические элементы звеньев войдут в состав кинематических пар. На этом основании можно записать уравнение для суммы кинематических пар цепи в виде:

$$S_k = \left(\sum_{i=2}^r i \cdot n_i + vix \right) / 2 .$$

Здесь n_i – число двухпарных, трехпарных и т.д. звеньев, а vix – число выходов кинематической цепи. С другой стороны S_k представляет собой сумму одноподвижных, двухподвижных и т.д. кинематических пар (всего пять классов).

Принимая во внимание вышеизложенное со-

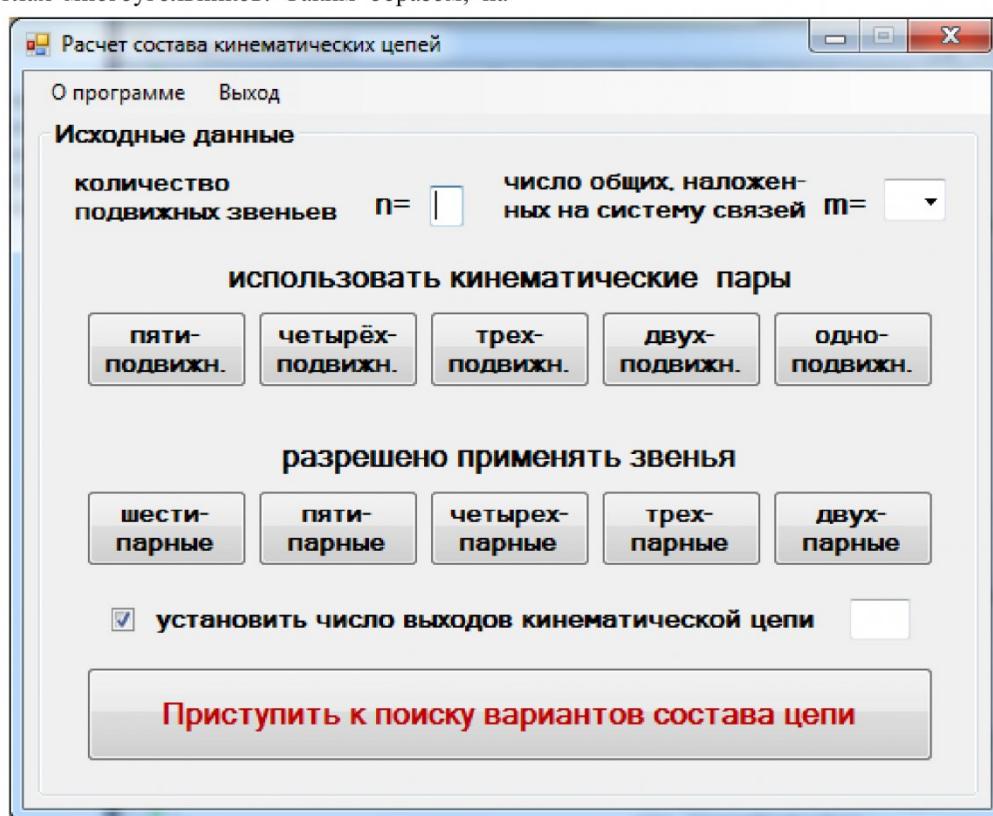


Рис. 3. Вид основного окна рабочей программы

став кинематической цепи с “реальными” звеньями может быть определен путем нахождения целочисленных решений следующей системы.

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \sum_{i=2}^{\tau} n_i \\ \sum_{k=1}^5 p_k = (\sum_{i=2}^{\tau} i \cdot n_i + vix) / 2 \\ W = (6 - m)n - \sum_{k=1}^{5-m} (6 - m - k)p_k \end{array} \right.$$

В этой системе n_2 – число двухпарных звеньев, n_3 – число трехпарных звеньев и т.д.;

p_1 – число одноподвижных пар, p_2 – число двухподвижных пар и т.д.;

vix – число выходов цепи.

Особенностью этой системы является то, что для определения числа кинематических пар необходимо знать число выходов цепи, а для определения числа выходов необходимо знать число кинематических пар. Применение компьютерных средств для поиска целочисленных решений системы позволяет разорвать этот порочный круг следующим образом. Определяется максимально возможное число выходов кинематической цепи для сформированного набора звеньев по формуле

$$vixm = \sum_{i=2}^{\tau} i \cdot n_i - 2(n-1). \text{ Принимая во внимание}$$

ниче тот факт, что минимально возможное число

выходов цепи равно двум, организуется цикл, в котором параметр цикла изменяется от двух до $vixm$. Таким образом, стратегия поиска целочисленных решений остается прежняя, а структура поисковой процедуры, представленной на рис.1, дополняется описанным выше циклом.

Для подтверждения правильности приведенных выше рассуждений была разработана компьютерная программа, основное окно которой представлено на рисунке 3. В этом окне пользователь вводит исходные данные: число подвижных звеньев цепи и число общих, наложенных на систему связей. При вводе значения m формируется линейка возможных классов кинематических пар для заданного семейства. Затем пользователь может задать конкретное подсемейство и определить набор звеньев соответствующей сложности для построения цепи.

Программа позволяет работать в двух режимах, в одном из которых пользователь задает число выходов цепи. В этом случае цикл по числу выходов отключается. Если пользователю не известно количество выходов или он хочет получить все возможные варианты решений, с любым числом выходов, необходимо кликом мыши убрать “галочку” из соответствующего интерфейсного компонента. Результаты поиска отображаются в отдельном окне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Степанов А.В. О современном уровне компьютерного решения задач структурного синтеза механизмов // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 360-369.
- Дворников Л.Т. Адаптированный перевод с немецкого языка статьи: Martin Grubler «Allgemeine eigenschaften der zwangslaufigen ebenen kinemanischen ketten», изданной в Лейпциге в 1883 г. / Л.Т. Дворников, Н.С. Жуковский // – ТММ. – 2011. – Том 9. – №1. – С. 44-61.
- Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов. – Новокузнецк: изд-во СибГГМА, 1994. – 102 с.
- Степанов, А.В. Решение универсальной структурной системы профессора Дворникова Л.Т. / А.В. Степанов // Вестник КузГТУ. – 2007. – №3-'07. – С. 43-47.
- Дворников Л.Т., Степанов А.В. К вопросу о классификации механизмов // Известия ТПУ. Математика и механика. Физика. – 2009. – Т.314. – №2. – С. 31-34.
- Степанов, А.В. Виртуализация в задачах компьютерного синтеза структур механизмов // Вестник КузГТУ. – 2007. – № 3(61). – С. 47-50.
- Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов // Теория механизмов и машин. – 2004. – №2(4). – С. 3-17.

Автор статьи

Степанов

Александр Васильевич,

доктор техн. наук, доцент, проф.
каф.систем автоматизации управле-
ния Новокузнецкого института (фи-
лиала) Кемеровского государствен-

ного университета.

Emsil: stepal@rdtc.ru