

УДК 621.01:681.3

А.В. Степанов, В.В. Дмитриев

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА СТРУКТУР ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЗМОВ

В работе [1] были предложены новые подходы к решению задач структурного синтеза зубчатых механизмов, в соответствии с которыми формирование полного многообразия структур должно производиться путем последовательного выполнения трех взаимосвязанных этапов:

1) определения параметров, необходимых для формирования структур;

2) синтеза полного множества вариантов структурных схем в виде плоских стержневых систем с кинематическими парами четвертого и пятого классов;

3) конвертирования полученных структурных схем в общепринятые графические изображения – в виде профильных проекций зубчатых механизмов.

Ниже рассматриваются вопросы реализации перечисленных этапов с точки зрения их формализации, алгоритмизации и автоматизированного исполнения с помощью компьютерных программ.

На первом этапе определяют количество звеньев различной сложности, а также количество кинематических пар разрешенных к применению классов, необходимых для создания структурных схем. Это можно сделать различным образом: путем перебора всех возможных наборов звеньев и кинематических пар, а также путем нахождения числа виртуальных звеньев, требуемых для создания цепей, являющихся целочисленными решениями универсальной структурной системы [2].

В первом случае необходимо программно реализовать работу счетчика, в каждом из разрядов которого могут отображаться числа от нуля до n , где n – общее число звеньев механизма. Младший разряд счетчика служит для отображения числа двупарных звеньев, разряд постарше – трехпарных и т.д. Добавляя в каждом такте по единице в младший разряд счетчика, получаем отрезок натурального ряда чисел, из которого нужно отобрать только те из них, сумма разрядов которых равна n .

Аналогичным образом можно найти набор комбинаций кинематических пар.

Более предпочтительно использовать для этих целей универсальную структурную систему, целочисленные решения которой дают номенклатуру виртуальных звеньев [3] и число кинематических пар четвертого и пятого классов:

$$\sum_{k=1}^5 p_k \cdot h(k-m) = \tau + (\tau-1)n_{\tau-1} + \dots + 2n_2 + n_1 ;$$

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

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

где n – количество подвижных звеньев;

m – число общих, наложенных на систему связей;

k – класс кинематической пары;

p_k – число кинематических пар k -го класса;

τ – число вершин наиболее сложного звена;

n_i – количество звеньев цепи, привносящих i кинематических пар;

W – подвижность цепи;

$h(k-m)$ – единичная функция вида:

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

Исходными данными для решения системы являются: подвижность цепи W , количество звеньев механизма n и их максимально допустимая сложность τ . Эти параметры связаны между собой следующими соотношениями:

$$n_{min} = W+1 \text{ и } n_{max} = n-W+1 .$$

Значение W зависит от вида зубчатого механизма: для простых (рядовых) и планетарных зубчатых механизмов $W = 1$, для дифференциальных и многоподвижных зубчатых механизмов $W \geq 2$.

Целочисленные решения системы могут быть получены вручную. При этом система с учетом особенностей строения зубчатых механизмов [1] может быть преобразована к виду:

$$p = p_4 + p_5 = \tau + (\tau-1)n_{\tau-1} + \dots + 2n_2 + n_1 ;$$

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

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 ;$$

$$p_5 = n .$$

При большом числе звеньев для автоматизации поиска целочисленных решений универсальной структурной системы можно использовать компьютерную программу [4], добавив дополнительную проверку условия $p_5 = n$ перед регистрацией решения.

Значения переменных $n_1, n_2, \dots, n_{\tau-1}$, получаемые в результате решения системы, представляют собой числа виртуальных звеньев, каждое из которых характеризуется двумя параметрами: именем и числом кинематических пар, привносимых этим звеном в цепь. В реальные звенья они превратятся лишь при формировании структурных схем в виде плоских стержневых систем.

Получив набор реальных или виртуальных звеньев, а также конкретное количество кинематических пар каждого класса, переходят ко второ-

му этапу решения задачи – получению полного многообразия структур в виде плоских стержневых систем.

Основой для разработки компьютерных программ, реализующих этот этап, может служить объектно-ориентированная технология автоматизированного синтеза структурных схем плоских шарнирных механизмов [5], базирующаяся на концепции объектно-ориентированного подхода (ООП).

Суть ООП состоит в том, что проектируемая система, в данном случае структурная схема, представляется в виде совокупности объектов, каждый из которых имеет свой жизненный цикл и формы взаимодействия с другими объектами в процессе построения системы. Это позволяет осуществлять непосредственное формирование структурных схем с учетом тех или иных ограничений без использования промежуточных знаковых систем. Совокупность компьютерных процедур обеспечивает генерирование гарантированно полного многообразия вариантов соединения звеньев между собой, фильтрацию заведомо неприемлемых и изоморфных структур на различных этапах формирования структурной схемы, визуализацию и сохранение отобранных структур.

Особенность реализации этой технологии для зубчатых механизмов состоит в том, что первоначально производится формирование полного множества вариантов структурных схем плоских стержневых систем с виртуальными кинематическими парами, исходя из предположения, что все они принадлежат к одному классу. Это может быть осуществлено с помощью комплекса компьютерных процедур, приведенных в [5], адаптированного с учетом особенностей построения структур зубчатых механизмов. Необходимость адаптации продиктована хотя бы тем, что в плоских стержневых системах с применением кинематиче-

ских пар только пятого класса изменяемый замкнутый контур может быть образован четырьмя и более звенями цепи. В структурных схемах зубчатых механизмов при использовании пар четвертого и пятого класса даже три звена могут образовывать его, если хотя бы любые два из них соединены кинематической парой четвертого класса. Кроме того, система окажется подвижной при наличии всего двух участков на стороне структурной схемы, при условии, что хотя бы одна из кинематических пар, расположенных на ней, является высшей. В результате адаптации компьютерных процедур [5], разработана компьютерная программа, осуществляющая синтез структурных схем зубчатых механизмов в виде плоской стрелневой системы с виртуальными кинематическими парами. Полученные в результате работы программы структурные схемы являются своего рода шаблонами для дальнейшего размещения реальных кинематических пар вместо их виртуальных двойников.

Для примера на рис. 1-3 приведены шаблоны, сформированные программой. Виртуальные кинематические пары на рисунках обозначены небольшими квадратиками, в которых помещен их условный порядковый номер.

Пунктирной линией показаны выходы кинематической цепи.

После получения структурных схем с виртуальными кинематическими парами одного класса производится их замена парами четвертого и/или пятого классов с сохранением порядка соединения звеньев между собой.

Для оценивания числа возможных вариантов размещения заданного количества кинематических пар четвертого и пятого классов на шаблоне можно использовать известную из комбинаторики формулу [6, с. 354], которая в соответствии с принятыми обозначениями имеет вид:

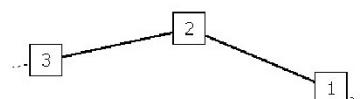


Рис. 1. Шаблон, полученный при $\tau = 2$ и $n = 2$

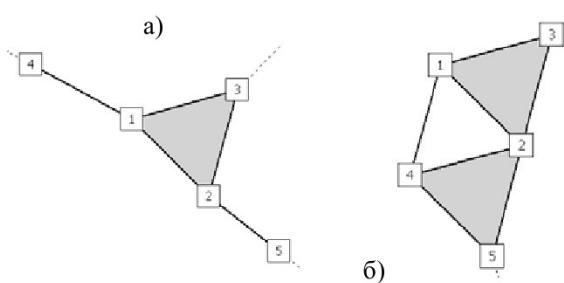


Рис. 2. Шаблоны, полученные при $\tau = 3$ и $n = 3$

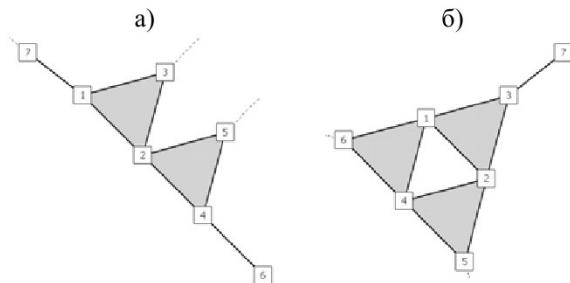
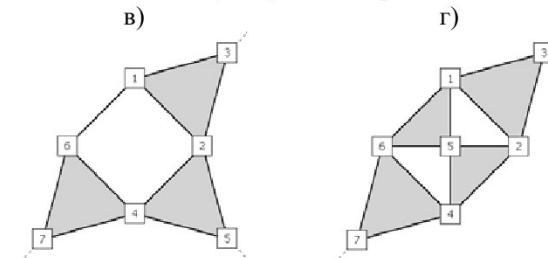


Рис. 3. Шаблоны, полученные при $\tau = 3$ и $n = 4$



$$N = \frac{(p_5 + p_4)!}{p_5! \times p_4!}.$$

Таким образом, для каждого шаблона компьютерная программа должна сформировать N структурных схем зубчатых механизмов в виде плоских стержневых систем с кинематическими парами четвертого и пятого классов. Число получаемых структурных схем достаточно велико (табл. 1).

Таблица 1. Число вариантов размещения кинематических пар ($W = 1$) для различного числа звеньев механизма

| n | $p_5=n$ | $p_4=n-W$ | N |
|-----|---------|-----------|-------|
| 2 | 2 | 1 | 3 |
| 3 | 3 | 2 | 10 |
| 4 | 4 | 3 | 35 |
| 5 | 5 | 4 | 126 |
| 6 | 6 | 5 | 462 |
| 7 | 7 | 6 | 1716 |
| 8 | 8 | 7 | 6435 |
| 9 | 9 | 8 | 24310 |
| 10 | 10 | 9 | 92378 |

Технологию построения структур в виде плоских стержневых систем поясним на примерах. Рассмотрим шаблон, приведенный на рис. 1. Из решения универсальной структурной системы следует, что из трех кинематических пар цепи две должны быть пятого класса и одна – четвертого. Из табл.1 определяем, что из шаблона можно сформировать три различные кинематические цепи, заменяя виртуальные кинематические пары реальными. Возможные варианты размещения кинематических пар на шаблоне см. в табл. 2.

Таблица 2. Варианты размещения трех кинематических пар

| Номер варианта | Класс кинематической пары, с порядковым номером ... | | |
|----------------|---|----|----|
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 | V | V | IV |
| 2 | V | IV | V |
| 3 | IV | V | V |

На рис.4 приведены графические образы полученных цепей.

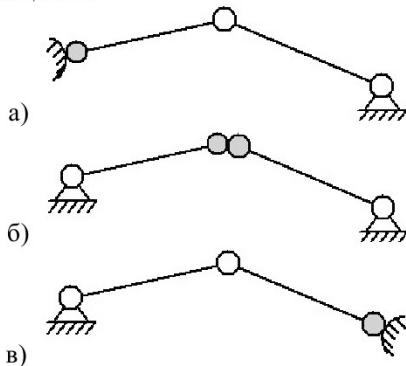


Рис. 4. Полное многообразие структурных схем при $t = 2$ и $n = 2$

Рассмотрим шаблоны, полученные при $t = 3$ и $n = 3$, приведенные на рис. 2. На них можно разместить всего пять кинематических пар. В табл.1 находим, что возможно использование трех пар пятого класса и двух пар четвертого класса. Для рассматриваемых вариантов соединения трех подвижных звеньев может быть получено по десять различных кинематических цепей. Возможные варианты размещения кинематических пар на каждом шаблоне приведены в табл.3.

Таблица 3. Варианты размещения пяти кинематических пар

| Номер варианта | Класс кинематической пары, с порядковым номером ... | | | | |
|----------------|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | V | V | V | IV | IV |
| 2 | V | V | IV | V | IV |
| 3 | V | IV | V | V | IV |
| 4 | IV | V | V | V | IV |
| 5 | V | V | IV | IV | V |
| 6 | V | IV | V | IV | V |
| 7 | IV | V | V | IV | V |
| 8 | V | IV | IV | V | V |
| 9 | IV | V | IV | V | V |
| 10 | IV | IV | V | V | V |

Таким образом, полное множество вариантов, сформированное из двух рассматриваемых шаблонов, содержит 20 структурных схем четырехзвенных зубчатых механизмов ($n = 3$) в виде плоских стержневых систем с кинематическими парами четвертого и пятого классов. Они приведены на рис. 5.

В процессе и после формирования полного многообразия структурных схем в виде плоских стержневых механизмов необходимо производить отбраковку некоторых вариантов. Процесс отбраковки представляет собой последовательное прохождение получаемых структур через совокупность различных фильтров, каждый из которых проверяет соответствие полученной структуры какому-то конкретному требованию.

Совокупность предъявляемых требований может быть следующая:

- любое звено кинематической цепи должно иметь хотя бы одну пару пятого класса;
- любая ограничивающая сторона структурной схемы, состоящая из двух участков, должна иметь хотя бы одну пару четвертого класса;
- замкнутый контур, образованный тремя звеньями, должен иметь хотя бы одну кинематическую пару четвертого класса.

Кроме проверки соответствия предъявляемым требованиям, каждая структурная схема проверяется на уникальность или на изоморфность путем ее сравнения с ранее полученными схемами.

В результате выполнения процедуры отбраковки из трех структурных схем, показанных на

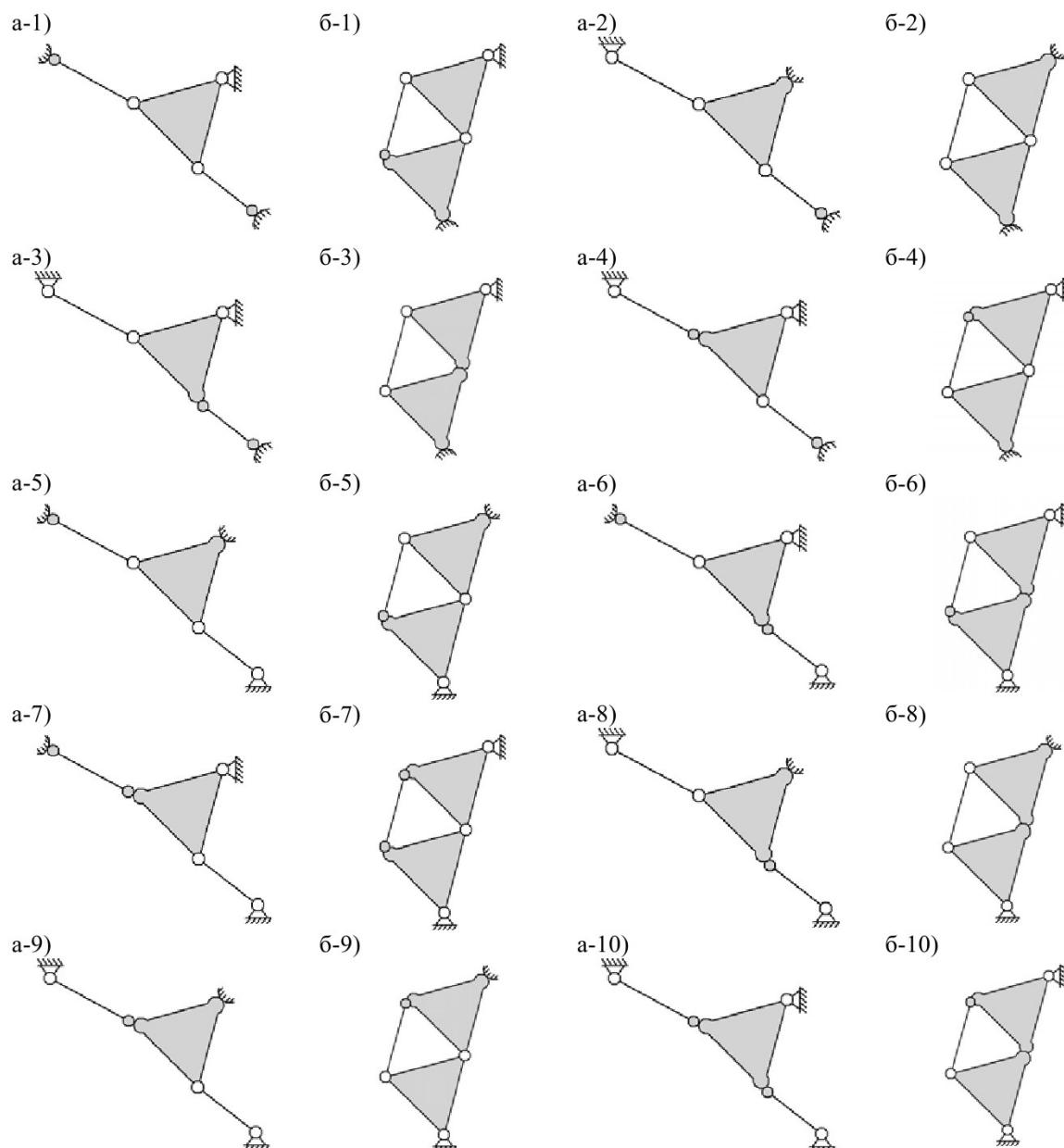
Рис. 5. Полное многообразие структурных схем при $\tau = 3$ и $n = 3$ Рис. 6. Итоговый набор структурных схем при $\tau = 2$ и $n = 2$

рис. 4, на последующих этапах будут представлены только две, приведенные на рис. 6.

Из 20 структурных схем, приведенных на рис. 5, отбраковке подвергнутся следующие:

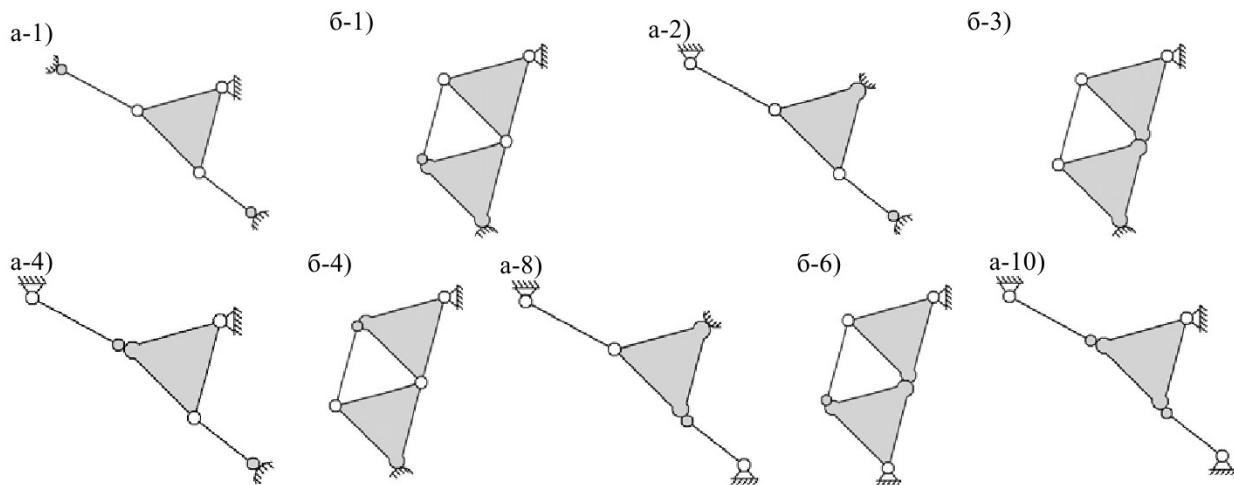
- схемы а-3, а-7, б-7 – как имеющие звенья, не содержащие кинематических пар пятого класса;
- схема б-2 – как имеющая неизменяемый замкнутый контур;
- схемы а-5, а-6, а-9, б-5, б-8, б-9, б-10 – как не уникальные, т.к. повторяют соответственно схемы а-2, а-4, а-8, б-4, б-3, б-1, б-6.

Девять оставшихся структурных схем приве-

дены на рис. 7.

На последнем этапе, полученные структурные схемы зубчатых механизмов в виде плоских стержневых систем подвергаются конвертированию в общепринятые графические изображения.

Каждая из структурных схем может быть прародителем нескольких структур зубчатых механизмов, отличающихся друг от друга видом зацепления, числом ступеней, формой зубчатых колес, взаимным расположением ведущего и ведомого валов и т.п. К примеру, из каждой схемы, представленной на рис. 6, можно получить несколько

Рис. 7. Итоговый набор структурных схем при $\tau = 3$ и $n = 3$

вариантов схем трехзвенных зубчатых механизмов, отличающихся видом зубчатого зацепления (рис. 8, 9).

Результаты исследований дают основания полагать, что новые подходы к решению задач

структурного синтеза зубчатых механизмов, изложенные в [1], могут стать основой для разработки компьютерных программ, автоматизирующих этот процесс.

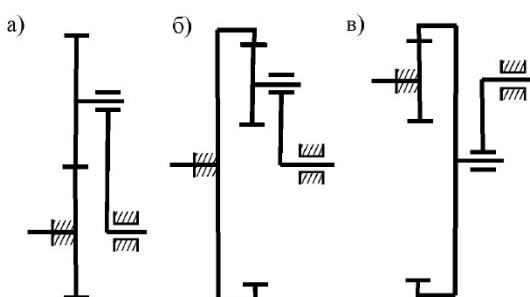


Рис. 8. Схемы трехзвенных зубчатых механизмов, полученные из схемы рис. 6а: а – с внешним зацеплением, б и в – с внутренним зацеплением

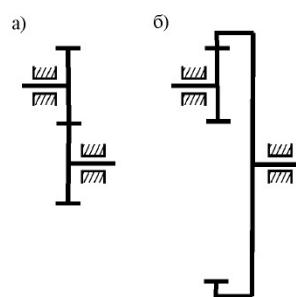


Рис. 9. Схемы трехзвенных зубчатых механизмов, полученные из схемы рис. 6б: а – с внешнем зацеплением, б – с внутренним зацеплением

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников Л.Т. Новые подходы к решению задач структурного синтеза зубчатых механизмов // Материалы десятой научно-практической конференции по проблемам машиностроения и горных машин. Новокузнецк, 2000, с. 3-17.
2. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов: Учебное пособие / Новокузнецк, СибГГМА, 1994. – 102 с.
3. Степанов А.В. Виртуализация в задачах компьютерного синтеза структур механизмов / А.В. Степанов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2007, № 3(61), с. 47-50.
4. Степанов А.В. Решение универсальной структурной системы проф. Л.Т. Дворникова / А.В. Степанов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2007, № 3(61), с. 43-47.
5. Степанов А.В. Объектно-ориентированная технология компьютерного синтеза структур плоских рычажных механизмов / А.В. Степанов // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2007, № 6(64), с. 105-110.
6. Андерсон Джеймс А. Дискретная математика и комбинаторика. – М.: Вильямс, 2004. – 960 с.

□Авторы статьи

Степанов
Александр Васильевич
– канд. техн. наук, доц.,
зав. каф. прикладной информатики
(Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк),
stepanov@sibsiu.ru

Дмитриев
Виктор Владимирович
– ст. преп. каф. прикладной информатики, аспирант каф. теории механизмов, машин и основ конструирования (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк), dmi3ev@inbox.ru