ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК. 621.01

Л.Н. Гудимова

БЕЗЫЗБЫТОЧНЫЕ ГРУППЫ АССУРА КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ МЕХАНИЗМОВ БЕЗ ДЕФИЦИТА ПОДВИЖНОСТИ

В современном машиностроении широко используется метод Ассура при создании шарнирных механизмов [1]. Метод прост и сформулирован в [1] так – механизм может быть создан путём присоединения к ведущему звену (механизму первого класса, с вращательной или поступательной парой) группы или групп звеньев, обладающих нулевой подвижностью.

К настоящему времени убедительно доказано [2, 3, 4], что плоские шарнирные механизмы в результате неизбежной принужденной сборки механической системы содержат избыточные связи. Исследования, опубликованные в работе [8], позволяют утверждать, что избыточными связями в механических системах следует называть такие связи, которые вызывают дефицит подвижности в результате неизбежной принужденной сборки системы в случае, когда число звеньев, число и классы используемых кинематических пар не соответствуют самоустанавливающейся системе, описываемой формулой подвижности Малышева.

Наличие их снижает нагрузочную способность механизма и машины, КПД, увеличивает массу и габариты, и ухудшает многие технологические параметры. Таким образом, создание механизмов без избыточных связей является актуальной задачей современного машиностроения. В данной работе предлагается метод, позволяющий создавать механизмы без дефицита подвижности на основе безызбыточных групп нулевой подвижности.

Число избыточных связей q в кинематических цепях позволяет определять формула Н.И. Колчина [5], учитывающая число общих связей накладываемых на механическую систему в целом

$$q = m(p - n). \qquad (1)$$

Покажем на примере плоских ($m = 3$) шарнирных групп Ассура зависимость между числом избыточных связей и числом подвижных звеньев групп нулевой подвижности. Известно, что подвижность таких структур

$$W = 3n - 2p_5 = 0.$$

Выразим число кинематических пар пятого класса из этой формулы, подставим в (1) и получим формулу, определяющую число избыточных связей в зависимости от числа звеньев, образующих группу Асура

$$q = 3(\frac{3n}{2} - n) = \frac{3n}{2}.$$

Приведём в табл. 1 изменение числа избыточности при увеличении числа звеньев в группах нулевой подвижности.

Таблица 1. Изменение числа избыточных связей в группах Асура

n	2	4	6	8	10
q	3	6	9	12	15

Из табл. 1 видно, что механизмы, созданные на базе шестизвенных групп Ассура, будут иметь девять избыточных связей, что существенно скажется на их работоспособности. Заставить работать механизм, содержащий в своём составе восьмизвенную группу с $q = 12$, будет очень проблематично. Однако, имея в своем арсенале набор безызбыточных групп нулевой подвижности с любым числом звеньев, конструктор без особых затруднений может создавать любые по сложности механизмы без дефицита подвижности.

Покажем на нескольких примерах создание групп нулевой подвижности без избыточных связей и укажем особенности предлагаемого метода.

Рассмотрим самую простую и наиболее часто используемую группу – диаду Сильвестера. Группа состоит из двух звеньев $n = 2$ и трёх кинематических пар пятого класса $p_5 = 3$, подвижность которой $W = 0$, образуя один замкнутый контур [6] $k = p - n = 3 - 2 = 1$. Для решения поставленной задачи воспользуемся системой уравнений, приведенной в [7], которая описывает исследуемую механическую систему одновременно и как плоскую, и как пространственную. Используя для замены шарниров (p_5) кинематические пары более высоких классов, а именно, p_4 и p_3, которые легко реализовать как удерживающие, эта система примет вид

$$\begin{cases} p_4 = \frac{3n+W}{2} - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - W. \end{cases} \qquad (2)$$

Подставим в (2) значения принятых параметров (n, W) и получим

$$\begin{cases} p_4 = 3 - 2p_5, \\ p_3 = p_5. \end{cases} \qquad (3)$$

Система уравнений (3) имеет два целочисленных положительных решения

$$1.\ p_5 = 0,\ p_4 = 3,\ p_3 = 0,$$
$$2.\ p_5 = 1,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1, \qquad (4)$$

оба удовлетворяют условию поставленной задачи.

Во втором варианте, где в решении присутствуют все три кинематические пары p_5, p_4, p_3, которые могут располагаться по одному из шести вариантов, представленных на рисунке 1, говорить о точном расположении кинематических пар нет необходимости потому, что двухзвенная группа является одноконтурной и избыточные связи в любом случае будут отсутствовать. Покажем это, используя формулы, приведенные в [8]

$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 = 6 \cdot 2 - 5 \cdot 1 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 0,$

$q = 5p_4 + 4p_4 + 3p_3 - (6n - W) = 5 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 - 6\ 2 + 0 = 0.$

При реальном создании механизма, в состав которого входит диада, конструктор может располагать кинематические пары, таким образом, который приемлем для удобной сборки звеньев механизма.

Например, кинематическую пару p_5 целесообразно поместить либо в точку A, (рис.1, a, b) либо – C (рисунок1, c, d), если одна из этих точек будет соединяться со стойкой или с приводом, т.к. эта пара с точки зрения конструктивного исполнения является наиболее простой и часто применяется для реализации привода. Пары третьего или четвёртого классов тогда будут находиться в точках B или C, но их расположение не окажет никакого влияния на избыточность контура.

Первый вариант полученного решения (4), который также обеспечивает отсутствие избыточности в двухзвенной группе Ассура, представлен только кинематическими парами четвертого класса, и в идентификации не нуждается (рис. 1, g).

В работе [7] приведен пример создания четырёхзвенного механизма без избыточных связей, в котором расположение кинематических пар не отличается от приведенного на рис. 1, k. Это позволяет утверждать, что создать механизм без дефицита подвижности можно, присоединяя к механизму первого класса безызбыточную группу нулевой подвижности, т.к. начальный механизм (механизм первого класса), состоящий из одного звена $n = 1$ и одной пары $p_5 = 1$, представленный на рис. 2, является безизбыточным по связям

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 = 6 \cdot 1 - 5\ 1 = 1,$$

тогда

$$q = 5p_4 + 4p_4 + 3p_3 - (6n - W) = 5 \cdot 1 - (6 \cdot 1 - 1) = 0.$$

Рис. 2. Механизм первого класса с вращательной (a) и поступательной (b)парами

Усложним задачу и создадим четырёхзвенную безызбыточную группу Ассура, в которой $n = 4$, $p_5 = 6$. В качестве примера возьмем группу Бурместера (рис.3, a).

Приступая к решению поставленной задачи, отметим, что эта и все другие плоские группы Ассура, содержащие более двух подвижных звеньев, выполняются неодноконтурными. В этих группах необходимо добиться такого расположения кинематических пар более высоких классов, чтобы безызбыточными были одновременно и замкнутые контуры и группа в целом. В связи с этим введем в рассмотрение два вида избыточных связей. Одни связи назовем родовыми, а другие контурным. Количество родовых связей будет определяться исходя из того, к какому роду (семейству) относится группа, а контурных – сложностью основ-

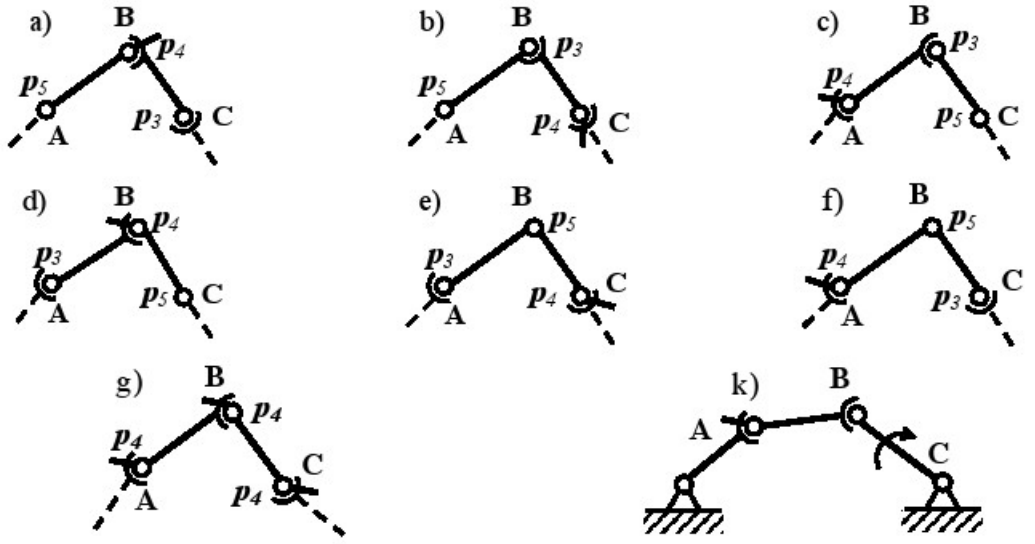


Рис. 1. Расположение кинематических пар в безызбыточной диаде (a, b, c, d, e, f, g) и четырёхзвенный безызбыточный механизм (k)

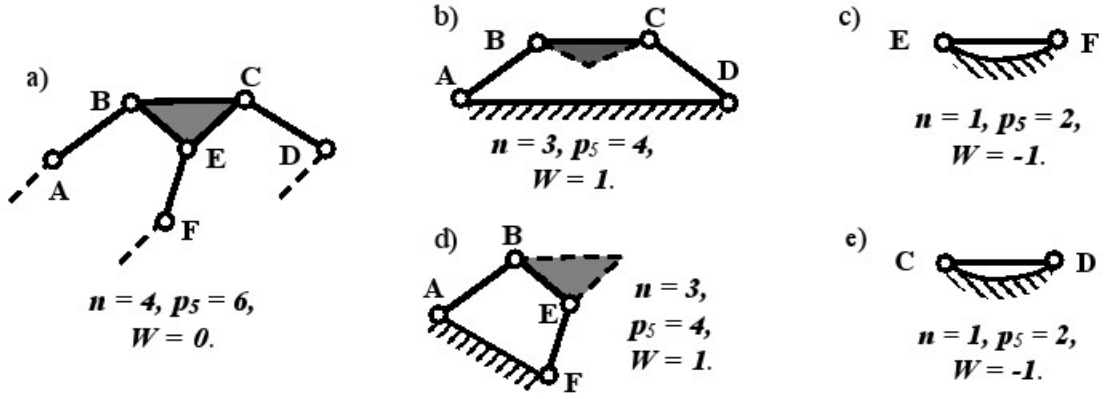


Рис. 3. Группа Бурместера (a), первое разделение (b, c) и второе разделение (d, e) группы

ных рассматриваемых контуров, формирующих кинематическую цепь. Прежде чем приступить к решению задачи исключения избыточных связей в более сложных группах Ассура обратимся к не менее важной задаче, а именно, к задаче о разделении кинематической цепи на простые контуры. Главное условие правильного выбора вида основных и дополнительных контуров заключается в том, чтобы ни одно из звеньев группы Ассура и ни одна из кинематических пар не были использованы для расчетов дважды в пределах каждого разделения.

На основании выше изложенного представим исследуемую группу следующими разделениями: первое разделение – основным контуром *ABCD* и дополнительным контуром, состоящим из звена *EF* (рисунок 3, b, c), второе – основным контуром *ABEF* и звеном *CD* (рис.3, d, e).

Подставим число звеньев ($n = 4$) и подвижность ($W = 0$) группы Бурместера в (2) и получим систему

$$\begin{cases} p_4 = 6 - 2p_5, \\ p_3 = p_5, \end{cases}$$

которая будет иметь четыре варианта решений сочетаний кинематических пар, каждый из которых обеспечивает исключение родовых избыточных связей в группе

$$\begin{gathered} 1.\ p_5 = 3,\ p_4 = 0,\ p_3 = 3, \\ 2.\ p_5 = 2,\ p_4 = 2,\ p_3 = 2, \\ 3.\ p_5 = 1,\ p_4 = 4,\ p_3 = 1, \\ 4.\ p_5 = 0,\ p_4 = 6,\ p_3 = 0. \end{gathered} \quad (5)$$

Для исключения дефицита подвижности в каждом контуре группы и для проведения адресной замены пар пятого классы на кинематические пары более высоких классов, рассмотрим первое разделение (рисунок 3, b, c) группы Бурместера. Для основного контура *ABCD*, содержащего три звена ($n = 3$) и имеющего подвижность $W = 1$, по (2) получим систему

$$\begin{cases} p_4 = 5 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 1, \end{cases} \quad (6)$$

которая дает два целочисленных положительных решения

$$1.\ p_5 = 2,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1, \quad (7)$$

$$2.\ p_5 = 1,\ p_4 = 3,\ p_3 = 0. \quad (8)$$

Подставляя значения n и W в (2) для дополнительного контура (звено *EF*), получим

$$\begin{cases} p_4 = 1 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 + 1. \end{cases} \quad (9)$$

Система (9) имеет только одно решение

$$1.\ p_5 = 0,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1. \quad (10)$$

Просуммируем результаты полученных решений первого разделения. Комплексных решений, которые являются алгебраическими суммами решений (7) и (10); (8) и (10), будет два

$$\begin{gathered} 1.\ p_5 = 2,\ p_4 = 2,\ p_3 = 2, \\ 2.\ p_5 = 1,\ p_4 = 4,\ p_3 = 1. \end{gathered} \quad (11)$$

Сравним решения (11) с родовыми решениями (5). Отметим, что совпадающими решениями являются только два, это второе и третье уравнения (5). Первое и четвертое решения, полученные в (5), не смогут обеспечить безызбыточность одновременно и группе, и в каждом контуре.

Перейдём к анализу и решению второго разделения группы Бурместера, которое представлено основным контуром *ABEF* и дополнительным (звено *CD)*. Необходимые для решения исходные данные (число звеньев и подвижность) приведены рядом с рассматриваемыми разделениями на рис. 3, d и e. Подставим их в формулы системы (2) и получим

$$\begin{cases} p_4 = 5 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 1. \end{cases} \quad (12)$$

Система (12) имеет два варианта решений, в которых кинематические пары пятого, четвёртого и третьего классов будут представлены следующими целыми положительными числами

$$1.\ p_5 = 2,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1, \quad (13)$$

$$2.\ p_5 = 1,\ p_4 = 3,\ p_3 = 0. \quad (14)$$

Для дополнительного контура *CD* система уравнений, составленная по (2), имеет вид

$$\begin{cases} p_4 = 1 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 + 1. \end{cases} \quad (15)$$

Очевидно, что (15) даёт только одно положительное решение

$$1.\ p_5 = 0,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1. \qquad (16)$$

Комплексных решений в этом разделении также будет два, и они получаются сложением чисел кинематических пар (13) и (16); и (14) и (16)

$$1.p_5 = 2,\ p_4 = 2,\ p_3 = 2,$$
$$2.\ p_5 = 1,\ p_4 = 4,\ p_3 = 1. \qquad (17)$$

Сравним все три полученных решения: родовое (5) и комплексные решения двух разделений (11 и 17). Совпадающими являются те, что представлены в (17). Дальнейшее решение проведём при условии, что $p_5 = 2,\ p_4 = 2,\ p_3 = 2$.

Это решение появилось из пяти независимых друг от друга частных решений, а именно, из второго уравнения родового решения (5), из решений уравнений в разделениях (7) и (10); (13) и (16). Перепишем их в одну систему

$$\begin{cases} p_5 = 2p_4 = 2,\ p_3 = 2, \\ p_5 = 2,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1, \\ p_5 = 0,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1, \\ p_5 = 2,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1, \\ p_5 = 0,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1. \end{cases} \qquad (18)$$

Поставим теперь задачу так: найти, какие именно (адресно) шарниры исследуемой группы Ассура необходимо заменить на пары более высоких классов и на какие именно. Не решив такой задачи, гарантировать безызбыточность группы в целом и её контуров невозможно.

Поступим так: идентифицируем все кинематические пары группы нулевой подвижности (рис.3, a, b, c, d, e), обозначив их соответствующими буквами, и запишем алгебраические уравнения, соответствующие решениям (18). В левых частях в виде суммы обозначенных буквами кинематических пар, формирующие контуры в разделениях и дающие принятое решение, а в правых частях в виде суммы их решений (18), первое уравнение соответствует родовому решению

$$A + B + C + Д + E + F = 2p_5 + 2p_4 + 2p_3,$$

из первого решения по (7)

$$A + B + C + Д = 2p_5 + p_4 + p_3,$$

из решения по (10)

$$E + F = + p_4 + p_3,$$

из первого решения по (13)

$$A + B + E + F = 2p_5 + p_4 + p_3,$$

и из решения по (16)

$$C + Д = p_4 + p_3.$$

В целом получим систему

$$\begin{cases} A+B+C+D+E+F = 2p_5 + 2p_4 + 2p_3, \\ A+B+C+D = 2p_5 + p_4 + p_3, \\ E+F = p_4 + p_3, \\ A+B+E+F = 2p_5 + p_4 + p_3, \\ C+D = p_4 + p_3. \end{cases} \qquad (19)$$

Система (19) содержит пять уравнений, а число неизвестных равно шести, однако решение её логичное и простое. Подставим четвертое уравнение системы (19) в первое и получим, что $C + D = p_4 + p_3$. Пятое уравнение тождественно полученному уравнению. Это означает, что в точках C и D может находиться либо кинематическая пара p_4, либо p_3, при этом безызбыточность группы будет гарантирована. После подстановки второго уравнения в первое имеем $E + F = p_4 + p_3$. Оно тождественно с третьим уравнением системы (19), значит $E = p_4$ (p_3), а $F = p_3$ (p_4). Учитывая найденные значения кинематических пар в точках E и F, из четвертого уравнения получаем, что $A + B = 2p_5$, т.е. в этих точках должны располагаться кинематические пары пятого класса. На рис. 4, a, b показана безызбыточная четырёхзвенная группа нулевой подвижности с различным расположением кинематических пар в точках C и D, E и F, согласно найденному решению.

Покажем теперь, что избыточные связи отсутствуют как в самой группе Бурместера, так и в её основных контурах. Для этого определим подвижность ($W_{гр}$) и число избыточных связей в них ($q_{гр}$) и в основных контурах. Обозначим подвижность контуров: $ABEF - W_{AF}$, $DCEF - W_{DF}$, $ABCD - W_{AD}$, такие же подстрочные буквенные индексные обозначения присвоим и q

$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3$,
$q = 5p_4 + 4p_4 + 3p_3 - (6n - W)$,
$W_{гр} = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 2 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 2 = 0$,
$q_{гр} = 5 \cdot 2 + 4 \cdot 2 + 3 \cdot 2 - 6 \cdot 4 + 0 = 0$,
$W_{AF} = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 1$,
$q_{AF} = 5 \cdot 2 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 - 6 \cdot 3 + 1 = 0$.
$W_{DF} = 6 \cdot 3 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 2 = 4$,
$q_{DF} = 4 \cdot 2 + 3 \cdot 2 - 6 \cdot 3 + 4 = 0$.
$W_{AD} = 6 \cdot 3 - 5 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 1$,
$q_{BCG} = 5 \cdot 2 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 - 6 \cdot 3 + 1 = 0$.

Создадим шестизвенный безызбыточный механизм, присоединив к ведущему звену, например, в точке D группу Бурместера, не содержащую избыточных связей (рис.. 4, c). Определим подвижность и число избыточных связей полученного

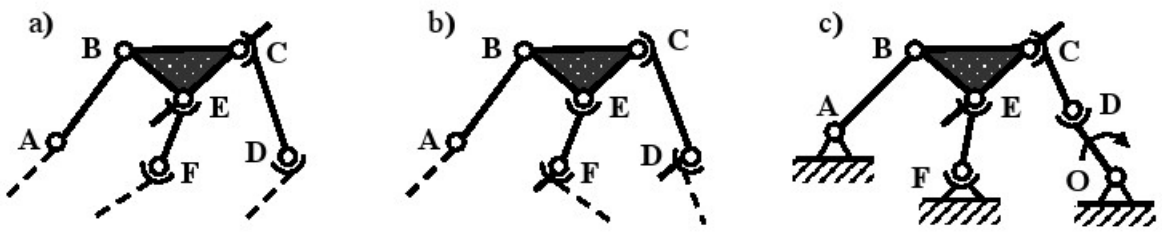


Рис. 4. Безызбыточная группа Бурместера (a, b) и шестизвенный механизм без дефицита подвижности

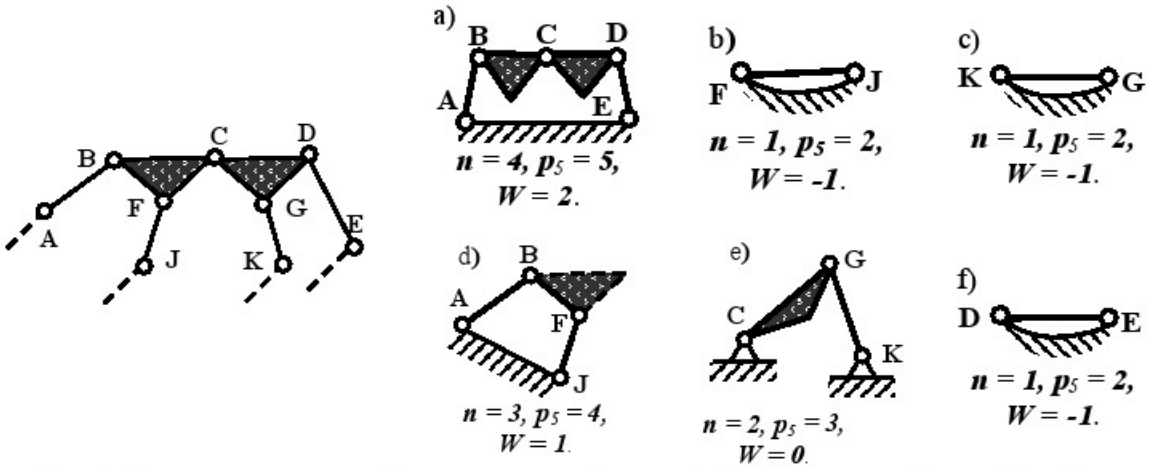


Рис. 5. Шестизвенная группа Ассура, первое разделение (a, b, c), второе разделение (d, e, f)

Таблица 2. Результаты решений разделений шестизвенной группы Асура

Разделения	Системы уравнений по (2)	Кол-во решений	Решения системы уравнений	Комплексные решения
5, a	$\begin{cases} p_4 = 7 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 2. \end{cases}$	1 2	$p_5 = 3, p_4 = 1, p_3 = 1,$ $p_5 = 2, p_4 = 3, p_3 = 0.$	$p_5 = 3, p_4 = 3, p_3 = 3,$ $p_5 = 2, p_4 = 5, p_3 = 2.$
5, b	$\begin{cases} p_4 = 1 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 + 1. \end{cases}$	3	$p_5 = 0, p_4 = 1, p_3 = 1.$	
5, c	$\begin{cases} p_4 = 1 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 + 1. \end{cases}$	4	$p_5 = 0, p_4 = 1, p_3 = 1.$	
5, d	$\begin{cases} p_4 = 5 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 1. \end{cases}$	5 6	$p_5 = 2, p_4 = 1, p_3 = 1,$ $p_5 = 1, p_4 = 3, p_3 = 0.$	$p_5 = 3, p_4 = 3, p_3 = 3,$ $p_5 = 2, p_4 = 5, p_3 = 2.$
5, e	$\begin{cases} p_4 = 3 - 2p_5, \\ p_3 = p_5. \end{cases}$	7	$p_5 = 1, p_4 = 1, p_3 = 1.$	
5, f	$\begin{cases} p_4 = 1 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 + 1. \end{cases}$	8	$p_5 = 0, p_4 = 1, p_3 = 1.$	

механизма

$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 = 6 \cdot 5 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 2 = 1,$

$q_{zp} = 5 \cdot 3 + 4 \cdot 2 + 3 \cdot 2 - 6 \cdot 5 + 1 = 0$

Усложним задачу и создадим безызбыточную шестизвенную группу Ассура ($W = 0$), содержащую шесть подвижных звеньев $n = 6$ и девять кинематических пар пятого класса $p_5 = 9$, применяя метод адресной замены низших пар парами более высоких классов, подробно описанный в предыдущем примере. Найдем родовые решения, подставив n и W в (2)

$$\begin{cases} p_4 = 9 - 2p_5, \\ p_3 = p_5. \end{cases} \qquad (20)$$

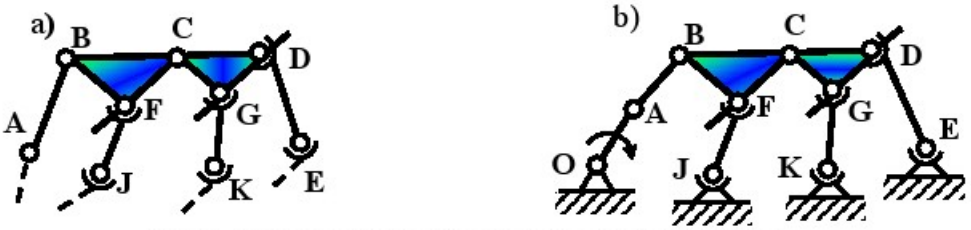
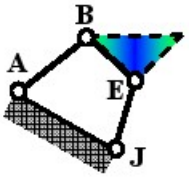
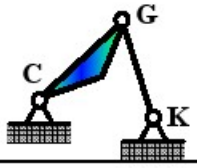


Рис. 6. Безызбыточная шестизвенная группа Ассура (a) и безызбыточный восьмизвенный механизм (b)

Таблица 3. Адресные уравнения для разделений группы Ассура

Разделения	Идентификация кинематических пар, разделения и их решения		Исходные данные
	Левая часть	Правая часть	
	$A + B + C + D + E$	$3p_5 + p_4 + p_3$	Рисунок 5, a. Таблица 2 (1)
	$F + J$	$p_4 + p_3$	Рисунок 5, b. Таблица 2 (3)
	$K + G$	$p_4 + p_3$	Рисунок 5, c. Таблица 2 (4)
	$A + B + F + J$	$2p_5 + p_4 + p_3$	Рисунок 5, d Таблица 2 (5)
	$C + G + K$	$p_5 + p_4 + p_3$	Рисунок 5, e Таблица 2 (7)
	$D + E$	$p_4 + p_3$	Рисунок 5, f Таблица 2 (8)

Система (12) имеет пять целочисленных положительных родовых решений

1. $p_5 = 4, p_4 = 1, p_3 = 4$,
2. $p_5 = 3, p_4 = 3, p_3 = 3$,
3. $p_5 = 2, p_4 = 5, p_3 = 2$,
4. $p_5 = 1, p_4 = 7, p_3 = 1$,
5. $p_5 = 0, p_4 = 9, p_3 = 0$. (21)

Приступая к решению поставленной задачи, проведем разделение шестизвенной группы нулевой подвижности на контуры, где укажем число звеньев, число шарниров и подвижность рассматриваемых контуров в каждом разделении (рис. 5).

Отметим, что в каждом разделении после выделения основного контура появляется по два дополнительных контура.

Покажем в табл.2 системы уравнений для каждого контура рассматриваемых разделений исследуемой группы, составленные по (2), подставляя в них значения n и W (рис. 5), найденные по ним решения, а также комплексные решения.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что и в первом, и во втором разделениях получается по два одинаковых комплексных решений, совпадающих со вторым и третьем уравнениям родовых решений (21).

Остановимся на одном из совпадающих решений, а именно, $p_5 = 3, p_4 = 3, p_3 = 3$.

В первом разделении комплексное решение (табл. 2) является результатом сложения трех независимых решений (1), (3) и (4), во втором разделении оно получено при сложении решений (5), (7) и (8).

Продолжая решение поставленной задачи, представим в табл. 3 левые и правые части уравнений, соответствующие основным и дополнительным контурам в обоих разделениях шестизвенной группы Ассура, полученные по ним решения и укажем (для лучшего понимания) на основании каких данных они получены.

Например, в табл. 3 в последней колонке в скобках указаны цифры, которые соответствуют принятым решениям, полученным в табл. 2.

Используем данные табл. 3 при составления системы уравнений для адресной замены пар p_5, на пары p_4 и p_3 и определения расположений их в шестизвенной группе Ассура

Первое уравнение системы (22) соответствует родовому решению шестизвенной группы Ассура. Левые части остальных шести уравнений представляют буквенные, а правые – численные суммы кинематических пар, основных и дополнительных контуров каждого разделения, полученные при решении

$$\begin{cases} A+B+C+D+E+F+J+G+K = 3p_5+3p_4+3p_3, \\ A+B+C+D+E = 3p_5+p_4+p_3, \\ F+J = p_4+p_3, \\ K+G = p_4+p_3, \\ A+B+E+J = 2p_5+p_4+p_3, \\ C+G+K = p_5+p_4+p_3, \\ D+E = p_4+p_3. \end{cases} \quad (22)$$

Приступим к решению системы уравнений (22). Подставим второе уравнение системы (22) в первое и получим $F + J + G + K = 2p_4 + 2p_3$. С учетом третьего и четвертого уравнений системы (22) имеем по два тождественных уравнения

$F + J = p_4 + p_3$ и $G + K = p_4 + p_3$,

следовательно, в этих точках должны располагаться кинематические пары либо четвертого, либо третьего классов, т.е. $J = p_4$ (p_3), а $F = p_3$ (p_4), $G = p_4$ (p_3), а $K = p_3$ (p_4).

Тогда из пятого уравнения системы (22) и получаем, что $A + B = 2p_5$, т.е. в точках A и B должны находиться кинематические пары пятого класса. Подставим в шестое уравнение системы (22) значения пар в точках $G + K$ и найдём, что в точке C должна располагаться пара p_5.

После идентификации кинематических пар в рассмотренных точках, получим два тождественных уравнения седьмое и второе $D + E = p_4 + p_3$. Таким образом, $D = p_4$ (p_3), а $E = p_3$ (p_4), соответственно.

На рис. 6, а приведена полученная безызбыточная шестизвенная группа Ассура и созданный на её основе восьмизвенный механизм без дефицита подвижности (рис.6, b).

Пожалуй, нет смысла заниматься разработкой методики создания безызбыточных групп нулевой подвижности, содержащих десять и более звеньев, т.к. такой сложности механизмы навряд ли будут востребованы, а десятизвенные механизмы, созданные на основе восьмизвенных групп Ассура в

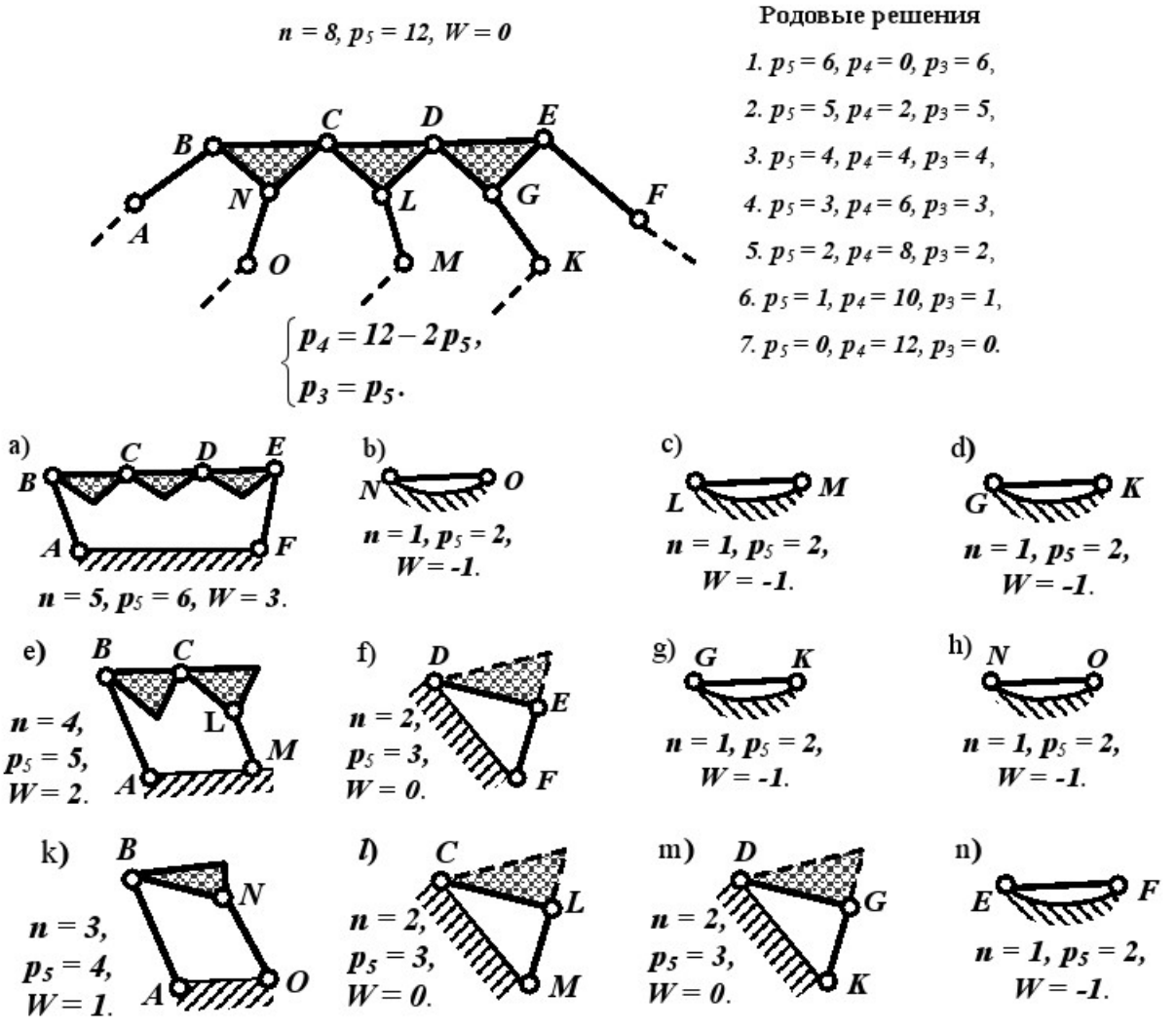


Рис. 7. Восьмизвенная группа Ассура и разделения на контуры

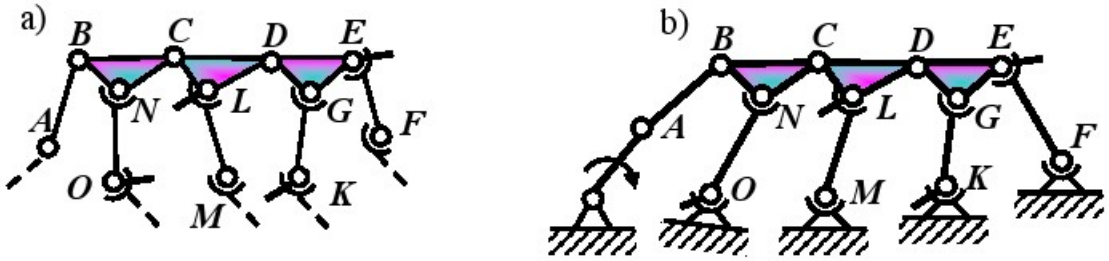


Рис. 8. Безызбыточная восьмизвенная группа Ассура (а) и десятизвенный механизм без дефицита подвижности(b)

машиностроении применяются.

Покажем получение безызбыточной нормальной восьмизвенной группы нулевой подвижности ($n = 8$, $p_5 = 12$, $W = 0$), применяя предлагаемый метод адресной замены низших кинематических пар высшими.

Представим рассматриваемую восьмизвенную группу тремя разделениями.

Первое разделение – рисунок 7 a, b, c, d, второе – рисунок 7 e, f, g, h и третье – рисунок 7 *k*, *l*, m, n. При выделении основного контура, каждое из трёх разделений содержит по три дополнительных контура. В каждом разделении на рисунке приведены: числа звеньев (n), шарниров (p_5) и подвижность (W), образующих основные и дополнительные контуры.

Родовые решения, полученные на основании уравнений, составленных по формулам (2) приведены на рис.7 рядом с восьмизвенной группой Ассура.

Для наглядности, удобства и исключения повторения начальных этапов расчета, используя обозначения, приведенные на рис.7, покажем получаемые системы уравнений (для определения чисел кинематических пар p_5, p_4 и p_3), составленные по формулам (2), а также их решения (табл. 4), включая комплексные решения.

Проанализируем полученные результаты, приведенные в табл. 4.

Все разделения имеют по два одинаковых комплексных решения, которые совпадают с третьим и четвёртым родовыми решениями (рисунок 7), и оба могут быть приняты для дальнейшего решения задачи.

В качестве примера, для проведения адресной замены пар p_5 на пары p_4 и p_3, примем решение, в котором число кинематических пар пятого класса максимально, а именно, $p_5 = 4$, $p_4 = 4$, $p_3 = 4$.

Это решение в первом разделении получается при сложении решений 1, 3, 4 и 5; во втором разделении – 6, 8, 9 и 10; в третьем – 11, 13, 14 и 15. Используем их для составления системы уравнений.

Система уравнений (23), которая будет состоять из тринадцати уравнений, двенадцать определяют независимые решения разделений, тринадцатое соответствует родовому решению восьмизвенной группы Ассура (оно записано первым).

$$\begin{cases} A+B+C+D+E+F+G+K+L+M+N+ \\ \quad +O = 4p_5+4p_4+4p_3,(1) \\ A+B+C+D+E+F = 4p_5+p_4+p_3,(2) \\ N+O = p_4+p_3,(3) \\ L+M = p_4+p_3,(4) \\ G+K = p_4+4p_3,(5) \\ A+B+C+L+M = 3p_5+p_4+p_3,(6) \\ D+E+F = p_5+p_4+p_3,(7) \\ G+K = p_4+p_3,(8) \\ N+O = p_4+p_3,(9) \\ A+B+N+O = 2p_5+p_4+p_3,(10) \\ C+L+M = p_5+p_4+p,(11) \\ D+G+K = p_5+p_4+p_3,(12) \\ E+F = p_4+p_3.(13) \end{cases} \quad (23)$$

Подставляя четвертое уравнение системы (23) в шестое получаем $A + B + C = 3p_5$, следовательно, в этих местах должны находиться кинематические пары пятого класса. Если восьмое уравнение системы (23) подставить в двенадцатое, то получим, что в точке D должна располагается пара пятого класса, т.е. $D = p_5$.

Тогда система (23) будет содержать три одинаковых тождественных уравнений (второе, седьмое и тринадцатое) $E + F = p_4 + p_3$, (четвертое, шестое и одиннадцатое) $L + M = p_4 + p_3$ и (третье, девятое и десятое) $N + O = p_4 + p_3$.

Следовательно в этих точках должны располагаться кинематические пары либо четвёртого, либо третьего классов, т.е. $E = p_4$ или (p_3), а $F = p_3$ или (p_4), $L = p_4$ или (p_3), а $M = p_3$ или (p_4), $N = p_4$ (p_3), а $O = p_3$ (p_4).

Покажем на рисунке 8, а безызбыточную восьмизвенную группу Ассура, и созданный на её основе десятизвенный механизм без избыточных связей (рис. 8, b).

Убедимся, что избыточные связи и в созданной группе, и в самом механизме отсутствуют

$q_{гр} = W + 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 - 6n = 0 + 5 \cdot 4 + 4 \cdot 4 + 3 \cdot 4 - 6 \cdot 8 = 0$,

$q_м = W + 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 - 6n = 1 + 5 \cdot 5 + 4 \cdot 4 + 3 \cdot 4 - 6 \cdot 9 = 0$.

Анализ результатов, полученных при применении предлагаемого метода адресной замены шарниров в группах Ассура на пары более высо-

ких классов, дает возможность сформулировать, по крайне мере, три важных вывода:

1. При разделении на контуры, суммарная подвижность выделяемых контуров должна быть равна подвижности исследуемой кинематической цепи, т.е. для групп Ассура $W = W_{ок} + W_{дк} = 0$, где $W_{ок}$ – подвижность основного контура, $W_{дк}$ – подвижность дополнительно контура.

2. Количество разделений и выделенных контуров зависит от сложности и числа звеньев кинематической цепи. Для групп Ассура, заканчивающихся поводками и немеющими замкнутых изменяемых контуров, число разделений может быть меньше числа замкнутых контуров k. Это объясняется тем, что при выделении основного контура в таких группах, поводки дают большее число дополнительных контуров.

3. Механизм без дефицита подвижности может быть получен в результате присоединения безызбыточной группы Ассура к механизму первого класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ассур Л.В.* Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации // Изд. АН СССР, 1952. – 589с.

2. *Решетов Л.Н.* Применение механизмов без избыточных связей. Сборник статей «Анализ и синтез механизмов» // Ин – т Машиноведения АН СССР, 1960. – С. 89 – 92.

3. *Решетов Л.Н.* Самоустанавливающиеся механизмы. Справочник – 2 - е изд., перераб. и доп. // М.: Машиностроение, 1985. – 272 с., ил. – (Библиотека конструктора).

4. *Будыка Е.Ю.* Вывод структурных формул механизмов логическим путем // Изв. ВУЗов. Машиностроение, №8, 1976, С. 71 – 73.

5.*Колчин Н.И.* Опыт построения расширенной структурной классификации механизмов и основанной на ней структурной таблицы механизмов. Труды второго всероссийского совещания по основным проблемам теории машин и механизмов. Анализ и синтез механизмов // Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, М., – С. 85 –99.

6. *Колчин Н.И.* Теория механизмов и машин/ Н.И. Колчин, Ч.Ф. Кетов // М.: Изд-во АН СССР, 1939. 226 с. 23. L. Burmester Lehbuch der Kinematik/ L. Burmester. Berlin, 1888 426 s.

7. *Дворников Л.Т.* Опыт исключения избыточных связей в шестизвенных плоских механизмах / Дворников Л.Т., Гудимова Л.Н., Большаков Н.С. // Известие ВУЗов. Машиностроение, 2007, №5, с.29 – 38.

8. *Дворников Л.Т.* Подвижность механических систем и избыточные связи в них / Дворников Л.Т., Гудимова Л.Н. //Учебное пособие, Новокузнецк, 2006, – 38с.

Автор статьи:
Гудимова
Людмила Николаевна,
канд. техн. наук, доц. каф.
теории механизмов и машин и основ конструирования (Сибирский гос. индустриальный университет).
E – mail: lyu–qudiova@yandex.ru

УДК 621.791.75:[621.791.013]

С.О. Гордин, А.Н. Смирнов , В.Л. Князьков

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОРАЗМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА

Сварка электродами с покрытием, в настоящее время является ведущим технологическим процессом при монтаже и ремонте оборудования промышленных предприятий. Повышенная повреждаемость сварных соединений горнодобывающего и подъемно-транспортного оборудования в условиях эксплуатации при низких температурах может быть снижена за счет повышения комплекса механических свойств, металла швов сварных соединений.

Известно, что повышение прочности и пластичности низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей возможно, либо за счет измельчения исходной зернистости до № 10-12, либо за счет повышения чистоты металла [1]. Измельчение структуры, может быть достигнуто при охлаждении из расплава, со скоростью, превышающей 650°С/с [2], что в реальных условиях сварки технически не возможно.

Развитие технологий изготовления ультрамел-