

УДК 621.01

## Направленный синтез оптимальных структур плоских механических систем с совмещенными шарнирами (механизмы, фермы, группы Ассура, роботы). Часть 1

**В.И. Пожбелко**

*Представлены структурные формулы и четыре базовые теоремы единой структурной математической модели, на основе найденных всех целочисленных решений которой составлены универсальные структурные таблицы, содержащие полный перечень расчетных стандартных кодов оптимальных структур с применением как простых, так и совмещенных шарниров различной кратности. На основе стандартных кодов из указанных таблиц выполнен направленный структурный синтез одно-, двух- и трехподвижных механизмов; стержневых ферм; особых групп Ассура; одно- и многоруких роботов и манипуляторов. Составлен атлас из четырех неизоморфных 6-звенных кинематических цепей и установлено существование 14 структурных схем 6-звенных одноподвижных рычажных механизмов с совмещенными двойными шарнирами.*

**Ключевые слова:** структурный синтез, структурная математическая модель, совмещенные многократные шарниры, механизмы, фермы, группы Ассура, роботы.

## Directed structural synthesis of optimal planar mechanical systems with complex pin-joints (mechanisms, pin frameworks, Assur groups, robots). Part 1

**V.I. Pozhbelko**

*The paper presents the structural formulas and the four basic mathematical theorems of a single structural model which provides a basis for all having been found integral solutions to compose the universal structural tables containing a complete list of standard calculation codes for optimal structures with the use of both simple and combined joints with different degrees. Based on the standard codes from these tables the directed structural synthesis of one, two and three degrees-of-freedom mechanisms, rod trusses, special Assur groups, one and many armed robots and manipulators has been performed. The atlas of four six-membered nonisomorphic kinematic chains has been composed and the existence of 14 structural diagrams of 6-membered one degree-of-freedom linkages with combined double hinge has been found.*

**Keywords:** structural synthesis, structural mathematical model, complex pin-joints, mechanisms, pin frameworks, assur groups, robots.



**ПОЖБЕЛКО**

**Владимир Иванович**  
заслуженный работник  
высшей школы РФ,  
доктор технических наук,  
профессор  
кафедры  
«Теоретическая механика  
и основы проектирования  
машин»  
(Южно-Уральский  
государственный  
университет)  
e-mail: vipox@inbox.ru

Структурный синтез — начальный и наиболее ответственный этап создания работоспособных механизмов и машин (без вредных избыточных связей и лишних подвижностей) и представляет собой очень сложную многовариантную задачу в механике, как «искусстве построения машин» (по сравнению со структурным анализом уже известных конструкций) [1–16].

Синтез оптимальных структур (без контурных избыточных связей и неуправляемых подвижностей) заключается в проектировании структурных схем статически определимых механических систем, которые в эксплуатации исключают возможность возникновения дополнительных нагрузок и повышенных напряжений из-за погрешностей изготовления и сборки, а также температурных деформаций звеньев, что повышает надежность работы и коэффициент полезного действия машины, снижает потери на трение и износ подвижных узлов, позволяет снизить точность изготовления, облегчает сборку и в несколько раз повышает срок службы механической системы [2]. Таким образом, возникает проблемная задача структурного синтеза именно оптимальных (статически определимых) структур (например, в виде самоустанавливающихся механизмов [1–2]).

**Постановка и формализация задачи синтеза оптимальных структур механических систем.** Применяемые в различных областях техники и изучаемые в теории механизмов и механике машин разнообразные механические системы (механизмы, фермы, структурные группы звеньев, роботы, манипуляторы и их приводы) представляют собой системы взаимодействующих (взаимосвязанных) между собой звеньев посредством различных подвижных соединений (как контактных или бесконтактных связей) [1].

Основными компонентами строения рассматриваемых шарнирно-рычажных систем являются многопарные звенья и их связи в виде совмещенных и простых шарниров, количественные соотношения между которыми являются основной структурной характеристикой многозвенных механических систем. Входящие в структуру разнообразных шарнир-

но-рычажных механических систем звенья могут быть односвязными (например, однопарными, т. е. одношарнирными) и/или многосвязными (например, простыми двухшарнирными или более сложными — трехшарнирными, четырехшарнирными и т. д.), а их подвижные соединения между собой конструктивно могут быть выполнены в виде простых однократных шарниров (simple pin-joints [3]) или совмещенных на одной оси многократных шарниров (complex pin-joints) [14–16].

В трудах проф. Э.Е. Пейсаха по автоматизированному синтезу структур механических систем без совмещенных шарниров [4–7] представлены итоговые результаты полученного им компьютерного полного решения задачи о возможном многообразии таких систем и впервые составлены полные электронные каталоги [5], [6] всех структурных схем от 4-х до 16-звенных плоских механизмов, групп Ассура, ферм и замкнутых кинематических цепей без совмещенных шарниров.

Анализ научно-технической литературы показывает, что известные алгоритмы, программы и электронные каталоги плоских рычажных механизмов [3–9] воспроизводят их схемы только с простыми (однократными) шарнирами и поэтому не охватывают широко и эффективно применяемые в машиностроении [1] разнообразные рычажные механические системы с совмещенными многократными шарнирами, в которых за счет более простой конструкции (одна общая ось, замена сложных многопарных звеньев на простые двухшарнирные звенья, меньшие габариты и масса) удешевляется изготовление; можно получить очень компактные механизмы и расширить функциональные возможности рычажных механизмов (без применения дополнительных зубчатых передач); а также упростить их геометрические схемы и построения.

Для формализации описания строения и синтеза механических систем оптимальной структуры с учетом применения в них совмещенных шарниров используем полученные автором в работах [10–16] зависимости структурной математической модели механических систем оптимальной структуры (VIP-модель),

представляющей собой совокупность (систему) алгебраических структурных уравнений (1–4) на основе следующих *конечных* арифметических рядов проектных параметров:

$$\begin{aligned} \tilde{n} &= n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + \dots + n_{Y+2} = \\ &= W + (h-1)Y + h; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 2p &= n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + \dots + (Y+2)n_{Y+2} + v = \\ &= 2(W + hY + h); \end{aligned} \quad (2)$$

$$v = v_2 + 2v_3 + 3v_4 + 4v_5 + \dots + Yv_{Y+1}; \quad (3)$$

$$W = h(\tilde{n} - 1) - (h-1)p. \quad (4)$$

Для синтеза оптимальных структур заданного уровня сложности  $Y$  поиск всех целочисленных решений VIP-модели должен производиться *внутри* пространства  $(i - j - K)$  проектных параметров, ограниченного следующими неравенствами [16]:

$$v \leq 2Y; \quad i \leq Y + 2; \quad j \leq Y + 1, \quad (5)$$

содержащими единый цифровой структурный оператор  $Y$ :

$$Y = p - \tilde{n}; \quad p = Y + \tilde{n}; \quad K = Y + 1. \quad (6)$$

В формулах (1) — (6)  $Y$  — задаваемый уровень сложности синтезируемой механической системы [10], как основная количественная характеристика ее сложности, равная разности между общим числом подвижных соединений ( $p$ ) и общим числом образующих их звеньев ( $\tilde{n}$ ); (согласно (1) — (6) уровень сложности  $Y$  полностью задает число и сложность всех структурных элементов системы, а также число  $K$  — образуемых ее звеньями взаимно независимых замкнутых контуров;  $W$  — подвижность механической системы относительно одного из ее звеньев (в работе [15] дана расширенная форма записи новой универсальной формулы  $W(3)$  — для структурного анализа и синтеза любых систем с многоподвижными соединениями звеньев, гибкими и динамическими связями [2, 10, 11, 13]);  $h$  — число степеней свободы звеньев в составе данной механической системы (например,  $h = 2$  — плоские клиновые механизмы;  $h = 3$  — плоские шарнирно-рычажные и пространственные сферические механизмы и фермы;  $h = 6$  — пространственные шарнирно-рычажные механизмы и фермы);  $n_1, n_2, \dots, n_i$  — соответственно число однопарных (одношарнирных), двухпарных (двухшарнирных), и т. д.,

$i$ -парных звеньев в составе механической системы (с учетом опорного основания — стойки);  $i$  — число отверстий под оси шарниров на данном звене кинематической цепи;  $v$  — приведенное число совмещенных многократных шарниров в составе механической системы ( $v_2$  — двойных,  $v_3$  — тройных и т. д.  $j$ -кратных);  $j \geq 2$  — кратность шарниров.

Универсальность VIP-модели (1)–(4) заключается в ее применимости для описания строения, синтеза и анализа механических систем как с совмещенными шарнирами любой кратности  $j$  (это общий случай  $v \neq 0$ ), так и вообще без них (частный случай  $v = 0$ ).

Таким образом, предлагаемая формализация решаемой в данной работе задачи синтеза оптимальных структур механических систем (содержащих в общем случае как простые, так и совмещенные шарниры) заключается в установлении закономерностей строения безызбыточных систем (в виде теорем) и использовании структурной математической VIP-модели (1)–(4) для поиска всех целочисленных решений с целью определения состава искомых оптимальных структур (в виде конкретных наборов  $n_i, v_j$ ) и построения разнообразных механических систем различного уровня сложности  $Y = -1; 0; 1; 2, \dots$  с заданным набором совмещенных шарниров.

Рассматриваемые в данной работе плоские статически определимые механические системы могут содержать  $v \neq 0$  (или вообще не содержать  $v = 0$ ) различные совмещенные шарниры и состоять из звеньев с тремя степенями свободы ( $h = 3$ ), которые посредством одноподвижных соединений ( $H = 1$ ) образуют замкнутые, незамкнутые или разомкнутые кинематические цепи соответственно одноподвижных ( $W = 1$ ) или многоподвижных ( $W > 1$ ) механизмов; ферм и групп Ассур ( $W = 0$ ) или одноруких и многоруких роботов со схватами ( $W > 1$ ).

**Теоремы о закономерностях строения и универсальные таблицы кодов статически определенных механических систем.** Математические выражения рассматриваемых четырех теорем следуют из совместного решения структурных зависимостей (1) — (6) и устанавливают необходимые соотношения структурных парамет-

ров шарнирно-рычажных механических систем разного уровня сложности, обеспечивающие при их синтезе требуемую оптимальную структуру (без вредных контурных избыточных связей и без неуправляемых лишних подвижностей) с учетом применения в них совмещенных шарниров различной кратности.

**Теорема 1.** Кинематические цепи без избыточных связей должны содержать не более  $K_{\max}$  взаимно независимых замкнутых контуров, образуемых  $\tilde{n}$  звеньями цепи:

$$K_{\max} = \frac{1}{h} \left\{ \frac{1}{2} [n_1 + 2n_2 + 3n_3 + \dots + (Y+2)n_{Y+2} + v] - W \right\}; \tilde{n} = W + (h-1)Y + h. \quad (I)$$

**Следствие.** Плоские механические системы ( $h=3$ ) оптимальной структуры с *нечетным*  $W = 1; 3; 5; \dots$  должны содержать *четное* число звеньев  $\tilde{n} = 4; 6; 8; \dots$ , а системы ( $h=3$ ) с *четным*  $W = 0; 2; 4; \dots$  должны, наоборот, содержать *нечетное* число звеньев  $\tilde{n} = 3; 5; 7; \dots$  и т. д. (включая стойку).

**Теорема 2.** Кинематические цепи с изменяемыми замкнутыми контурами без избыточных связей должны содержать не менее  $n_{2\min}$  двухпарных (двухшарнирных) звеньев, рассчитываемых по формуле

$$n_{2\min} = [3 + W + v + (h-3)(Y+1)] + [n_4 + 2n_5 + 3n_6 + \dots + (Y-1)n_{Y+2}] \geq (h + W + v). \quad (II)$$

**Следствие.** Простейшие ( $W=1, K=1$ ) безыбыточные плоские механизмы ( $h=3, v=0$ ) должны содержать  $\tilde{n} = n_2 = h + W = 3 + 1 = 4$  звена, а пространственные механизмы ( $h=6$ ) —  $\tilde{n} = n_2 = h + W = 6 + 1 = 7$  звеньев.

**Теорема 3.** В замкнутых статически определимых кинематических цепях разного уровня сложности ( $Y \geq 1$ ) число  $n_i$  наиболее сложных многопарных (многошарнирных) звеньев ( $3 \leq i \leq Y+2$ ) ограничено пределами, зависящими от приведенного числа  $v$  применяемых в цепи совмещенных шарниров:

$$0 \leq n_i \leq \frac{2Y-v}{i-2} \Rightarrow 0 \leq n_{Y+2} \leq \left( 2 - \frac{v}{Y} \right) \quad (III)$$

и согласно (III) должно быть не более одного в структуре цепей с совмещенными шарнирами ( $v \neq 0$ ), и не более двух в структуре цепей без них ( $v = 0$ ); а приведенное число  $v$  совмещенных шарниров кратностью  $2 \leq j \leq Y+1$  из условия  $n_i \geq 0$  (III), а также число  $v_{Y+1}$  совмещенных шарниров наибольшей кратности ( $j_{\max} = Y+1 = K$ ) должно быть ограничено пределами

$$0 \leq v = [v_2 + 2v_3 + 3v_4 + \dots + Yv_{Y+1}] \leq 2Y; \quad v_{Y+1} \leq 2. \quad (7)$$

**Следствие.** При структурном синтезе безыбыточных  $\tilde{n}$ -звенных кинематических цепей число сложных многопарных (многошарнирных) звеньев ( $n_i \leq \tilde{n}; 3 \leq i \leq Y+2$ ) должно быть ограничено в следующей прямой зависимости от задаваемого уровня сложности цепи ( $Y \geq 1$ ):

$$0 \leq n_3 \leq 2Y; 0 \leq n_4 \leq Y; 0 \leq n_{i \geq 5} \leq \frac{2Y-v}{i-2} < Y; \quad 0 \leq (n_{Y+2})_{v \neq 0} = 0; 1; 0 \leq (n_{Y+2})_{v=0} = 0; 1; 2. \quad (8)$$

**Теорема 4.** В структурах статически определимых шарнирно-рычажных механических систем ( $h=3$ ) должно выполняться следующее уравнение количественного баланса между разными многопарными (многошарнирными) звеньями и совмещенными шарнирами:

$$(2n_1 + n_2) - [n_4 + 2n_5 + \dots + (Y-1)n_{Y+2}] = (v_2 + 2v_3 + \dots + Yv_{Y+1}) + W + 3. \quad (IV)$$

**Следствие.** Уравнение правильности структуры с реализацией баланса (IV) для плоских шарнирно-рычажных механических систем ( $h=3$ ) имеет вид *определителя D целевой функции синтеза оптимальных структур*:

$$D = (2n_1 + n_2) - [n_4 + 2n_5 + 3n_6 + \dots + (Y-1)n_{Y+2}] - (v + W + 3) = 0 \quad (9)$$

*ненулевая* величина которого показывает при диагностике структуры данной системы — количество возникающих в замкнутых контурах кинематической цепи избыточных связей (слу-

чай  $D < 0$ ) или количество лишних неуправляемых степеней свободы (случай  $D > 0$ ).

Аналитические зависимости теорем (I)–(IV) можно представить в более короткой форме записи слагаемых *конечных* арифметических рядов:

$$\begin{aligned}
 v &= [v_2 + 2v_3 + 3v_4 + \dots + Yv_{Y+1}] = \sum_{j=2}^{Y+1} (j-1)v_j; \\
 [n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_{Y+2}] &= \sum_{i=1}^{Y+2} n_i; \\
 [n_1 + 2n_2 + 3n_3 + \dots + (Y+2)n_{Y+2} + v] &= \\
 &= \sum_{i=1}^{Y+2} (in_i) + \sum_{j=2}^{Y+1} (j-1)v_j; \\
 [n_4 + 2n_5 + 3n_6 + \dots + (Y-1)n_{Y+2}] &= \\
 &= \sum_{i=4}^{Y+2} (i-3)n_i. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Совокупность аналитических зависимостей (I)–(IV) дополняет структурные уравнения (1)–(4) математической модели для синтеза оптимальных структур разнообразных многозвенных механических систем разного уровня сложности  $Y$ , все целочисленные решения которой определяют коды их правильного строения с искомыми наборами проектных параметров вида

$$\frac{n_1 n_2 n_3 n_4 \dots n_{Y+2}}{v} = \frac{n_1 n_2 n_3 n_4 \dots n_{Y+2}}{v_2 v_3 v_4 v_5 \dots v_{Y+1}}. \quad (11)$$

Представленный в систематизированных по горизонтали ( $v$ ) и вертикали ( $n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ ) расчетных структурных таблицах (табл. 1–5) полный перечень возможных стандартных кодов строения и наборов совмещенных шарниров отражает весь массив полученных по компьютерным программам целочисленных решений системы уравнений (I)–(IV) с обязательным учетом ограничительных неравенств (7) и (8). Данный перечень охватывает все возможное многообразие реализующих целевую функцию  $D = 0$  (9)  $\tilde{n}$ -звенных кинематических цепей ( $\tilde{n} = 4 - 14$ ) одноподвижных ( $W = 1$ ), двухподвижных ( $W = 2$ ) и трехподвижных ( $W = 3$ ) механизмов; а также шарнирных стержневых ферм ( $W = 0$ ) оптимальной структуры.

*Примечание.* Все без исключения разряды в каталогах проф. Э.Е. Пейсаха [4–6] (расчитанные для частного случая цепей только с простыми шарнирами  $v = 0$ ) совпадают с расчетными цифрами стандартных кодов в универсальной структурной табл. 1 для  $v = 0$  (см. п. 2) (что подтверждает их абсолютную полноту и достоверность); а общие зависимости (II) и (III) в этом частном случае (т. е. для механизмов без совмещенных шарниров) — вырождаются в известные [2, с. 106] ограниченные соотношения теорем Грюблера.

**Структурный синтез систем оптимальной структуры с совмещенными шарнирами.** Направленный структурный синтез статически определимых механических систем разного назначения (механизмы, фермы, группы Ассур, роботы и манипуляторы) заключается в создании безызбыточных систем по кодам их правильного строения, полный набор которых (для обоих случаев —  $v = 0$  и  $v \neq 0$ , где  $v \leq 2Y$ ) представлен в универсальных структурных таблицах (см. табл. 1–5) и удовлетворяет всем теоремам 1–4 и следствиям из этих теорем (I)–(IV).

Данный табличный метод структурного синтеза является более полным и результативным по сравнению со «слепым» поиском одиночных структурных решений, так как табл. 1–5 наглядно содержат все возможные варианты состава оптимальных структур (в виде наборов  $n_i - v_j$ ) для их практической реализации в технике. Конкретный выбор одного из указанного в табл. 1–5 множества стандартных кодов зависит от задаваемой проектантом совокупности входных параметров структурного синтеза — допустимого уровня сложности проектируемой системы  $Y$  и общего числа ее звеньев  $\tilde{n}$  при требуемой ее подвижности  $W$ , а также максимально допустимой сложности используемых звеньев ( $i_{\max} = Y + 2$ ) и предельной кратности совмещенных шарниров ( $j_{\max} = Y + 1$ ), применяемых для сборки этих звеньев в кинематической цепи проектируемой механической системы.

Представленные в структурных табл. 1–5 стандартные коды правильного строения и стандартные наборы совмещенных шарниров могут быть использованы для направленного



Таблица 2

(приложение к таблице 1)

**Полный состав стандартных наборов совмещенных шарниров замкнутых кинематических цепей разного уровня сложности**

$v = v_2 + 2v_3 + 3v_4 + 4v_5 + \dots + Y v_{Y+1} \leq 2Y; j_{\max} = Y+1=K; v_K \leq 2$																							
Y	Y=0, K=1			Y=1, K=2 (v <sub>max</sub> = 2)			Y = 2, K = 3 (v <sub>max</sub> = 4; j <sub>max</sub> = 3)																
v				v = 0	v = 1	v = 2	v = 0	v = 1	v = 2	v = 3	v = 4												
v <sub>2</sub>	—			0	1	2	0	1	0	2	1	3	0	2	4								
v <sub>3</sub>	—			—			0	0	1	0	1	0	2	1	0								
Y	Y = 3, K = 4 (v <sub>max</sub> = 6; j <sub>max</sub> = 4)																						
v	0	1	v = 2		v = 3			v = 4			v = 5			v = 6									
v <sub>2</sub>	0	1	0	2	0	1	3	0	1	2	4	0	1	2	3	5	0	0	1	2	3	4	6
v <sub>3</sub>	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	0	1	2	0	1	0	0	3	1	2	0	1	0
v <sub>4</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0
Y	Y = 4, K = 5 (v <sub>max</sub> = 8; j <sub>max</sub> = 5)																						
v	v = 0		v = 1		v = 2			v = 3			v = 4			v = 5									
v <sub>2</sub>	0	1	0	2	0	1	3	0	0	1	2	4	0	1	1	2	3	5					
v <sub>3</sub>	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	1	0	1	2	0	0	1	0					
v <sub>4</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0					
v <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0					
Y	Y = 4, K = 5 (продолжение)																						
v	v = 6							v = 7															
v <sub>2</sub>	0	0	0	1	2	2	3	4	6	0	0	1	1	1	2	3	3	4	5	7			
v <sub>3</sub>	0	1	3	1	0	2	0	1	0	0	2	0	1	3	1	0	2	0	1	0			
v <sub>4</sub>	2	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0			
v <sub>5</sub>	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0			
Y	Y = 4, K = 5 (продолжение)																						
v	v = 8																						
v <sub>2</sub>	0	0	0	0	1	1	2	2	2	3	4	4	5	6	8								
v <sub>3</sub>	1	2	4	0	0	2	1	0	3	1	0	2	0	1	0								
v <sub>4</sub>	2	0	0	0	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0								
v <sub>5</sub>	0	1	0	2	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0								

*Примечание.* Y — уровень сложности механической системы; K — число образуемых звеньями кинематической цепи взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров; v — приведенное число совмещенных шарниров; j — кратность совмещенных шарниров; v<sub>2</sub>–v<sub>5</sub> — соответственно число совмещенных двойных (2-кратных), тройных (3-кратных), 4-кратных и 5-кратных шарниров.

Универсальная структурная таблица расчетных стандартных кодов правильного строения двухподвижных механизмов

$W = 2, h = 3, H = 1$																								
$Y = 0$ ( $\tilde{n}=5$ )	$Y = 1$ ( $\tilde{n}=7$ )			$Y = 2$ (9 кодов строения $\tilde{n}=9$ )																				
$v$	0	0	1	2	0	0	0	1	1	2	2	3	4											
$n_2$	5	5	6	7	5	6	7	6	7	7	8	8	9											
$n_3$	—	2	1	0	4	2	0	3	1	2	0	1	0											
$n_4$	—	—	—	—	0	1	2	0	1	0	1	0	0											
$Y = 3$ (23 кода строения $\tilde{n} = 11$ )																								
$v$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	6	
$n_2$	5	6	7	7	8	8	9	6	7	8	8	9	7	8	9	9	8	9	10	9	10	10	11	
$n_3$	6	4	2	3	0	1	0	5	3	1	2	0	4	2	0	1	3	1	0	2	0	1	0	
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	0	1	2	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0	
$n_5$	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
$W = 2, h = 3, H = 1$																								
$Y = 4$ (53 кода строения $\tilde{n} = 13$ )																								
$v$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$n_2$	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	9	10	10	10	11	6	7	8	8	9	9	9	10	10
$n_3$	8	6	4	5	2	3	4	0	1	2	2	0	0	1	0	7	5	3	4	1	2	3	0	1
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	4	2	0	1	1	2	0	0	0	1	2	0	3	1	0	2	0
$n_5$	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2
$n_6$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$Y = 4$ (продолжение)																								
$v$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	6
$n_2$	7	8	9	9	10	10	10	11	11	8	9	10	10	11	11	9	10	11	11	12	10	11	12	13
$n_3$	6	4	2	3	0	1	2	0	0	5	3	1	2	0	1	4	2	0	1	0	3	1	0	2
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0
$n_5$	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$n_6$	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Примечание.  $Y$  — уровень сложности плоского двухподвижного механизма ( $W = 2$ );  $v$  — приведенное число совмещенных шарниров (см. табл. 2);  $\tilde{n}$  — общее число звеньев механизма (включая стойку);  $n_2-n_6$  — соответственно число 2-шарнирных, 3-шарнирных, 4-шарнирных, 5-шарнирных, 6-шарнирных звеньев.

Таблица 4

Универсальная структурная таблица расчетных стандартных кодов правильного строения трехподвижных механизмов

$W = 3, h = 3, H = 1$																								
$Y = 0$ ( $\tilde{n} = 6$ )	$Y = 1$ ( $\tilde{n} = 8$ )			$Y = 2$ (9 кодов строения $\tilde{n} = 10$ )																				
$v$	0	0	1	2	0	0	0	1	1	2	2	3	4											
$n_2$	6	6	7	8	6	7	8	7	8	8	9	9	10											
$n_3$	—	2	1	0	4	2	0	3	1	2	0	1	0											
$n_4$	—	—	—	—	0	1	2	0	1	0	1	0	0											
$Y = 3$ (23 кода строения $\tilde{n} = 12$ )																								
$v$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	6	
$n_2$	6	7	8	8	9	9	10	7	8	9	9	10	8	9	10	10	9	10	11	10	11	11	12	
$n_3$	6	4	2	3	0	1	0	5	3	1	2	0	4	2	0	1	3	1	0	2	0	1	0	
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	0	1	2	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0	
$n_5$	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
$W = 3, h = 3, H = 1$																								
$Y = 4$ (53 кода строения $\tilde{n} = 14$ )																								
$v$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$n_2$	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10	11	11	11	12	7	8	9	9	10	10	10	11	11	12
$n_3$	8	6	4	5	2	3	4	0	1	2	2	0	0	1	0	7	5	3	4	1	2	3	0	1
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	4	2	0	1	1	2	0	0	0	1	2	0	3	1	0	2	0
$n_5$	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2
$n_6$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$Y = 4$ (продолжение)																								
$v$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	6
$n_2$	8	9	10	10	11	11	11	12	12	9	10	11	11	12	12	10	11	12	12	13	11	12	13	14
$n_3$	6	4	2	3	0	1	2	0	0	5	3	1	2	0	1	4	2	0	1	0	3	1	0	2
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0
$n_5$	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$n_6$	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Примечание.  $Y$  — уровень сложности плоского трехподвижного механизма ( $W = 3$ );  $v$  — приведенное число совмещенных шарниров (см. табл. 2);  $\tilde{n}$  — общее число звеньев механизма (включая стойку);  $n_2$ – $n_6$  соответственно — число 2-шарнирных, 3-шарнирных, 4-шарнирных, 5-шарнирных, 6-шарнирных звеньев.

Универсальная структурная таблица расчетных стандартных кодов правильного строения статически определимых ферм

$W = 0, h = 3, H = 1$																								
$Y = 0$	$Y = 1$			$Y = 2$																				
$(\tilde{n}=3)$	$(\tilde{n}=5)$			$(9 \text{ кодов строения } \tilde{n}=7)$																				
$v$	0	0	1	2	0	0	0	1	1	2	2	3	4											
$n_2$	3	3	4	5	3	4	5	4	5	5	6	6	7											
$n_3$	—	2	1	0	4	2	0	3	1	2	0	1	0											
$n_4$	—	—	—	—	0	1	2	0	1	0	1	0	0											
$Y = 3 (23 \text{ кода строения } \tilde{n} = 9)$																								
$v$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	6	
$n_2$	3	4	5	5	6	6	7	4	5	6	6	7	5	6	7	7	6	7	8	7	8	8	9	
$n_3$	6	4	2	3	0	1	0	5	3	1	2	0	4	2	0	1	3	1	0	2	0	1	0	
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	0	1	2	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0	
$n_5$	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
$W = 0, h = 3, H = 1$																								
$Y = 4 (53 \text{ кода строения } \tilde{n} = 11)$																								
$v$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$n_2$	3	4	5	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	9	4	5	6	6	7	7	7	8	8
$n_3$	8	6	4	5	2	3	4	0	1	2	2	0	0	1	0	7	5	3	4	1	2	3	0	1
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	4	2	0	1	1	2	0	0	0	1	2	0	3	1	0	2	0
$n_5$	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2
$n_6$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$Y = 4 (\text{продолжение})$																								
$v$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	6
$n_2$	5	6	7	7	8	8	8	9	9	6	7	8	8	9	9	7	8	9	9	10	8	9	10	11
$n_3$	6	4	2	3	0	1	2	0	0	5	3	1	2	0	1	4	2	0	1	0	3	1	0	2
$n_4$	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0
$n_5$	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$n_6$	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Примечание.  $Y$  — уровень сложности плоской стержневой фермы ( $W = 0$ );  $v$  — приведенное число совмещенных шарниров (см. табл. 2);  $\tilde{n}$  — общее число шарнирных звеньев фермы (включая стойку);  $n_2$ – $n_6$  соответственно — число 2-шарнирных, 3-шарнирных, 4-шарнирных, 5-шарнирных, 6-шарнирных звеньев.

структурного синтеза многозвенных механических систем с целевой функцией  $D=0(9)$  (как содержащих совмещенные шарниры —  $v \neq 0$ , так и без них —  $v=0$ ) при следующих различных вариантах задания исходных данных (входные параметры синтеза):

синтез систем заданного уровня сложности ( $Y=0, 1; 2; 3; 4$ );

синтез механических систем заданной подвижности ( $W=0; 1; 2; 3$ );

синтез систем с заданным общим числом взаимно независимых замкнутых контуров, образуемых звеньями кинематической цепи ( $K=Y+1=1; 2; 3; 4; 5$ );

синтез систем с заданным общим числом звеньев кинематической цепи ( $\tilde{n}=3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14$ );

синтез систем с заданной максимально допустимой сложностью применяемых звеньев — по наибольшему числу шарниров на одном звене ( $i_{\max}=Y+2=2; 3; 4; 5; 6$ );

синтез систем с заданной максимальной кратностью совмещенных шарниров ( $j=Y+1=2; 3; 4; 5$ );

синтез систем с заданным числом совмещенных шарниров определенной кратности, например  $j=2$  ( $v_2=1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8$ );

синтез систем с заданным набором совмещенных шарниров разной кратности для сборки всех звеньев цепи ( $v_2, v_3, v_4, v_5$ );

синтез механических систем с заданным числом звеньев с определенным числом шарниров в составе синтезируемой кинематической цепи (например, двухшарнирных в диапазоне  $n_2=3..14$ ; 3-шарнирных в диапазоне  $n_3=0..8$ ; 4-шарнирных в диапазоне  $n_4=0..4$ ; 5-шарнирных:  $n_5=0, n_5=1, n_5=2$ ; 6-шарнирных:  $n_6=0, n_6=1, n_6=2$ ).

**Реализация целевой функции синтеза оптимальных структур  $D=0(9)$ .** Далее представлены алгоритмы и некоторые результаты направленного структурного синтеза (по теоремам (I)–(IV) и универсальным структурным таблицам 1–5) разнообразных статически определенных плоских механических систем с совмещенными шарнирами — в виде замкнутых, разомкнутых и незамкнутых кинематических цепей одно- и многоподвижных механизмов, шарнирных стержневых ферм, групп Ассур,

а также одноруких и многоруких роботов и манипуляторов.

На рисунке 1 приведен составленный по кодам из табл. 1 для  $\tilde{n}=6$  ( $v_2=0, v_2=1, v_2=2$ ) атлас 6-звенных кинематических цепей, показывающий, что их число за счет применения двойных шарниров увеличивается с двух (6Ц1 и 6Ц2 — известных, как цепь Стефенсона и цепь Уатта) до четырех (добавляются цепи 6Ц3 — с одним двойным шарниром и 6Ц4 — с двумя двойными шарнирами). Применяемая на рис. 1 маркировка звеньев цепи и соответствующих им вершин графа цифрами  $i$  ( $i=2$  — для двухшарнирного звена,  $i=3$  — для трехшарнирного и т. д.) позволяет выделить на граф-схеме совмещенные шарниры (черным кружком) и установить неизоморфность этих цепей.

На рисунке 2 представлен составленный из цепей 6Ц3 и 6Ц4 (при различном выборе в них стойки и входного звена) атлас 6-звенных механизмов, устанавливающий существование 14 структурных схем с совмещенными одним или двумя шарнирами. Наряду с 11 обычными сборками звеньев (6М1 — 1, 6М2 — 1, 6М3 — 1, 6М4 — 1, 6М5 — 1, 6М6 — 1, 6М7 — 1, 6М8 — 1, 6М9 — 1, 6М10 — 2, 6М11 — 2) в состав этого атласа включены еще 3 (6М12 — 1, 6М13 — 1, 6М14 — 1) парадоксальных кривошипных сборки параллелограммного рычажного механизма В.И. Пожбелко (Patent RU 2246056) [14, 17], в котором одно из формально подвижных при монтаже звеньев при его движении остается кинематически неподвижным (относительно стойки) без приложения к нему тормозного

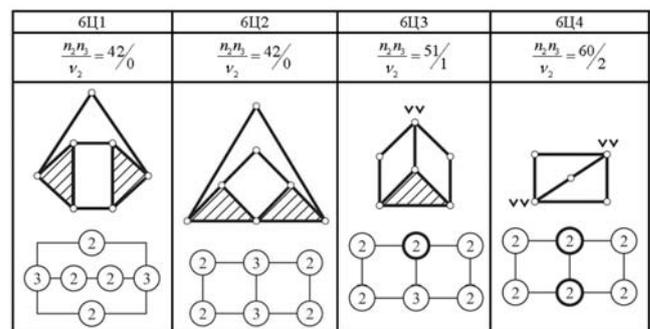


Рис. 1. Атлас 6-звенных неизоморфных кинематических цепей (с простыми и совмещенными шарнирами) и маркированные граф-схемы их строения

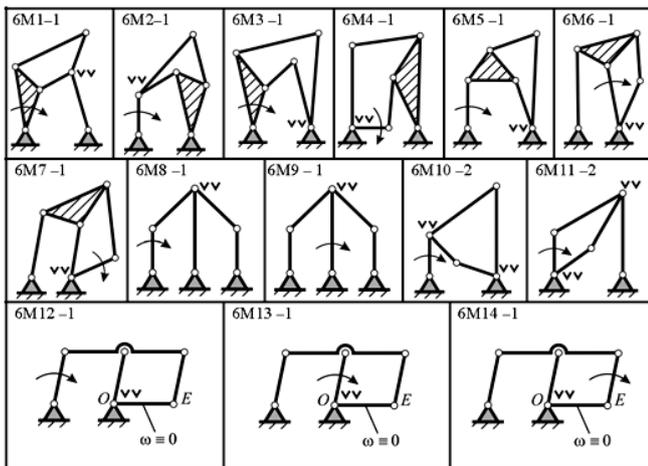


Рис. 2. Атлас структурных схем 6-звенных плоских одноподвижных шарнирных механизмов с совмещенными шарнирами

Уровень сложности	Состав цепи	Структурная схема
$Y=1 (K=2, \tilde{n}=6)$	$n_2=5$ $n_3=1$ $v=v_2=1$	
$Y=2 (K=3, \tilde{n}=8)$	a) $n_2=6$ $n_3=2$ $v=v_2=2$ б) $n_2=8$ $v=v_2=4$	
$Y=3 (K=4, \tilde{n}=10)$	$n_2=8$ $n_3=1$ $n_4=1$ $v=v_2=3$	
$Y=4 (K=5, \tilde{n}=12)$	$n_2=10$ $n_3=1$ $n_4=1$ $v_2=1, v_3=2$ $v=v_2+2v_3=5$	

Рис. 3. Структурный синтез одноподвижных механизмов с совмещенными шарнирами (по стандартным кодам строения из базовых табл. 1 и 2)

Уровень сложности	Состав цепи	Структурная схема
$W=2 (Y=1, \tilde{n}=7)$	$n_2=7$ $v_2=1$ $v=v_2=1$	
$W=2 (Y=2, \tilde{n}=9)$	$n_2=8$ $n_3=1$ $v=v_2=3$	
$W=2 (Y=3, \tilde{n}=11)$	$n_2=8$ $n_3=2$ $n_4=1$ $v=v_2=2$	
$W=3 (Y=3, \tilde{n}=12)$	$n_2=8$ $n_3=3$ $n_4=1$ $v=v_2=1$	

Рис. 4. Структурный синтез многоподвижных механизмов с совмещенными шарнирами (по стандартным кодам строения из табл. 3 и 4)

момента (т. е. возникает так называемый своеобразный кинематический тормоз [17]).

Таким образом, за счет применения совмещенных шарниров диапазон 6-звенных шарнирных механизмов существенно увеличивается — с ранее установленного существования только 9 схем с простыми шарнирами [6] до  $9 + 14 = 23$  схем неизоморфных одноподвижных механизмов первого уровня сложности ( $Y=1$ ) с применением для сборки их звеньев одного или двух совмещенных двойных шарниров (что подтверждает предварительный вывод [16] о возможности расширения в несколько раз этого диапазона).

На рисунках 3–5 представлены алгоритм и некоторые результаты синтеза оптимальных структур одно-, двух- и трехподвижных механизмов, а также ферм (например, 7-звенных двухпролетных мостов по коду 430/1 на рис. 5, в общее число  $\tilde{n}$  звеньев которых входит и опор-

Уровень сложности	→	Состав цепи	→	Структурная схема
Код строения				
$Y=1 (K=2, \tilde{n}=5)$				
$\frac{n_2 n_3}{v_2} = 4/1$				
$Y=1 (K=2, \tilde{n}=5)$				
$\frac{n_2 n_3}{v_2} = 5/2$				
$Y=2 (K=3, \tilde{n}=7)$		a) $n_2=4, n_3=3, n_4=0$ $v_2=1, v=v_2=1$		
a) $\frac{n_2 n_3 n_4}{v_2} = 430/1$		б) $n_2=5, n_3=2, n_4=0$ $v_2=2, v=v_2=2$		
б) $\frac{n_2 n_3 n_4}{v_2} = 520/2$		в) $n_2=6, n_3=1, n_4=0$ $v_2=3, v=v_2=3$		
в) $\frac{n_2 n_3 n_4}{v_2} = 610/3$		г) $n_2=7, v_2=2, v_3=1$ $v=v_2+2v_3=4$		
$\frac{n_2 n_3 n_4}{v_2 v_3} = \frac{700}{2 \cdot 1}$				
$Y=3 (K=4, \tilde{n}=9)$		a) $n_2=9, v_2=2, v_3=2$ $v=v_2+2v_3=6$		
a) $\frac{n_2 n_3 n_4}{v_2 v_3} = \frac{9000}{2 \cdot 2}$		б) $n_2=9, v_2=6, v_3=0$ $v=v_2+2v_3=6$		
б) $\frac{n_2 n_3 n_4}{v_2} = \frac{9000}{6}$				
$Y=4 (K=5, \tilde{n}=11)$		a) $n_2=9, n_3=2$ $v_2=4, v_3=1 \Rightarrow v=6$		
a) $\frac{n_2 n_3 n_4 n_5}{v_2 v_3} = \frac{92000}{4 \cdot 1}$		б) $n_2=11; v_2=2, v_3=3$ $v=v_2+2v_3=8$		
б) $\frac{n_2 n_3 n_4 n_5}{v_2 v_3} = \frac{11 \cdot 0000}{2 \cdot 3}$				

Рис. 5. Структурный синтез статически определимых стержневых шарнирных ферм с совмещенными шарнирами (по стандартным кодам строения из табл. 5 и 2)

ное основание моста), относящихся к механическим системам 1-, 2-, 3- и 4-го уровней сложности ( $Y=1; Y=2; Y=3; Y=4$ ) с общим числом звеньев, определяемым кодами строения из соответствующих табл. 1–5 — в зависимости от заданной величины  $Y$  и  $W$ .

На рисунке 6 изображены особые группы Ассур с различным числом звеньев и двойных шарниров, синтезированные путем размыкания кинематических цепей ферм (предварительно построенных согласно алгоритму на рис. 5 по соответствующим кодам строения из табл. 5).

На рисунке 7 приведены алгоритм и результаты синтеза оптимальных структур одноподвижных механизмов с заданными наиболее сложными (трехшарнирными) звеньями и со-

Уровень сложности	→	Состав цепи	→	Структура фермы	→	Структура группы Ассур
Код строения						
$Y=2 (K=3, \tilde{n}=7)$						
$\frac{n_2 n_3 n_4}{v_2} = 520/2$						$n=6, v_2=2$
$Y=3 (K=4, \tilde{n}=9)$						
$\frac{n_2 n_3 n_4 n_5}{v_2} = 8010/4$						$n=8, v_2=4$
$Y=3 (K=4, \tilde{n}=9)$						
$\frac{n_2 n_3 n_4 n_5}{v_2} = \frac{9000}{6}$						$n=8, v_2=6$
$Y=4 (K=5, \tilde{n}=11)$						
$\frac{n_2 n_3 n_4 n_5}{v_2} = \frac{91010}{4}$						$n=10, v_2=4$

Рис. 6. Структурный синтез разомкнутых кинематических цепей групп Ассур с совмещенными шарнирами (по стандартным кодам строения из табл. 5)

вмещенными (двойными) шарнирами. Этим исходным данным ( $i_{\max}=3, j_{\max}=2$ ) в базовой универсальной структурной табл. 1 выборочно удовлетворяют всего 20 кодов строения, реализованных в схемах, изображенных на рис. 7, и охватывающих кинематические цепи с  $\tilde{n}=6; 8; 10; 12$ , содержащие  $n_2=4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11, n_3=1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8$  и  $v_2=0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7$ . Из представленных на рис. 7 разных 20 схем только 4 схемы (42/0, 440/0, 4600/0, 48000/0) выполнены с простыми шарнирами, а остальные 16 дополнительных схем содержат совмещенные двойные шарниры. Таким образом, только за счет применения двухкратных шарниров диапазон оптимальных структурных решений можно расширить в 5 раз.

Код 42/0 	51/1 	440/0 	530/1 
620/2 	710/3 	4600/0 	5500/1 
6400/2 	7300/3 	8200/4 	9100/5 
48000/0 	57000/1 	66000/2 	75000/3 
84000/4 	93000/5 	10,2000/6 	11,1000/7 

Рис. 7. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей одноподвижных механизмов ( $W=1$ ) с заданной максимально допустимой сложностью звеньев  $i_{\max}=3$  и кратностью совмещенных шарниров  $j_{\max}=2$  (по стандартным кодам строения из базовых табл. 1 и 2 для  $\tilde{n}=4-12$ )

На рисунках 8 и 9 представлены алгоритм и некоторые результаты структурного синтеза на основе уравнений теоремы (IV) и целевой функции синтеза оптимальных структур (9) — простых и сложных незамкнутых кинематических цепей однорук и многорук роботов и манипуляторов с применением в их схемах совмещенных шарниров различной кратности. В схемах, изображенных на рис. 8 и 9, стойка входит в общее число  $\tilde{n}$  звеньев робототехнической системы.

### Выводы

Представленные в данной работе структурные формулы (1) — (11) и отвечающие им четыре теоремы о закономерностях оптимального строения шарнирно-рычажных механиче-

Основное уравнение структурного синтеза	$n_2 = (W + v_2 + 3) - 2(s + 1)$		
Исходные данные	Состав цепи	Код строения	Структурная схема
$W=5$ $s=2$ $v_2=1$	$n_1 = s + 1 = 3$ $n_2 = 9 - 6 = 3$ 	$\frac{n_1 n_2}{v_2} = 3 \cdot 3 / 1$	
$W=3$ $s=1$ $v_2=2$	$n_1 = s + 1 = 2$ $n_2 = 8 - 4 = 4$ 	$\frac{n_1 n_2}{v_2} = 2 \cdot 4 / 2$	
$W=7$ $s=3$ $v_2=4$	$n_1 = s + 1 = 4$ $n_2 = 14 - 8 = 6$ 	$\frac{n_1 n_2}{v_2} = 4 \cdot 6 / 4$	
$W=9$ $s=2$ $v_2=1$	$n_1 = s + 1 = 3$ $n_2 = 13 - 6 = 7$ 	$\frac{n_1 n_2}{v_2} = 3 \cdot 7 / 1$	

Рис. 8. Структурный синтез простых незамкнутых кинематических цепей роботов и манипуляторов с совмещенными шарнирами (по расчетным кодам строения):

$s$  — число схватов;  $W$  — число приводов;  $v_2$  — число совмещенных двойных шарниров;  $n_1, n_2$  — число одно- и двухшарнирных звеньев цепи

ских систем (I)–(IV) образуют структурную математическую VIP-модель, которая позволяет:

1) рассчитать и составить универсальные структурные табл. 1–5 с полным перечнем стандартных кодов правильного строения и стандартных наборов совмещенных шарниров, представляющих все возможные целочисленные решения VIP-модели, обеспечивающие выполнение целевой функции синтеза оптимальных структур  $D=0$  (9);

2) выполнить по этим стандартным кодам направленный синтез оптимальных структур механических систем с совмещенными шарнирами — в виде одно- и многорук роботов и манипуляторов (вклю-

Исходные данные	Состав цепи	Код строения	Структурная схема
$s = 5, \Delta = 1$ $W = 9$ $K = 0$ $v_2 = 1$ $n_{324} = 0$	$n_1 = s + \Delta = 6$ $n_2 = (W + v_2 + 3) - 2n_1 = 4$ $n_3 = n_1 - (4v_2 + 2) = 0$	$\frac{n_1 n_2}{v_2} = \frac{6 \cdot 4}{1}$	
$s = 4, \Delta = 0$ $W = 12$ $K = 1$ $v_2 = 1$ $n_4 = 1$ $n_{23} = 0$	$n_1 = s + \Delta = 4$ $n_2 = (W + v_2 + 3) - 2n_1 = 9$ $n_3 = n_1 - (v_2 + 2n_4 + 2) = 1$	$\frac{n_1 n_2 n_3 n_4}{v_2} = \frac{4 \cdot 9 \cdot 1 \cdot 1}{1}$	
$s = 8, \Delta = 1$ $W = 18$ $K = 0$ $v_2 = 1$ $n_4 = 3$ $n_{23} = 0$	$n_1 = s + \Delta = 9$ $n_2 = (W + v_2 + 3) - 2n_1 = 7$ $n_3 = n_1 - (v_2 + 2n_4 + 2) = 0$	$\frac{n_1 n_2 n_3 n_4}{v_2} = \frac{9 \cdot 7 \cdot 0 \cdot 3}{1}$	
$s = 8, \Delta = 1$ $W = 12$ $K = 0$ $v_2 = 4$ $n_4 = 0$ $n_5 = 1$ $n_{26} = 0$	$n_1 = s + \Delta = 9$ $n_2 = (W + v_2 + 3) - 2n_1 = 3$ $n_3 = n_1 - (v_2 + 3n_5 + 2) = 0$	$\frac{n_1 n_2 n_3 n_4 n_5}{v_2} = \frac{9 \cdot 3 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 1}{4}$	

Рис. 9. Структурный синтез сложных незамкнутых кинематических цепей роботов и манипуляторов с совмещенными шарнирами (по расчетным кодам строения):

$s$  — число схватов;  $\Delta$  — число одношарнирных неподвижных опор;  $W$  — число приводов;  $K$  — число взаимно независимых изменяемых замкнутых контуров цепи;  $v_2, v_3, v_4, v_5 \dots$  — число совмещенных двойных, тройных, четырехкратных и пятикратных шарниров;  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6 \dots$  — число 1-, 2-, 3-, 4-, 5- и 6-шарнирных звеньев цепи

чая запатентованную оптимальную структуру параллелограммного рычажного механизма [17]);

3) предложить указанные в универсальных структурных табл. 1–5 количественные показатели: уровень сложности системы  $Y(6)$  и код строения системы (11) — в качестве основных идентификационных и классификационных признаков оптимальной структуры разнооб-

разных [1, 4 — 9] механических систем (для более полного учета их строения).

Литература

1. Крайнев А.Ф. Механика (искусство построения) машин. Фундаментальный словарь. М.: Машиностроение, 2000. 904 с.
2. Кожевников С.Н. Основания структурного синтеза механизмов. Киев: Наукова думка, 1979. 232 с.
3. Hwang W.-M., Hwang Y.-W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chain with simple joints // Mechanism and Machine Theory. 1992. Vol. 27. N 2. P. 189–199.
4. Пейсах Э.Е. О структурном синтезе рычажных механизмов // Теория механизмов и машин. 2005. Т. 3. № 1(5). С. 77–80 (tmm.spbstu.ru).
5. Пейсах Э.Е. Атлас структурных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов // Теория механизмов и машин. 2006. Т. 4. № 1(7). С. 3–17 (tmm.spbstu.ru).
6. Пейсах Э.Е. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера). В 2 ч. Ч. 1. // Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 1(11). С. 4–14 (tmm.spbstu.ru).
7. Пейсах Э.Е. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера). В 2 ч. Ч. 2 // Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 2(12). С. 3–17 (tmm.spbstu.ru).
8. Смелягин А.И. Структура механизмов и машин. Новосибирск: НГТУ, 2001. 286 с.
9. Дворников Л.Т. К вопросу о классификации плоских групп Ассур // Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 2(12). С. 18–25 (tmm.spbstu.ru).
10. Пожбелко В.И. Единая теория структуры механических систем // Теория механизмов и машин в вопросах и ответах. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. С. 51–106.
11. Пожбелко В.И. Формализация структурного анализа и синтеза механизмов (с контактными и бесконтактными связями) // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. № 11. С. 3–15.
12. Пожбелко В.И. Универсальная структурная формула и классификация механических систем любой структуры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2000. № 1–2. С. 3–10.
13. Пожбелко В.И. Структурный синтез и анализ механических систем произвольной структуры заданного уровня сложности // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2000. № 5–6. С. 13–26.
14. Пожбелко В.И. Некоторые вопросы структурного синтеза плоских рычажных механизмов с учетом применения сложных (совмещенных) шарниров. // Теория механизмов и машин. 2006. Т. 4. № 1(7). С. 27–37 (tmm.spbstu.ru).
15. Пожбелко В.И. Структурный синтез и конструирование рычажных и планетарных само-устанавливающихся механизмов // Вестник ЮУрГУ. Машиностроение. 2011. № 31. С. 4–14.
16. Пожбелко В.И. Структурный анализ и синтез плоских механизмов заданного уровня сложности по универсальной структурной таблице стандартных кодов строения // Теория механизмов и машин. 2012. Т. 10. № 1(19). С. 15–34 (tmm.spbstu.ru).
17. Patent RU 2246056, F16H 21/14. Рычажный механизм. В.И. Пожбелко.

Статья поступила в редакцию 20.08.2012