Вовкотруб В.В. Развитие методов структурного синтеза механизмов первого семейства из замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №18. – С. 27-34.

УДК 621.01 https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-18-27-34

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ ПЕРВОГО СЕМЕЙСТВА ИЗ ЗАМКНУТЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОДВИЖНЫХ ЗВЕНЬЕВ

Вовкотруб В.В.

Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова Министерства обороны Российской Федерации, Краснодар

Ключевые слова: механизмы первого семейства, синтез структуры механизма, замкнутая кинематическая цепь, подвижность, базисное звено цепи, кинематическая пара.

Аннотация. В статье рассмотрены методы структурного синтеза механизмов из замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев. Обоснована возможность развития метода структурного синтеза механизмов М. Грюблера на механизмы первого семейства. Приведена универсальная структурная система профессора Л.Т. Дворникова для замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства. Найден полный состав решений, описывающий организацию замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого подсемейства первого семейства при сложности базисного звена цепи равной трем, подвижности цепи равной шести и общем числе звеньев цепи от четырех до шести. Получены сочетания кинематических пар и звеньев, являющиеся фундаментом для построения структурных схем закрытых кинематических цепей подвижных звеньев первого подсемейства первого семейства, и позволяющие найти все без исключения структурные схемы замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого подсемейства первого семейства при заданных параметрах.

DEVELOPMENT OF METHODS OF STRUCTURAL SYNTHESIS OF MECHANISMS OF THE FIRST FAMILY OF CLOSED KINEMATIC CHAINS OF MOVING LINKS

Vovkotrub V.V.

Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots n.a. Hero of the Soviet Union A.K. Serov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Krasnodar

Keywords: mechanisms of the first family, synthesis of mechanism structure, closed kinematic chain, mobility, basic chain link, kinematic pair.

Abstract. The article considers methods of structural synthesis of mechanisms from closed kinematic chains of moving links. The possibility of developing the method of structural synthesis of M. Grubler mechanisms on the mechanisms of the first family is substantiated. The universal structural system of professor L.T. Dvornikov for closed kinematic chains of movable links of the first family is given. A complete set of solutions has been found describing the organization of closed kinematic chains of movable links of the first subfamily of the first family with the complexity of the basic chain link equal to three, the mobility of the chain equal to six and the total number of chain links from four to six. Combinations of kinematic pairs and links have been obtained, which are the foundation for constructing structural schemes of closed kinematic chains of movable links of the first subfamily of the first family, and allowing to find all, without exception, structural schemes of closed kinematic chains of movable links of the first subfamily of the first family under given parameters.

Введение

Структурный синтез является первичным и наиболее ответственным этапом конструирования механизмов, определяющим эффективность и долговечность их работы.

За более чем полуторавековую историю науки о машинах были разработаны три основных метода синтеза структур кинематических цепей – это метод [1] немецкого ученого Грюблера М.Ф. (1883 г.), метод [2] российского ученого Ассура Л.В. (1914 г.) и метод [3] российского ученого Дворникова Л.Т. (1993 г.).

Особенности применения методов Ассура Л.В. и Дворникова Л.Т. для синтеза структур механизмов первого семейства были рассмотрены в работах [4,5].

В настоящей статье рассмотрим метод синтеза структур механизмов первого семейства из замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев (далее – ЗКЦ). Данный метод, по сути, является развитием метода М. Грюблера на механизмы первого семейства.

Метод синтеза механизмов по М. Грюблеру

В 1883г. в работе [1] М. Грюблером был показан метод структурного синтеза замкнутых плоских шарнирных кинематических цепей подвижных звеньев. Эти цепи отличались тем, что не имели выходов на стойку. Они обладали свободой движения в плоскости (два движения вдоль осей координат *XOY* и одно вращательное движение относительно оси *Z*), при этом внутри цепи имела место одна внутренняя свобода движения. Из таких цепей, которые позже получили название цепей Грюблера, путем остановки одного из звеньев (любого) могли образовываться одноподвижные механизмы. Этот метод создания работоспособных многозвенных плоских механизмов получил (особенно в Европе) широкое использование и до настоящего времени является весьма востребованным [6].

Образование цепей Грюблера основывается на использовании простого соотношения между числом звеньев n и числом шарниров p_5 (кинематических пар пятого класса).

Формула подвижности таких цепей имеет вид:

$$3n - 2p_5 = 4\,. \tag{1}$$

Общее количество шарниров и звеньев цепи определяется по формулам:

$$2p_5 = 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + \dots, \tag{2}$$

$$n = n_2 + n_3 + n_4 + \dots\,. \tag{3}$$

где n_2, n_3, n_4 – соответственно двухпарные, трехпарные и четырехпарные звенья цепи.

Метод построения ЗКЦ, был разработан М. Грюблером для синтеза плоских механизмов и к сожалению не получил до настоящего времени принципиального развития на механизмы всех семейств и пространств.

Обоснование метода синтеза структур ЗКЦ первого семейства

Известно, что все многообразие механизмов описывается универсальной формулой подвижности В.В. Добровольского [7]:

$$W_m = (6 - m)n - \sum_{k=5}^{k-m=1}(k-m)p_k\,, \tag{4}$$

где W_m – подвижность механизма, n – число подвижных звеньев, m – параметр Добровольского, определяющий число общих, наложенных на весь механизм условий связи от нуля до четырех, k – класс кинематических пар, $k = 1,2,3,4,5$.

Через m всё многообразие пространственных механизмов делится на пять семейств. При этом номер семейства (0, 1, 2, 3, 4) соответствует числу общих связей [8].

Структурная формула для механизмов первого семейства имеет вид:

$$W_1 = 5n - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2\,. \tag{5}$$

Все семейства механизмов из условия явного различия механизмов по используемым в них классам кинематических пар делятся на подсемейства [9].

Первое семейство механизмов включает пятнадцать подсемейств.

Структурные формулы для механизмов подсемейств имеют следующий вид:

$$W_{1(1)} = 5n - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2\,, \tag{6}$$

$$W_{1(2)} = 5n - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3\,, \tag{7}$$

$$W_{1(3)} = 5n - 4p_5 - 3p_4 - p_2\,, \tag{8}$$

$$W_{1(4)} = 5n - 4p_5 - 3p_4\,, \tag{9}$$

$$W_{1(5)} = 5n - 4p_5 - 2p_3 - p_2\,, \tag{10}$$

$$W_{1(6)} = 5n - 4p_5 - 2p_3\,, \tag{11}$$

$$W_{1(7)} = 5n - 4p_5 - p_2 \ , \quad (12)$$

$$W_{1(8)} = 5n - 4p_5 \ , \quad (13)$$

$$W_{1(9)} = 5n - 3p_4 - 2p_3 - p_2 \ , \quad (14)$$

$$W_{1(10)} = 5n - 3p_4 - 2p_3 \ , \quad (15)$$

$$W_{1(11)} = 5n - 3p_4 - p_2 \ , \quad (16)$$

$$W_{1(12)} = 5n - 3p_4 \ , \quad (17)$$

$$W_{1(13)} = 5n - 2p_3 - p_2 \ , \quad (18)$$

$$W_{1(14)} = 5n - 2p_3 \ , \quad (19)$$

$$W_{1(15)} = 5n - p_2 \ . \quad (20)$$

Из приведенных выше формул (6)-(20) можно получить структурные формулы подвижности для ЗКЦ всех подсемейств первого семейства. Для этого достаточно заменить в формулах количество подвижных звеньев механизмов (n) на общее количество звеньев ЗКЦ ($n_ц$) и учитывая что $n_ц = n + 1$, добавить к подвижности цепей пять степеней свободы. Таким образом, для одноподвижных механизмов первого семейства, получаем следующие структурные формулы подвижности ЗКЦ по подсемействам:

$$W_{Ц1(1)} = 5n_ц - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2 = 6, \quad (21)$$

$$W_{Ц1(2)} = 5n_ц - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 = 6, \quad (22)$$

$$W_{Ц1(3)} = 5n_ц - 4p_5 - 3p_4 - p_2 = 6, \quad (23)$$

$$W_{Ц1(4)} = 5n_ц - 4p_5 - 3p_4 = 6, \quad (24)$$

$$W_{Ц1(5)} = 5n_ц - 4p_5 - 2p_3 - p_2 = 6, \quad (25)$$

$$W_{Ц1(6)} = 5n_ц - 4p_5 - 2p_3 = 6, \quad (26)$$

$$W_{Ц1(7)} = 5n_ц - 4p_5 - p_2 = 6, \quad (27)$$

$$W_{Ц1(8)} = 5n_ц - 4p_5 = 6, \quad (28)$$

$$W_{Ц1(9)} = 5n_ц - 3p_4 - 2p_3 - p_2 = 6, \quad (29)$$

$$W_{Ц1(10)} = 5n_ц - 3p_4 - 2p_3 = 6, \quad (30)$$

$$W_{Ц1(11)} = 5n_ц - 3p_4 - p_2 = 6, \quad (31)$$

$$W_{Ц1(12)} = 5n_ц - 3p_4 = 6, \quad (32)$$

$$W_{Ц1(13)} = 5n_ц - 2p_3 - p_2 = 6, \quad (33)$$

$$W_{Ц1(14)} = 5n_ц - 2p_3 = 6, \quad (34)$$

$$W_{Ц1(15)} = 5n_ц - p_2 = 6. \quad (35)$$

Исследования ЗКЦ первого семейства внутри указанных выше подсемейств конкретизируют поставленные задачи и существенно упрощают их решения, т.е. поиск структур ЗКЦ.

За основу при развитии метода синтеза структур ЗКЦ примем универсальную структурную систему профессора Дворникова Л.Т. [10], которая для механизмов первого семейства имеет вид:

$$\begin{cases} p = \tau + (\tau - 1)\, n_{(\tau-1)} + \ldots + i n_i + \ldots + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_{(\tau-1)} + \ldots + n_i + \ldots + n_2 + n_1 + n_0, \\ W_1 = 5n - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2, \end{cases} \quad (36)$$

где параметр τ – число геометрических элементов наиболее сложного звена кинематической цепи; n_i – число звеньев, добавляющих в цепь по i кинематических пар; n_0 – число звеньев, не добавляющих кинематических пар; p – общее число кинематических пар цепи; n – число подвижных звеньев.

Заменив в универсальной структурной системе (36) число подвижных звеньев (n) на общее число звеньев цепи ($n_ц$), и учитывая что для ЗКЦ одноподвижных механизмов $W_{Ц1} = 6$, а $n_0 = 1$, получаем универсальную структурную систему для ЗКЦ первого семейства:

$$\begin{cases} p = \tau + (\tau - 1)n_{(\tau-1)} + ... + in_i + ... + 2n_2 + n, \\ n_w = 2 + n_{\tau-1} + ... + n_i + ... + n_2 + n_1, \\ W_{Ц1} = 5n_ц - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2 = 6, \end{cases} \tag{37}$$

которая позволяет находить все возможные структуры замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев по трем задаваемым независимым параметрам: τ, k, $n_ц$.

Особенности применения математической модели ЗКЦ

Рассмотрим особенности применения универсальной структурной системы для ЗКЦ (37) на примере поиска всех возможных структур ЗКЦ первого подсемейства первого семейства при сложности базисного звена цепи $\tau = 3$ и общем числе звеньев цепи от 4 до 6.

Система уравнений (37) в этом случае примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 3 + 2n_2 + n_1, \\ n_ц = 2 + n_2 + n_1, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 5n_ц - 6. \end{cases} \tag{38}$$

Из третьего уравнения системы (38) выразим $n_ц$:

$$n_ц = \frac{(4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2) + 6}{5}. \tag{39}$$

При наличии пар p_5, p_4, p_3, p_2 хотя бы по одной, получаем, что $n_ц = \frac{16}{5}$.

Из этого результата следует, что трехзвенных ЗКЦ в этом подсемействе не существует.

Образование ЗКЦ возможно, если скобка $(4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2)$ согласно (39), при $n_ц = 4,5,6$ и т.д. будет принимать значения, соответственно, из ряда 14, 19, 24 и т. д. через 5.

Выразим из второго уравнения системы (38) n_1:

$$n_1 = n_ц - n_2 - 2, \tag{40}$$

Подставив его в первое уравнение системы (38), получим:

$$p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 1 + n_ц + n_2, \tag{41}$$

Тогда для $\tau = 3$ получим исходную систему:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 1 + n_ц + n_2, \\ n_1 = n_ц - n_2 - 2, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 5n_ц - 6. \end{cases} \tag{42}$$

Для случая $n_ц = 4$ по (40) $n_1 = 2 - n_2$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 5 + n_2$.

Тогда система (42) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 5 + n_2, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 14. \end{cases} \tag{43}$$

Задаваясь $n_2 = 0$, получим $n_1 = 2$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 5$.

Тогда система (43) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 5, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 14. \end{cases} \tag{44}$$

Система (44) имеет единственное решение:

$$n_ц = 4,\ n_1 = 2,\ n_2 = 0,\ p_5 = 2,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1,\ p_2 = 1. \qquad \text{(I)}$$

Задаваясь $n_2 = 1$, получим $n_1 = 1$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 6$.

Тогда система (43) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 6, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 14. \end{cases} \tag{45}$$

Система (45) имеет два решения:

$$n_ц = 4,\ n_1 = 1,\ n_2 = 1,\ p_5 = 1,\ p_4 = 1,\ p_3 = 3,\ p_2 = 1. \text{ (II)}$$

$$n_ц = 4,\ n_1 = 1,\ n_2 = 1,\ p_5 = 1,\ p_4 = 2,\ p_3 = 1,\ p_2 = 2. \text{ (III)}$$

Для случая $n_ц = 5$ по (40) $n_1 = 3 - n_2$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 6 + n_2$.

Тогда система (42) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 6 + n_2, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 19. \end{cases} \tag{46}$$

Задаваясь $n_2 = 0$, получим $n_1 = 3$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 6$.

Тогда система (46) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 6, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 19. \end{cases} \tag{47}$$

Система (47) не имеет решений.

Задаваясь $n_2 = 1$, получим $n_1 = 2$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 7$.

Тогда система (46) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 7, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 19. \end{cases} \tag{48}$$

Система (48) имеет три решения:

$$n_ц = 5,\ n_1 = 2,\ n_2 = 1,\ p_5 = 1,\ p_4 = 4,\ p_3 = 1,\ p_2 = 1. \qquad \text{(IV)}$$

$$n_ц = 5,\ n_1 = 2,\ n_2 = 1,\ p_5 = 2,\ p_4 = 2,\ p_3 = 2,\ p_2 = 1. \qquad \text{(V)}$$

$$n_ц = 5,\ n_1 = 2,\ n_2 = 1,\ p_5 = 3,\ p_4 = 1,\ p_3 = 1,\ p_2 = 2. \qquad \text{(VI)}$$

Задаваясь $n_2 = 2$, получим $n_1 = 1$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 8$.

Тогда система (46) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 8, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 19. \end{cases} \tag{49}$$

Система (49) имеет четыре решения:

$$n_ц = 5,\ n_1 = 1,\ n_2 = 2,\ p_5 = 1,\ p_4 = 2,\ p_3 = 4,\ p_2 = 1. \qquad \text{(VII)}$$

$$n_ц = 5,\ n_1 = 1,\ n_2 = 2,\ p_5 = 2,\ p_4 = 1,\ p_3 = 3,\ p_2 = 2. \qquad \text{(VIII)}$$

$$n_ц = 5,\ n_1 = 1,\ n_2 = 2,\ p_5 = 1,\ p_4 = 3,\ p_3 = 2,\ p_2 = 2. \qquad \text{(IX)}$$

$$n_ц = 5,\ n_1 = 1,\ n_2 = 2,\ p_5 = 2,\ p_4 = 2,\ p_3 = 1,\ p_2 = 3. \qquad \text{(X)}$$

Для случая $n_ц = 6$ по (40) $n_1 = 4 - n_2$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 7 + n_2$.

Тогда система (42) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 7 + n_2, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 24. \end{cases} \quad (50)$$

Задаваясь $n_2 = 0$, получим $n_1 = 4$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 7$.

Тогда система (50) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 7, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 24. \end{cases} \quad (51)$$

Система (51) не имеет решений.

Задаваясь $n_2 = 1$, получим $n_1 = 3$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 8$.

Тогда система (50) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 8, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 24. \end{cases} \quad (52)$$

Система (52) имеет два решения:

$$n_ц = 6, n_1 = 3, n_2 = 1, p_5 = 4, p_4 = 1, p_3 = 2, p_2 = 1. \quad \text{(XI)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 3, n_2 = 1, p_5 = 3, p_4 = 3, p_3 = 1, p_2 = 1. \quad \text{(XII)}$$

Задаваясь $n_2 = 2$, получим $n_1 = 2$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 9$.

Тогда система (50) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 9, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 24. \end{cases} \quad (53)$$

Система (53) имеет шесть решений:

$$n_ц = 6, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 1, p_4 = 5, p_3 = 2, p_2 = 1. \quad \text{(XIII)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 2, p_4 = 4, p_3 = 1, p_2 = 2. \quad \text{(XIV)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 2, p_4 = 3, p_3 = 3, p_2 = 1. \quad \text{(XV)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 3, p_4 = 2, p_3 = 2, p_2 = 2. \quad \text{(XVI)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 3, p_4 = 1, p_3 = 4, p_2 = 1. \quad \text{(XVII)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 4, p_4 = 1, p_3 = 1, p_2 = 3. \quad \text{(XVIII)}$$

Задаваясь $n_2 = 3$, получим $n_1 = 1$, а $p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 10$.

Тогда система (50) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 = 10, \\ 4p_5 + 3p_4 + 2p_3 + p_2 = 24. \end{cases} \quad (54)$$

Система (54) имеет шесть решений:

$$n_ц = 6, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 1, p_4 = 5, p_3 = 1, p_2 = 3. \quad \text{(XIX)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 1, p_4 = 4, p_3 = 3, p_2 = 2. \quad \text{(XX)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 2, p_4 = 2, p_3 = 4, p_2 = 2. \quad \text{(XXI)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 2, p_4 = 3, p_3 = 2, p_2 = 3. \quad \text{(XXII)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 2, p_4 = 1, p_3 = 6, p_2 = 1. \quad \text{(XXIII)}$$

$$n_ц = 6, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 3, p_4 = 1, p_3 = 3, p_2 = 3. \quad \text{(XXIV)}$$

Сведем полученные решения в таблицу 1.

Аналогично могут быть найдены решения, описывающие организацию ЗКЦ из n_i и p_k первого подсемейства первого семейства для других значений τ и $n_ц$.

Табл. 1. Полный состав решений для ЗКЦ первого подсемейства первого семейства при сложности базисного звена цепи $\tau = 3$ и общем числе звеньев цепи $n_ц$ от 4 до 6.

Общее число звеньев цепи, $n_ц$	Решения, описывающие организацию ЗКЦ из n_i и p_k
4	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 0, p_5 = 2, p_4 = 1, p_3 = 1, p_2 = 1.$
4	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 1, p_5 = 1, p_4 = 1, p_3 = 3, p_2 = 1.$
4	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 1, p_5 = 1, p_4 = 2, p_3 = 1, p_2 = 2.$
5	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 1, p_5 = 1, p_4 = 4, p_3 = 1, p_2 = 1.$
5	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 1, p_5 = 2, p_4 = 2, p_3 = 2, p_2 = 1.$
5	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 1, p_5 = 3, p_4 = 1, p_3 = 1, p_2 = 2.$
5	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 2, p_5 = 1, p_4 = 2, p_3 = 4, p_2 = 1.$
5	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 2, p_5 = 2, p_4 = 1, p_3 = 3, p_2 = 2.$
5	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 2, p_5 = 1, p_4 = 3, p_3 = 2, p_2 = 2.$
5	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 2, p_5 = 2, p_4 = 2, p_3 = 1, p_2 = 3.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 3, n_2 = 1, p_5 = 4, p_4 = 1, p_3 = 2, p_2 = 1.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 3, n_2 = 1, p_5 = 3, p_4 = 3, p_3 = 1, p_2 = 1.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 1, p_4 = 5, p_3 = 2, p_2 = 1.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 2, p_4 = 4, p_3 = 1, p_2 = 2.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 2, p_4 = 3, p_3 = 3, p_2 = 1.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 3, p_4 = 2, p_3 = 2, p_2 = 2.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 3, p_4 = 1, p_3 = 4, p_2 = 1.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 4, p_4 = 1, p_3 = 1, p_2 = 3$
6	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 1, p_4 = 5, p_3 = 1, p_2 = 3.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 1, p_4 = 4, p_3 = 3, p_2 = 2.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 2, p_4 = 2, p_3 = 4, p_2 = 2.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 2, p_4 = 3, p_3 = 2, p_2 = 3.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 2, p_4 = 1, p_3 = 6, p_2 = 1.$
6	$n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 3, p_5 = 3, p_4 = 1, p_3 = 3, p_2 = 3.$

Приведенные в таблице 1 решения, описывающие организацию ЗКЦ из n_i и p_k, являются сочетанием кинематических пар и звеньев, необходимым для построения всех без исключения структурных схем ЗКЦ первого подсемейства первого семейства, по заданным параметрам.

Особенности формирования структурных схем ЗКЦ первого семейства будут рассмотрены автором в последующих работах.

Заключение

Задачу структурного синтеза механизмов первого семейства можно условно разбить на три этапа. На первом этапе с помощью универсальной структурной системы профессора Дворникова Л.Т. осуществляется синтез структур закрытых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства по заданным параметрам, т.е. решается система уравнений (37). Её решением являются сочетания кинематических пар и звеньев, из которых будут состоять рассматриваемые ЗКЦ. На втором этапе составляются схемы ЗКЦ, которые изображают взаимное расположение полученных сочетаний кинематических пар и звеньев. На завершающем этапе условные классы кинематических пар заменяются технически реализуемыми парами с конкретным комплексом движений, а также выбирается неподвижное звено.

Список литературы

1. Ассур Л.В. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации // Известия СПб. политехн. ин-та. – 1914. – Т. XXI. – Вып. 1. – С. 187-283.
2. Grubler M. Allgemeine Eigenschaften der zwanglaufigen ebenen kinematischen Ketten // Civilingenieur. Leipzig. 1883, no. 29, pp. 167-200.
3. Дворников Л.Т. Новые формализации в структуре механизмов // Известия вузов. Машиностроение.. – 1993. – № 1. – С. 3-8.
4. Вовкотруб В.В. Механизмы первого семейства. Основы теории // XI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 60-ой годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей. – Краснодар, 2021. – С. 375-378.
5. Вовкотруб В.В. Особенности синтеза пятизвенных ассуровых механизмов первого семейства // XI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 60-ой годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей. – Краснодар, 2021. – С. 383-384.
6. Федоров А.И., Дворников Л.Т. К вопросу о полном составе восьмизвенных плоских цепей Грюблера // МашиноСтроение. – 2010. – №20. – С. 45-51.
7. Добровольский В.В. Основные принципы рациональной классификации механизмов // Структура и классификация механизмов. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. – С. 5-48.
8. Артоболевский И.И. Структура, кинематика и кинетостатика многозвенных плоских механизмов. – М.; Л.: ГОНТИ НКТП СССР, 1939. – 232 с.
9. Дворников Л.Т. Универсальная структурная классификация механизмов // МашиноСтроение. – 2011. – №21. – С. 4-37.
10. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов: Учебное пособие. – Новокузнецк: СибГГМА, 1994. – 102 с.

References

1. Assur L.V. Investigation of flat rod mechanisms with lower pairs from the point of view of their structure and classification // News of the SPb. polytechnic. in-t. 1914, vol. XXI, iss. 1, pp. 187-283.
2. Grubler M. Allgemeine Eigenschaften der zwanglaufigen ebenen kinematischen Ketten // Civilingenieur. Leipzig. 1883, no. 29, pp. 167-200.
3. Dvornikov L.T. New formalizations in the structure of mechanisms // News of universities. Mechanical Engineering. 1993, no. 1, pp. 3-8.
4. Vovkotrub V.V. Mechanisms of the first family. Fundamentals of theory // XI International Scientific and Practical Conference of Young scientists dedicated to the 60th anniversary of Yuri Gagarin's flight into space. Collection of scientific articles. – Krasnodar, 2021. – P. 375-378.
5. Vovkotrub V.V. Features of synthesis of five-link assur mechanisms of the first family // XI International Scientific and Practical Conference of Young scientists dedicated to the 60th anniversary of Yuri Gagarin's flight into space. Collection of scientific articles. – Krasnodar, 2021. – P. 383-384.
6. Fedorov A.I., Dvornikov L.T. On the question of the full composition of eight-branched flat Grubler chains // MashineStructure. 2010, no. 20, pp. 45-51.
7. Dobrovolsky, V.V. Basic principles of rational classification of mechanisms // Structure and classification of mechanisms. – M.; L.: Publ. house of the USSR Academy of Sciences, 1939. – P. 5-48.
8. Artobolevsky I.I. Structure, kinematics and kinetostatics of multi–link flat mechanisms. – M.; L.: GONTI NKTP USSR, 1939. – 232 p.
9. Dvornikov L.T. Universal structural classification of mechanisms // MashineStructure. 2011, no. 21, pp. 4-37.
10. Dvornikov L.T. The beginning of the theory of the structure of mechanisms: Textbook. – Novokuznetsk: SibSMMA, 1994. – 102 p.

Сведения об авторах:	*Information about authors:*
Вовкотруб Валерий Владимирович – кандидат технический наук, доцент 105 кафедры механики	**Vovkotrub Valery Vladimirovich** – candidate of technical sciences, associate professor of the 105th Department of mechanics
vovkotrybv@yandex.ru	

Получена 29.01.2023