

## Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.01

doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-4-11

### СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЗАМКНУТЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОДВИЖНЫХ ЗВЕНЬЕВ ПЯТОГО, ШЕСТОГО, СЕДЬМОГО И ВОСЬМОГО ПОДСЕМЕЙСТВ ПЕРВОГО СЕМЕЙСТВА

**Валерий Владимирович Вовкотруб**<sup>✉</sup>

Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова Министерства обороны Российской Федерации, Краснодар, Россия  
vovkotrubv@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7674-5082>

#### Аннотация

Цель исследования: развитие метода структурного синтеза замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев на пятое, шестое, седьмое и восьмое подсемейство первого семейства.

Задачи: на основе универсальной структурной системы профессора Л.Т. Дворникова для замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства, получить полный состав решений, описывающих организацию замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства при сложности базисного звена цепи, равной двум и трем, подвижности цепи, равной шести и общем числе звеньев цепи от 3 до 6. Используя полученные данные, рассмотреть на конкретном примере построение структурной схемы закрытой кинематической цепи подвижных звеньев первого семейства.

Методы исследования: использован метод структурного синтеза замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства.

Новизна работы: рассмотрены особенности применения универсальной структурной системы для определения состава замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейства первого семейства. Показан пример использования полученных сочетаний кинематических пар и звеньев для синтеза структурных схем замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства.

Результаты исследования: получены сочетания кинематических пар и звеньев, позволяющие найти структурные схемы замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства при заданных параметрах, из которых путем остановки звена могут образовываться одноподвижные механизмы первого семейства.

**Ключевые слова:** система, цепь, звенья, схема, подвижность, кинематическая пара.

Ссылка для цитирования:

Вовкотруб В.В. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства / В.В. Вовкотруб // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 06. – С. 4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-4-11.

Original article

Open Access Article

### STRUCTURAL SYNTHESIS OF CLOSED KINEMATIC CHAINS OF MOVING LINKS OF THE FIFTH, SIXTH, SEVENTH AND THE EIGHTH SUBFAMILY OF THE FIRST FAMILY

**Valery Vladimirovich Vovkotrub**<sup>1✉</sup>

Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov; Russia, Krasnodar  
vovkotrubv@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7674-5082>

## Abstract

The study objective is to develop a method of structural synthesis of closed kinematic chains of moving links into the fifth, sixth, seventh and eighth sub-families of the first family.

Tasks: to obtain a complete set of solutions describing the arrangement of closed kinematic chains of moving links of the fifth, sixth, seventh and eighth sub-families of the first family with the complexity of the basic chain link equal to two and three, the mobility of the chain equaling to six and the total number of chain links from 3 to 6 based on the universal structural system of Professor L.T. Dvornikov for closed kinematic chains of moving links of the first family. Using the data obtained, consider the construction of a block diagram of a closed kinematic chain of moving links of the first family on a specific example.

Research methods: a method of structural synthesis of closed kinematic chains of moving links of the first family is used.

## Reference for citing:

Vovkotrub VV. *Structural synthesis of closed kinematic chains of moving links of the fifth, sixth, seventh and the eighth subfamily of the first family. Transport Engineering. 2023; 6:4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-4-11.*

## Введение

В работе [1,2] М. Грюблером был рассмотрен метод структурного синтеза замкнутых плоских шарнирных кинематических цепей подвижных звеньев, которые позже получили название цепей Грюблера, при остановке одного из звеньев могли образовываться одноподвижные плоские механизмы.

Этот метод создания работоспособных многозвенных плоских механизмов получил широкое распространение среди немецких специалистов, а вслед за ними также специалистов многих других стран (особенно в Европе) [3,4,5,6].

Метод разработан М. Грюблером для плоских цепей, который не получил принципиального развития на замкнутые кинематические цепи подвижных звеньев (ЗКЦ) всех семейств и пространств.

В работе [7] рассмотрена возможность применения универсальной структурной системы профессора Л.Т. Дворникова [8] для развития метода М. Грюблера

The novelty of the work: the peculiarities of applying a universal structural system for determining the composition of closed kinematic chains of moving links of the fifth, sixth, seventh and eighth subfamilies of the first family are considered. An example of using the obtained combinations of kinematic pairs and links for the synthesis of structural schemes of closed kinematic chains of moving links of the first family is shown.

Study results: combinations of kinematic pairs and links are obtained, which make it possible to find structural schemes of closed kinematic chains of moving links of the fifth, sixth, seventh and eighth subfamilies of the first family under given parameters, from which single-moving mechanisms of the first family can be formed by stopping the link.

**Keywords:** system, chain, links, diagram, mobility, kinematic pair.

на ЗКЦ первого семейства. Приведена универсальная структурная система ЗКЦ первого семейства. Найден полный состав решений, описывающий организацию ЗКЦ первого подсемейства первого семейства при сложности базисного звена цепи равной трем, подвижности цепи равной шести и общем числе звеньев цепи от четырех до шести.

В настоящей статье, используя универсальную структурную систему ЗКЦ первого семейства [7], найдем полный состав решений, описывающий организацию ЗКЦ пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства при сложности базисного звена цепи равной двум и трем, подвижности цепи равной шести и общем числе звеньев цепи от трех до шести. А так же рассмотрим пример синтеза структурных схем замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства.

## Особенности применения универсальной структурной системы ЗКЦ первого семейства для определения состава кинематических цепей пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств

Известно, что все многообразие механизмов описываются универсальной

формулой подвижности В.В. Добровольского [9]:

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

где  $W_m$  – подвижность механизма;  $n$  – число подвижных звеньев;  $m$  – параметр Дювального, 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 [10].

Структурные формулы для механизмов семейств имеют вид:

$$W_0 = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1. \quad (2)$$

$$W_1 = 5n - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2. \quad (3)$$

$$W_2 = 4n - 3p_5 - 2p_4 - p_3. \quad (4)$$

$$W_3 = 3n - 2p_5 - p_4. \quad (5)$$

$$W_4 = 2n - p_5. \quad (6)$$

Все семейства механизмов из условия явного различия механизмов по используемым в них классам кинематических пар делятся на подсемейства [11].

Например, первое семейство механизмов включает пятнадцать подсемейств [12].

Из приведенных выше формул (2–6) можно получить структурные формулы подвижности для ЗКЦ всех семейства. Для этого достаточно заменить в формулах количество подвижных звеньев механизмов ( $n$ ) на общее количество звеньев ЗКЦ ( $n_u$ ) и, учитывая что  $n_u = n + 1$ , добавить к подвижности цепей  $(6 - m)$  степеней свободы. Таким образом, для одноподвижных механизмов получаем следующие структурные формулы подвижности ЗКЦ по семействам:

$$W_{ц0} = 6n_u - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 7. \quad (7)$$

$$W_{ц1} = 5n_u - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2 = 6. \quad (8)$$

$$W_{ц2} = 4n_u - 3p_5 - 2p_4 - p_3 = 5. \quad (9)$$

$$W_{ц3} = 3n_u - 2p_5 - p_4 = 4. \quad (10)$$

$$W_{ц4} = 2n_u - p_5 = 3. \quad (11)$$

Универсальная структурная система ЗКЦ первого семейства при числе звеньев, не добавляющих в цепь кинематических пар  $n_0 = 1$ , имеет вид [7]:

$$\begin{cases} p = \tau + (\tau - 1)n_{(\tau-1)} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n, \\ n_u = 2 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1, \\ W_{ц1} = 5n_u - 4p_5 - 3p_4 - 2p_3 - p_2 = 6, \end{cases} \quad (12)$$

где  $W_{ц1}$  – подвижность ЗКЦ первого семейства;  $n_u$  – общее число звеньев цепи;  $\tau$  – число геометрических элементов наиболее сложного звена кинематической цепи;  $n_i$  – число звеньев, добавляющих в цепь  $i$  кинематических пар;  $p$  – общее число кинематических пар цепи;  $p_5, p_4, p_3, p_2$  – число кинематических пар пятого, четвертого, третьего и второго класса.

Структурные формулы для ЗКЦ пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства имеют вид [7]:

$$W_{ц(5)} = 5n_u - 4p_5 - 2p_3 - p_2 = 6, \quad (13)$$

$$W_{ц(6)} = 5n_u - 4p_5 - 2p_3 = 6, \quad (14)$$

$$W_{ц(7)} = 5n_u - 4p_5 - p_2 = 6, \quad (15)$$

$$W_{ц(8)} = 5n_u - 4p_5 = 6. \quad (16)$$

Заменяя в системе уравнений (12) структурную формулу подвижности ЗКЦ первого семейства (третье уравнение системы) поочередно на формулы подвижности ЗКЦ пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств данного семейства (формулы (13–16)) получим следующие исходные системы уравнений для данных подсемейств первого семейства:

Для пятого подсемейства, при  $\tau = 2$ :

$$\begin{cases} p_5 + p_3 + p_2 = n_u, \\ n_u = 2 + n_1, \\ 4p_5 + 2p_3 + p_2 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (17)$$

Для пятого подсемейства, при  $\tau = 3$ :

$$\begin{cases} p_5 + p_3 + p_2 = 3 + 2n_2 + n_1, \\ n_u = 2 + n_2 + n_1, \\ 4p_5 + 2p_3 + p_2 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (18)$$

Для шестого подсемейства, при  $\tau = 2$ :

$$\begin{cases} p_5 + p_3 = n_u, \\ n_u = 2 + n_1, \\ 4p_5 + 2p_3 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (19)$$

Для шестого подсемейства, при  $\tau = 3$ :

$$\begin{cases} p_5 + p_3 = 3 + 2n_2 + n_1, \\ n_u = 2 + n_2 + n_1, \\ 4p_5 + 2p_3 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (20)$$

Для седьмого подсемейства, при  $\tau = 2$ :

$$\begin{cases} p_5 + p_2 = n_u, \\ n_u = 2 + n_1, \\ 4p_5 + p_2 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (21)$$

Для седьмого подсемейства, при  $\tau = 3$ :

$$\begin{cases} p_5 + p_2 = 3 + 2n_2 + n_1, \\ n_u = 2 + n_2 + n_1, \\ 4p_5 + p_2 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (22)$$

Для восьмого подсемейства, при  $\tau = 2$ :

$$\begin{cases} p_5 = n_u, \\ n_u = 2 + n_1, \\ 4p_5 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (23)$$

Для восьмого подсемейства, при  $\tau = 3$ :

$$\begin{cases} p_5 = 3 + 2n_2 + n_1, \\ n_u = 2 + n_2 + n_1, \\ 4p_5 = 5n_u - 6. \end{cases} \quad (24)$$

Технология расчет показателей в системах уравнений (17–24) в данной работе не приводится, так как она достаточно подробно рассмотрена в работах автора [12,13,14,15].

### Результаты исследований

В результате решения систем уравнений (17–24) найден полный состав решений для ЗКЦ пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства при сложности базисного звена цепи  $\tau = 2$ ,

и  $\tau = 3$ , и общем числе звеньев цепи от 3 до 6.

Полученные решения приведены в таблице.

Таблица  
Полный состав решений для ЗКЦ пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства при сложности базисного звена цепи  $\tau = 2$ , и  $\tau = 3$ ,

и общем числе звеньев цепи  $n_u$  от 3 до 6

Table

*The complete composition of solutions for the WCC of the fifth, sixth, seventh and eighth subfamilies of the first family with the complexity of the basic chain link  $\tau = 2$ , and  $\tau = 3$ , and the total number of chain links from 3 to 6*

| Общее число звеньев цепи, $n_u$ | Решения, описывающие организацию ЗКЦ из $n_i$ и $p_k$             |
|---------------------------------|---|
| Пятое подсемейство              |   |
| 4                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 1, p_5 = 2, p_3 = 2, p_2 = 2.$ |
| 5                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 3, n_2 = 0, p_5 = 4, p_3 = 1, p_2 = 1.$ |
| 5                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 1, p_5 = 3, p_3 = 3, p_2 = 1.$ |
| 6                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 3, n_2 = 1, p_5 = 5, p_3 = 1, p_2 = 2.$ |
| 6                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 4, p_3 = 3, p_2 = 2.$ |

| Общее число звеньев цепи, $n_u$ | Решения, описывающие организацию ЗКЦ из $n_i$ и $p_k$    |
|---------------------------------|--|
| Шестое подсемейство             |  |
| 4                               | $\tau = 2, n_0 = 1, n_1 = 2, p_5 = 3, p_3 = 1.$          |
| 4                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 0, p_5 = 2, p_3 = 3.$ |
| 4                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 1, n_2 = 1, p_5 = 1, p_3 = 5.$ |
| 6                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 4, n_2 = 0, p_5 = 5, p_3 = 2.$ |
| 6                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 3, n_2 = 1, p_5 = 4, p_3 = 4.$ |
| 6                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 3, p_3 = 6.$ |
| Седьмое подсемейство            |  |
| 3                               | $\tau = 2, n_0 = 1, n_1 = 1, p_5 = 2, p_2 = 1.$          |
| 4                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 0, p_5 = 3, p_2 = 2.$ |
| 5                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 1, p_5 = 4, p_2 = 3.$ |
| 6                               | $\tau = 3, n_0 = 1, n_1 = 2, n_2 = 2, p_5 = 5, p_2 = 4.$ |
| Восьмое подсемейство            |  |
| 6                               | $\tau = 2, n_0 = 1, n_1 = 4, p_5 = 6.$                   |

Аналогично могут быть найдены решения, описывающие организацию ЗКЦ из  $n_i$  и  $p_k$  пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства для других значений  $\tau$  и  $n_u$ .

Приведенные в таблице 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 пятого, шестого, седьмого и восьмого подсемейств первого семейства, по заданным параметрам.

### Пример синтеза структурных схем ЗКЦ первого семейства

Рассмотрим особенности построения структурных схем ЗКЦ первого семейства на основе решений, приведенных в таблице на конкретном примере:

Пусть требуется построить структурную схему ЗКЦ восьмого подсемейства первого семейства по заданным параметрам:

$$\tau = 2, n_u = 6.$$

Для такой ЗКЦ в таблице имеется только одно решение:

$$\tau = 2, n_0 = 1, n_1 = 4, p_5 = 6.$$

Учитывая, что все звенья ЗКЦ при  $\tau = 2$ , являются двупарными, для ЗКЦ восьмого подсемейства по заданным параметрам, можно построить только одну структурную схему с условными кинематическими парами пятого класса (рис. 1).

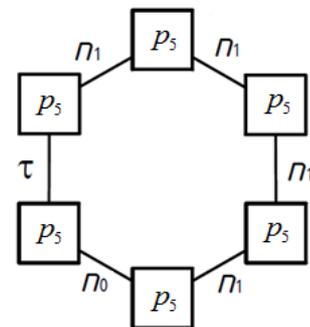


Рис. 1. Структурная схема ЗКЦ с условными кинематическими парами пятого класса  
Fig. 1. Block diagram of the WCC with conditional kinematic pairs of the fifth class

Для нашего случая больше подходят вращательные пары, как наиболее технологичные и надежные в работе. Поэтому при построении структурной схемы ЗКЦ будем использовать данный вид кинематических пар.

В результате замены получим структурную схему ЗКЦ восьмого подсемейства первого семейства по заданным параметрам, показанную на рис. 2.

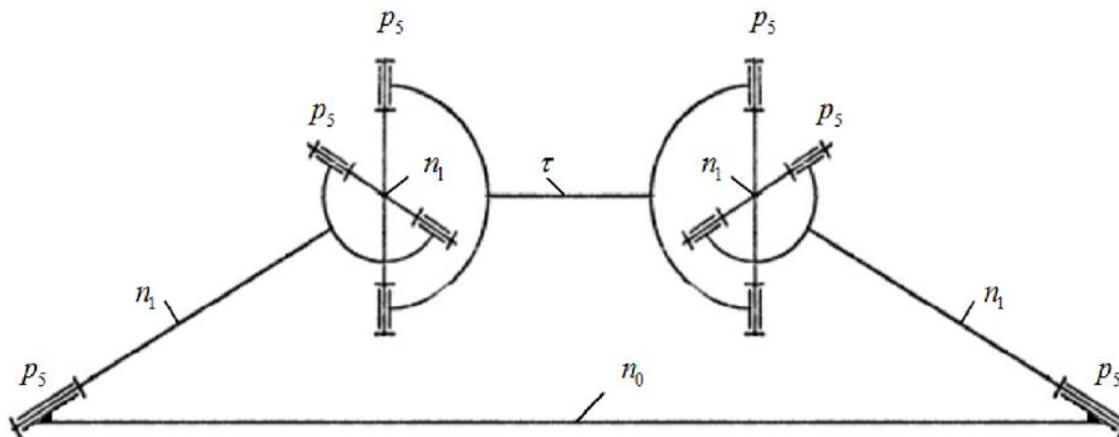


Рис. 2. Структурная схема ЗКЦ с технически реализуемыми вращательными кинематическими парами пятого класса

Fig. 2. Block diagram of the WCC with technically feasible rotational kinematic pairs of the fifth class

Если в структурной схеме ЗКЦ, показанной на рис. 2, остановить звено  $n_0$ , то получим известный одноподвижный меха-

низм первого семейства (пространственный механизм двойного универсального шарнирах) [16].

### Заклучение

Задача структурного синтеза ЗКЦ первого семейства имеет три этапа.

На первом этапе с помощью универсальной структурной системы ЗКЦ первого семейства находится полный состав решений, описывающих организацию ЗКЦ из  $n_i$  и  $p_k$  по заданным параметрам  $\tau$ ,  $n_u$ .

На втором этапе составляются структурные 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.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Grubler M. Allgemeine Eigenschaften der zwanglaufigen ebenen kinematischen Ketten // Civilingenieur. Leipzig. 1883. № 29. P. 167-200.
2. Дворников Л.Т., Жуковский Н.С. Адаптированный перевод с немецкого языка статьи: Martin Grübler «Allgemeine Eigenschaften der zwangläufigen ebenen kinematischen Ketten», изданной в Лейпциге в 1883 г. // Материалы девятой научной-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Новокузнецк, 2009. С.73-95.
3. Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration and hierarchical classification of planar simple-jointed kinematic chains: Application to 12-and 14-bar single degree-of-freedom chains. -Mechanism and Machine Theory, Volume 40, No. 9, September 2005, p. 1030-1050.
4. Peisach E., Dresig H., Schunherr J., Gerlach S. Typ-und Masssynthese von ebenen Koppelgetrieben mit hoeheren Gliedgruppen (Zwischenbericht zum Fortsetzungsantrag) -DFG-Themennummer: Dr 234/7-1, TU Chemnitz, Professur Maschinendynamik/Schwingunglehre, Professur Getriebelehre, Chemnitz, 1998, 172 S.
5. Пейсах Э.Е. Проблема изоморфизма структур и идентификационный структурный код для замкнутых кинематических цепей // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. СПб, 2008. № 15. С. 40-46.

6. Федоров А.И., Дворников Л.Т. К вопросу о полном составе восьмизвенных плоских цепей Грюблера // *МашиноСтроение*. – Новокузнецк, 2010. № 20. С. 45-51.
7. Вовкотруб В.В. Развитие методов структурного синтеза механизмов первого семейства из замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. – СПб: НИЦ МС, 2022. – № 18. – С. 27-35. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-27-34
8. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов: Учебное пособие. – Новокузнецк: СибГГМА, 1994. – 102 с.
9. Добровольский, В.В. Основные принципы рациональной классификации механизмов // *Структура и классификация механизмов*. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1939. С. 5-48.
10. Артоболевский И.И. Структура, кинематика и кинетостатика многозвенных плоских механизмов. – М.; Л.: ГОНТИ НКТП, СССР. 1939. – 232 с.
11. Дворников Л.Т. Универсальная структурная классификация механизмов // *МашиноСтроение*. – Новокузнецк, 2011. № 21. С. 4-37.
12. Вовкотруб В.В. Механизмы первого семейства. Основы теории // В сборнике: XI Международ-

ная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 60-ой годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей. – Краснодар, 2021. С. 375-378.

13. Вовкотруб В.В. Синтез структур механизмов пятого подсемейства первого семейства // В сборнике: Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского: XII Международная научно-практическая конференция. Сборник научных статей. Краснодар, 2022. С. 214-218.
14. Вовкотруб В.В. Структурный синтез механизмов шестого подсемейства первого семейства // В сборнике: XII Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 61-ой годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей. Краснодар, 2022. С. 169-173.
15. Вовкотруб В.В. Структурный синтез механизмов седьмого подсемейства первого семейства // В сборнике: XII Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 61-ой годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей. Краснодар, 2022. С. 338-343.
16. Артоболевский И.И. Теория механизмов / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1965. – 776 с.

## REFERENCES

1. Grubler M. Allgemeine eigenschaften der zwanglaufigen ebenen kinematischen Ketten. *Civilingenieur*. Leipzig. 1883;29:167-200.
2. Dvornikov LT, Zhukovsky NS. Adapted translation of the article from German: Martin Grübler. Allgemeine eigenschaften der zwanglaufigen ebenen kinematischen Ketten. *Proceedings of the 19th Scientific and Practical Conference on Problems of Mechanics and Mechanical Engineering*. Novokuznetsk; 2009.
3. Butcher EA, Hartman C. Efficient enumeration and hierarchical classification of planar simple-jointed kinematic chains: Application to 12-and 14-bar single degree-of-freedom chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2005;40(9):1030-1050.
4. Peisach E, Dresig H, Schünherr J, Gerlach S. Typ- und Masssynthese von ebenen Koppelgetrieben mit höheren Gliedgruppen (Zwischenbericht zum Fortsetzungsantrag) -DFG-Themennummer: Dr 234/7-1, TU Chemnitz, Professur Maschinendynamik/Schwingunglehre, Professur Getriebelehre, Chemnitz; 1998.
5. Peisah EE. The problem of isomorphism of structures and the identification structural code for closed kinematic chains. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design*. 2008;15:40-46.
6. Fedorov AI, Dvornikov LT. On the problem of the full composition of eight-branched kinematic chains. *Novokuznetsk: Mashinostroenie*; 2010.
7. Vovkotrub VV. Development of methods of structural synthesis of mechanisms of the first family of

closed kinematic chains of movable links. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. St. Petersburg: SIC MS. 2022;18:27-35. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-27-34

8. Dvornikov LT. Theory origins of the structure of mechanisms: textbook. *Novokuznetsk: SibGGMA*; 1994.
9. Dobrovolsky VV. Basic principles of rational classification of mechanisms. *Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences*; 1939.
10. Artobolevsky II. Structure, kinematics and kinetostatics of multi-link flat mechanisms. *Moscow: GONTI NKTP, USSR*; 1939.
11. Dvornikov LT. Universal structural classification of mechanisms. *Novokuznetsk: Mashinostroenie*. 2011;21:4-37.
12. Vovkotrub VV. Mechanisms of the first family. Fundamentals of theory. *Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists dedicated to the 60th anniversary of Yuri Gagarin's flight to space*. Collection of scientific articles; *Krasnodar*; 2021.
13. Vovkotrub VV. Synthesis of structures of the fifth subfamily of the first family mechanisms. In: *Scientific Readings named after Professor N.E. Zhukovsky*. XII International Scientific and Practical Conference. *Krasnodar*; 2022.
14. Vovkotrub VV. Structural synthesis of mechanisms of the sixth subfamily of the first family. *Proceedings of XII International Scientific and Practical*

Conference of Young Scientists dedicated to the 61st anniversary of Yuri Gagarin's flight to space. Collection of scientific articles; Krasnodar; 2022.  
15. Structural synthesis of mechanisms of the seventh subfamily of the first family. Proceedings of XII International Scientific and Practical Conference of

Young Scientists dedicated to the 61st anniversary of Yuri Gagarin's flight to space. Collection of scientific articles; Krasnodar; 2022.  
16. Artobolevsky II. Theory of mechanisms. Moscow: Nauka; 1965.

#### **Информация об авторе:**

**Вовкотруб Валерий Владимирович** – кандидат технических наук, тел. 89183822068 , доцент 105 кафедры механики.

**Vovkotrub Valery Vladimirovich** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics; phone: 89183822068.

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 22.03.2023; одобрена после рецензирования 30.04.2023; принята к публикации 26.05.2023. Рецензент – Шальгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 22.03.2023; approved after review on 30.04.2023; accepted for publication on 26.05.2023. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.**