

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 621.01  
doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-31-40

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ВОСЬМИЗВЕННЫХ ЗАМКНУТЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОДВИЖНЫХ ЗВЕНЬЕВ ЧЕТВЕРТОГО ПОДСЕМЕЙСТВА 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 четвертое подсемейство первого семейства.

Задачи: на основе универсальной структурной системы замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства, определить состава решений, описывающих организацию замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев четвертого подсемейства первого семейства при сложности базисного звена цепи, равной четырем, подвижности цепи равной шести и общем числе звеньев цепи, равном восьми. Произвести идентификацию виртуальных звеньев цепи и получить сочетания кинематических пар и звеньев, являющихся основой для построения структурных схем восьмизвенных замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев четвертого подсемейства первого семейства, при сложности базисного звена цепи равной четырем. Используя полученные данные, рассмотреть на конкретном примере процесс построения структурных схем восьмизвенных замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства.

Методы исследования: метод структурного синтеза замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства, теория множеств и

комбинаторика, виртуализация, идентификация и кодирование, теория графов.

Новизна работы: раскрыты особенности применения универсальной структурной системы для определения состава восьмизвенных замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев четвертого подсемейства первого семейства. На конкретном примере, рассмотрен процесс построения структурных схем, восьмизвенных замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев четвертого подсемейства первого семейства.

Результаты исследования: найдены сочетания кинематических пар и звеньев, позволяющие построить все возможные структурные схемы восьмизвенных замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев четвертого подсемейства первого семейства при заданных параметрах. Получена структурная схема восьмизвенной замкнутой кинематической цепи подвижных звеньев четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида, из которой путем остановки одного из звеньев, могут образовываться одноподвижные восьмизвенные механизмы первого семейства. Показана структурная схема одного из таких механизмов: винто-рычажного механизма первого семейства.

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

Ссылка для цитирования:

Вовкотруб В.В. Структурный синтез восьмизвенных замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев четвертого подсемейства первого семейства / В.В. Вовкотруб // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 6. – С. 31-40. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-31-40.

Original article  
Open Access Article

## STRUCTURAL SYNTHESIS OF EIGHT-BAR CLOSED KINEMATIC CHAINS OF THE FOURTH SUBFAMILY MOVING LINKS OF THE FIRST FAMILY

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

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

© Вовкотруб В. В., 2024

## Abstract

The study objective is to develop a method for the structural synthesis of closed kinematic chains of moving links onto the fourth subfamily of the first family.

The tasks are the following: based on the universal structural system of closed kinematic chains of the first family movable links to determine the composition of solutions describing the arrangement of closed kinematic chains of the fourth subfamily movable links of the first family with the complexity of the basic chain link equal to four, chain mobility equal to six and the total number of chain links equal to eight. To identify virtual chain links and obtain combinations of kinematic pairs and links that are the basis for constructing structural schemes of eight-bar closed kinematic chains of the fourth subfamily moving links of the first family, with the complexity of the basic chain link equal to four. Using the obtained data, to consider constructing structural schemes of eight-bar closed kinematic chains of moving links of the first family on a specific example.

Research methods are the method of structural synthesis of closed kinematic chains of moving links of

the first family, set theory and combinatorics, virtualization, identification and coding, graph theory.

The novelty of the work: the features of applying a universal structural system for determining the composition of eight-bar closed kinematic chains of the fourth subfamily moving links of the first family are given. Using a specific example, constructing structural schemes, eight-bar closed kinematic chains of the fourth subfamily moving links of the first family is considered.

The study results: combinations of kinematic pairs and links are found, which make it possible to construct all possible structural schemes of eight-bar closed kinematic chains of the fourth subfamily moving links of the first family under given parameters. A diagram of an eight-bar closed kinematic chain of the fourth subfamily movable links of the first is obtained, from which single-movable eight-bar mechanisms of the first family can be formed by stopping one of the links. A diagram of one of these mechanisms is shown: a screw and lever mechanism of the first family.

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

## Reference for citing:

Vovkotrub VV. Structural synthesis of eight-bar closed kinematic chains of the fourth subfamily moving links of the first family. *Transport Engineering*. 2024;6:31-40. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-31-40.

## Введение

Метод создания многозвенных плоских механизмов М. Грюблера [1, 2] получил широкое распространение в западных странах (особенно в Германии) [3, 4, 5]. Суть метода М. Грюблера состоит в определении сочетаний звеньев и кинематических пар замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев (далее – ЗКЦ), и построении на их основе полного многообразия вариантов структурных схем ЗКЦ, из которых путем остановки одного из звеньев могут образовываться одноподвижные механизмы. Метод разработан М. Грюблером для плоских цепей, и до настоящего времени, не получил принципиального развития на ЗКЦ первого семейства. В работе [6] рассмотрена возможность применения универсальной структурной систе-

мы профессора Л.Т. Дворникова [7,8] для развития метода М. Грюблера на ЗКЦ первого семейства. Приведена универсальная структурная система ЗКЦ первого семейства. В настоящей статье, рассмотрим особенности применения универсальной структурной системы ЗКЦ первого семейства для определения состава замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев четвертого подсемейств первого семейства, при сложности базисного звена цепи равной четырем, подвижности цепи равной шести и общем числе звеньев цепи равным восьми. На конкретном примере покажем порядок применения полученных решений для синтеза структурных схем восьмизвенных замкнутых кинематических цепей подвижных звеньев первого семейства.

## Основная часть

Универсальная структурная система ЗКЦ первого семейства, при числе звеньев,

не добавляющих в цепь кинематических пар  $n_0 = 1$ , имеет вид [6]:

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

где  $W_{ц1}$  – подвижность ЗКЦ первого семейства;  $n_y$  – 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.

Заменяя в системе уравнений (1) структурную формулу подвижности ЗКЦ первого семейства (третье уравнение системы) на формулу подвижности четвертого подсемейства ЗКЦ данного семейства [6], получим исходную систему уравнений для четвертого подсемейства первого семейства ЗКЦ:

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

При  $\tau = 4$ , система уравнений (2) примет вид:

$$\begin{cases} p = 4 + 3n_3 + 2n_2 + n_1, \\ n_y = 2 + n_3 + n_2 + n_1, \\ W_{ц1(4)} = 5n_y - 4p_5 - 3p_4 = 6. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений (3) позволяет находить все возможные структуры четвертого подсемейства первого семейства ЗКЦ четвертого вида, для заданных значений  $n_y$ .

Рассмотрим решение системы уравнений (3) для значений  $n_y = 8$ .

Решение системы (3) сводится к отысканию параметров  $p_5, p_4$  и  $n_i$ .

Для четвертого подсемейства:  $p_5 \neq 0$ ,  $p_4 \neq 0$ .

При  $n_y = 8$  система уравнений (3) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 = 10 + 2n_3 + 1n_2, \\ n_1 = 6 - n_3 - n_2, \\ 4p_5 + 3p_4 = 34. \end{cases} \quad (4)$$

Задаваясь  $n_2 = 0, n_3 = 0$  получим  $n_1 = 6$ , а  $p_5 + p_4 = 10$ .

Тогда система (4) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 = 10, \\ 4p_5 + 3p_4 = 34. \end{cases} \quad (5)$$

Система (5) имеет единственное решение:

$$p_5 = 4, p_4 = 6. \quad (I)$$

Задаваясь  $n_2 = 1, n_3 = 0$  получим  $n_1 = 5$ , а  $p_5 + p_4 = 11$ .

Тогда система (4) примет вид:

$$\begin{cases} p_5 + p_4 = 11, \\ 4p_5 + 3p_4 = 34. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) имеет единственное решение:

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

При других значениях  $n_2$  и  $n_3$  система (4) не имеет решений.

Сведем полученные решения в табл. 1.

При построении структурных схем ЗКЦ на основе приведенных в табл. 1 решений, необходимо учитывать важную особенность универсальной структурной системы профессора Л.Т. Дворникова.

Таблица 1

Решения, описывающие организацию восьмизвенных ЗКЦ четвертого подсемейств первого семейства, при сложности базисного звена цепи равной четырем

Table 1

*Solutions describing the arrangement of eight-bar closed kinematic chains of the fourth subfamily of the first family, with the complexity of the basic chain link equal to four*

№ решения	Общее число звеньев цепи, $n_u$	Общее число кинематических пар, $p$	Решения, описывающие организацию ЗКЦ из $n_i$ и $p_k$
1	8	10	$n_\tau = 1, n_0 = 1, n_1 = 6, n_2 = 0, n_3 = 0, p_5 = 4, p_4 = 6;$
2	8	11	$n_\tau = 1, n_0 = 1, n_1 = 5, n_2 = 1, n_3 = 0, p_5 = 1, p_4 = 10.$

В данной системе сложность звеньев отождествляется с числом кинематических пар, привносимых звеном в кинематическую цепь, поэтому численные значения  $n_0, n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots, n_{\tau-1}$ , представляют собой количества, так называемых, виртуальных звеньев [9]. Например, звено  $n_1$ , привносящее в цепь одну кинематическую пару, может по факту быть и двупарным, и трехпарным, и четырехпарным, а звено привносящее в цепь две кинематические пары, может по факту быть и трехпарным и четырехпарным. В реальные звенья они превращаются лишь в процессе построения структурной схемы. Сложность звена при этом определяется числом выходов фрагмента цепи, к которому оно присоединяется, и числа кинематических пар, привносимым этим звеном в цепь [10].

Поэтому, приведенные в табл. 1 решения, могут быть эффективно использованы при построении структурных схем восьмизвенных ЗКЦ первого семейства четвертого вида, только после идентификации виртуальных звеньев.

Для идентификации виртуальных звеньев ЗКЦ, используем теорему Эйлера для графов [11], которая гласит: сумма степеней вершин графа равна удвоенному количеству его ребер. По отношению к ЗКЦ теорему Эйлера можно представить в виде следующего уравнения:

$$2p = \sum_{j=2}^{\tau} jn_j \quad (7)$$

где  $p$  – общее число кинематических пар ЗКЦ;  $n_j$  – количество  $j$  – парных звеньев.

Результаты идентификации виртуальных звеньев представлены в таблицу 2.

Таблица 2

Состав звеньев восьмизвенных ЗКЦ четвертого вида

Table 2

*Composition of the links of the eight-bar closed kinematic chains of the fourth type*

Общее число звеньев цепи, $n_u$	Общее число кинематических пар цепи, $p$	Состав звеньев цепи		
		4-х парные	3-х парные	2-х парные
8	10	1	2	5
		2	0	6
8	11	2	2	4
		3	0	5

Полученные в результате проведенных исследований решения, представленные в табл. 1 и 2, являются основой для

построения структурных схем восьмизвенных ЗКЦ четвертого подсемейств первого семейства четвертого вида.

### Пример синтеза структурных схем восьмизвенных ЗКЦ четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида

Рассмотрим на конкретном примере особенности построения структурных схем

восьмизвенных ЗКЦ четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида на

основе решений, приведенных в таблицах 1 и 2.

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

$$\tau = 4, n_u = 8, p = 10.$$

Для такой ЗКЦ в табл. 1 имеется решение под №1:

$$n_\tau = 1, n_0 = 1, n_1 = 6, n_2 = 0, n_3 = 0,$$

$$p_5 = 4, p_4 = 6.$$

В табл. 2 для значений  $n_u = 8$  и  $p = 10$  показано два возможных варианта состава звеньев ЗКЦ по сложности:

Первый вариант включает: одно четырехпарное, два трехпарных и пять двухпарных звеньев.

Второй вариант включает: два четырехпарных и шесть двухпарных звеньев.

Учитывая, что для синтеза структурных схем ЗКЦ по первому варианту требуются три вида звеньев по сложности, а по второму – два вида, выбираем второй вариант, как более технологичный.

Синтез структурных схем ЗКЦ по заданным параметрам проведем в три этапа:

На первом этапе, определяем все возможные структурные схемы восьмизвенных ЗКЦ, которые могут быть построены для второго варианта сочетаний звеньев, без учета класса кинематических пар цепи, то есть на данном этапе соединения звеньев в схемах показываем условными, так называемыми виртуальными кинематическими парами.

За основу при разработке данных структурных схем принимаем структурные схемы восьмизвенных ЗКЦ Грюблера четвертого вида №8ЦГ15 и №8ЦГ16 [12].

В результате получаем две структурные схемы ЗКЦ с виртуальными кинематическими парами (рис. 1).

Квадратами в схемах на рис. 1 показаны связи – виртуальные кинематические пары.

На втором этапе, производим замену в структурных схемах ЗКЦ, виртуальных кинематических пар на классы кинематических пар, разрешенные к применению. В нашем случае, это кинематические пары

пятого и четвертого класса, в количествах  $p_5 = 4, p_4 = 6$ .

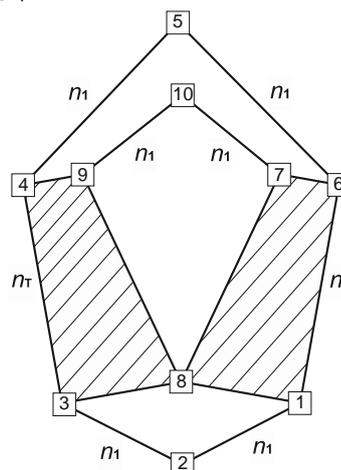


Схема 1

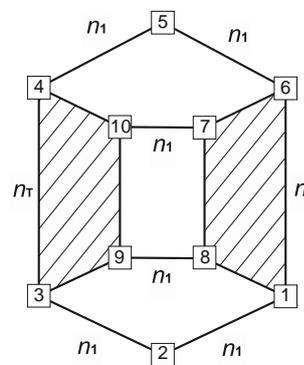


Схема 2

Рис. 1. Структурные схемы восьмизвенных ЗКЦ с виртуальными кинематическими парами  
Fig. 1. Diagrams of an eight-bar closed kinematic chain with virtual kinematic pairs

Данную процедуру проводим в следующем порядке:

1) нумеруем виртуальные пары от 1 до 10 (рис. 1);

2) определяем все возможные варианты расстановки кинематических пар пятого и четвертого класса, на местах расположения виртуальных пар;

3) для каждого варианта формируем структурную схему ЗКЦ с условными классами кинематических пар.

Для определения количества  $R$  возможных вариантов расстановки заданного числа кинематических пар пятого и четвертого класса на местах расположения виртуальных пар используем известную из комбинаторики формулу [13], которая для нашего случая имеет вид:

$$R = \frac{p!}{p_4 \times p_5!} \quad (8)$$

Подставив в формулу (8) значения  $p = 10$ ,  $p_5 = 4$ ,  $p_4 = 6$ , получим общее количество вариантов расстановки кинематических пар  $R = 210$ .

В табл. 3 показаны все 210 вариантов расстановки кинематических пар. Каждый вариант имеет свой номер и код из 10 цифр, цифра «1» кода соответствует кинематической паре пятого класса, а цифра «0» четвертого. Замена виртуальных пар на условные классы кинематических пар, проводится на основе вариантов расстановки в порядке нумерации виртуальных пар на схемах.

В результате замены виртуальных кинематических пар в структурных схемах ЗКЦ, изображенных на рис. 1, кинематическими парами пятого и четвертого класса, можно получить 210 вариантов структурных схем ЗКЦ с условными классами кинематических пар на одну схему ЗКЦ с виртуальными парами.

На рис. 2, приведена структурная схема ЗКЦ полученная в результате замены виртуальных пар в схеме 1, изображенной на рис. 1, на условные классы кинема-

тических пар, в соответствии с вариантом расстановки № 18 табл. 3.

На третьем этапе, выбираем пространство функционирования звеньев цепи, и заменяя в схемах ЗКЦ условные классы кинематических пар технически реализуемыми парами с конкретным комплексом движений, строим все возможные структурные схемы восьмизвенных ЗКЦ четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида для данного пространства.

Если выбрать пространство функционирования цепи ВПВП и заменить в структурной схеме ЗКЦ, изображенной на рис. 2, условные классы кинематических пар на виды технически реализуемых, получим структурную схему восьмизвенной ЗКЦ четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида, приведенную на рис. 3, из которой путем остановки одного из звеньев, могут образовываться одноподвижные восьмизвенные механизмы первого семейства.

Структурная схема одного из таких механизмов – восьмизвенного винто-рычажного механизма четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида показана на рис. 4.

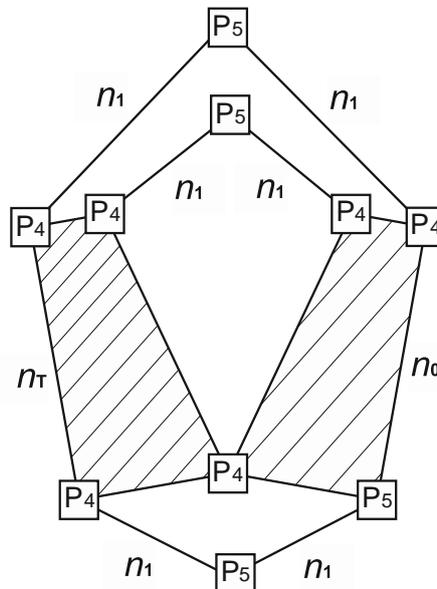


Рис. 2. Структурная схема восьмизвенной ЗКЦ с условными классами кинематических пар, разрешенными к применению

Fig. 2. Diagram of an eight-bar closed kinematic chain with conditional classes of kinematic pairs to use

Варианты расстановки кинематических пар P<sub>5</sub> и P<sub>4</sub> на схемах*Types of the arrangement of P5 and P4 kinematic pairs in diagrams*

№	Код	№	Код	№	Код	№	Код
1	111100000	54	100110001	107	010110100	160	0010101100
2	111010000	55	100101100	108	0101100100	161	0010101010
3	111001000	56	100101010	109	0101100010	162	0010101001
4	111000100	57	100101001	110	0101100001	163	0010100110
5	111000010	58	100101000	111	0101011000	164	0010100101
6	111000001	59	1001001100	112	0101010100	165	0010100011
7	111000000	60	1001001010	113	0101010010	166	0010011100
8	110110000	61	1001001001	114	0101010001	167	0010011010
9	110101000	62	1001000110	115	0101001100	168	0010011001
10	110100100	63	1001000101	116	0101001010	169	0010010110
11	110100010	64	1001000011	117	0101001001	170	0010010101
12	110100001	65	1000111000	118	0101000110	171	0010010011
13	110100000	66	1000110100	119	0101000101	172	0010001110
14	110011000	67	1000110010	120	0101000011	173	0010001101
15	110010100	68	1000110001	121	0100111000	174	0010001011
16	110010010	69	1000101100	122	0100110100	175	0010000111
17	110010001	70	1000101010	123	0100110010	176	0001111000
18	110010000	71	1000101001	124	0100110001	177	0001110100
19	110001100	72	1000100110	125	0100101100	178	0001110010
20	110001010	73	1000100101	126	0100101010	179	0001110001
21	110001001	74	1000100011	127	0100101001	180	0001101100
22	110001000	75	1000011100	128	0100100110	181	0001101010
23	110000110	76	1000011010	129	0100100101	182	0001101001
24	110000101	77	1000011001	130	0100100011	183	0001100110
25	110000100	78	1000010110	131	0100011100	184	0001100101
26	110000011	79	1000010101	132	0100011010	185	0001100011
27	110000010	80	1000010011	133	0100011001	186	0001011100
28	110000001	81	1000001110	134	0100010110	187	0001011010
29	101110000	82	1000001101	135	0100010101	188	0001011001
30	101101000	83	1000001011	136	0100010011	189	0001010110
31	101100100	84	1000000111	137	0100001110	190	0001010101
32	101100010	85	0111100000	138	0100001101	191	0001010011
33	101100001	86	0111010000	139	0100001011	192	0001001110
34	101100000	87	0111001000	140	0100000111	193	0001001101
35	101011000	88	0111000100	141	0011110000	194	0001001011
36	101010100	89	0111000010	142	0011101000	195	0001000111
37	101010010	90	0111000001	143	0011100100	196	0000111100
38	101010001	91	0110110000	144	0011100010	197	0000111010
39	101010000	92	0110101000	145	0011100001	198	0000111001
40	101001100	93	0110100100	146	0011011000	199	0000110110
41	101001010	94	0110100010	147	0011010100	200	0000110101
42	101001001	95	0110100001	148	0011010010	201	0000110011
43	101001000	96	0110011000	149	0011010001	202	0000101110
44	101000110	97	0110010100	150	0011001100	203	0000101101
45	101000101	98	0110010010	151	0011001010	204	0000101011
46	101000100	99	0110010001	152	0011001001	205	0000100111
47	101000011	100	0110001100	153	0011000110	206	0000011110
48	101000010	101	0110001010	154	0011000101	207	0000011101
49	101000001	102	0110001001	155	0011000011	208	0000011011
50	100111000	103	0110000110	156	0010111000	209	0000010111
51	100110100	104	0110000101	157	0010110100	210	0000001111
52	100110010	105	0110000011	158	0010110010		
53	100110001	106	0101110000	159	0010110001		

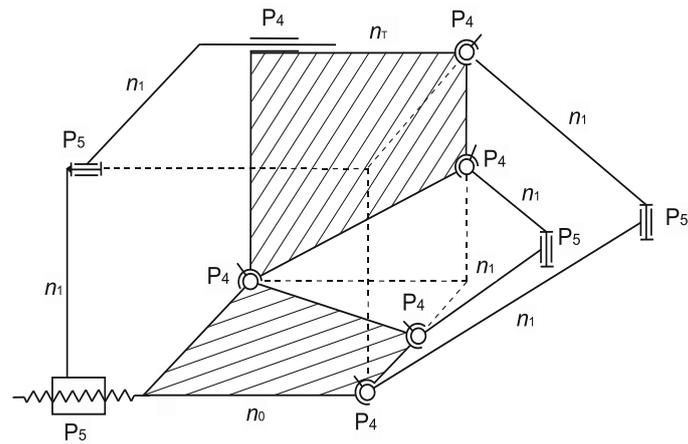


Рис. 3. Структурная схема восьмизвенной ЗКЦ четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида  
 Fig. 3. Diagram of the fourth type eight-bar closed kinematic chain of the fourth subfamily of the first family

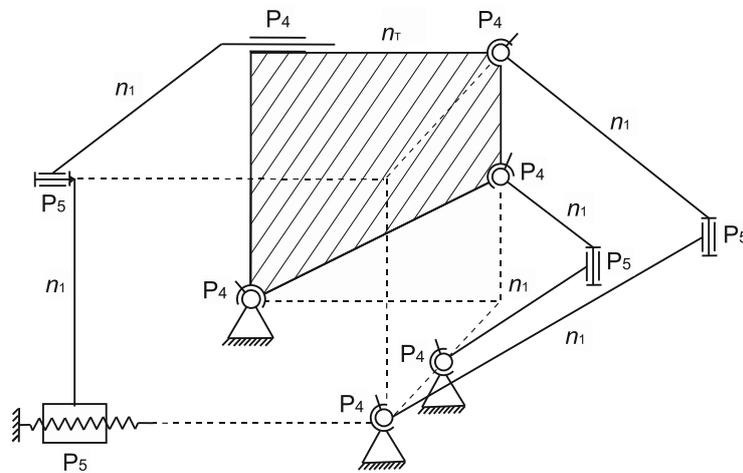


Рис. 4. Структурная схема восьмизвенного винто-рычажного механизма четвертого подсемейства первого семейства четвертого вида  
 Fig. 4. Diagram of the fourth type eight-bar screw and lever mechanism of the fourth subfamily of the first family

### Заклучение

Задачу структурного синтеза восьмизвенных ЗКЦ первого семейства рекомендуется решать в следующем порядке:

а) с помощью универсальной структурной системы ЗКЦ (1) находится полный состав решений, описывающих организацию ЗКЦ из  $n_i$  и  $p_k$  по заданным параметрам  $\tau$ ,  $k$ ,  $n_u$ ;

б) с помощью уравнения (7) проводится идентификация виртуальных звеньев;

в) строятся структурные схемы восьмизвенных ЗКЦ с виртуальными кинематическими парами;

г) проводится нумерация виртуальных пар, и разрабатываются все возможные варианты расстановки кинематических пар, разрешенных к применению, на местах установки виртуальных пар в порядке их нумерации;

д) на основе вариантов расстановки кинематических пар, разрешенных к применению, строятся все возможные структурные схемы восьмизвенных ЗКЦ с условными классами кинематических пар;

е) выбирается пространство функционирования восьмизвенной ЗКЦ первого семейства;

ё) в схемах ЗКЦ, заменяются условные классы кинематических пар технически реализуемыми парами с конкретным комплексом движений, и строятся все

возможные структурные схемы восьмизвенных ЗКЦ первого семейства для данного пространства.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Grubler M. Allgemeine Eigenschaften der zwangläufigen 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 девятнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения*. - Новокузнецк, 2009. С.73-95.
3. 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.
4. 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.
5. Федоров А.И., Дворников Л.Т. К вопросу о полном составе восьмизвенных плоских цепей Грюблера // *Машиностроение*. – Новокузнецк, 2010. № 20. С. 45-51.

6. 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, 2023. № 18. С. 27-35.
7. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов: Учебное пособие. Новокузнецк: СибГГМА, 1994. 102 с.
8. Дворников Л.Т. Универсальная структурная классификация механизмов / Л.Т. Дворников. Новокузнецк: Машиностроение, 2011. № 21. С. 4-37.
9. Степанов А.В. Виртуализация в задачах компьютерного синтеза структур механизмов // *Вестник КузГТУ*. 2007. № 3(61). С. 47-50.
10. Степанов А.В. Развитие алгоритмов расчета состава кинематических цепей// *Вестник КузГТУ*. 2014. № 4(104). С. 57-60.
11. Домнин, Л.Н. Элементы теории графов / Л.Н. Домнин. Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. 139 с.
12. Пейсах Э.Е. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера). // *Часть 1. Теория механизмов и машин*. 2008. № 1. Т. 6. С. 4-14.
13. Андерсон Д.А. Дискретная математика и комбинаторика. Пер. с англ. Москва: Вильямс, 2004. 960 с.

## REFERENCES

1. Grubler M. Allgemeine Eigenschaften der zwangläufigen ebenen kinematischen Ketten. *Civilingenieur*. Leipzig. 1883;29:167-200.
2. Dvornikov LT, Zhukovsky NS. Adapted translation from German of the article: Martin Grübler "Allgemeine Eigenschaften der zwangläufigen ebenen kinematischen Ketten". *Proceedings of the 19th Scientific and Practical Conference on Problems of Mechanics and Machine Building*. Novokuznetsk; 2009.
3. Peisakh EE. The problem of isomorphism of structures and the identification structural code for closed kinematic chains. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technologies and Design*. 2008;15:40-46.
4. 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.

5. Fedorov AI, Dvornikov LT. To the problem of the full composition of eight-bar flat Grubler chains. *Novo-Kuznetsk: Mashinostroenie*. 2010;20:45-51.
6. Vovkotrub VV. Development of methods of structural synthesis of the first family mechanisms of closed kinematic chains with moving links. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2023;18:27-35.
7. Dvornikov LT. The beginnings of the theory of mechanism structure: textbook. *Novokuznetsk: SibGGMA*; 1994.
8. Dvornikov LT. Universal structural classification of mechanisms. *Novokuznetsk: Mashinostroenie*. 2011;21:4-37.
9. Stepanov AV. Virtualization in the tasks of computer synthesis of structures of mechanisms. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2007;3(61):47-50.

10. Stepanov AV. Development of algorithms for calculating the composition of kinematic chains. Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2014;4(104):57-60.
11. Domnin LN. Elements of graph theory. Penza: Publishing House of PSU; 2004.

12. Peisakh EE. Structural synthesis of closed kinematic chains (Grubler chains). Theory of Mechanisms and Machines. 2008;1(6):4-14.
13. Anderson DA. Discrete mathematics and combinatorics. Moscow: Williams; 2004.

**Информация об авторе:**

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

**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 08.04.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 26.05.2024. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 08.04.2024; approved after review on 12.04.2024; accepted for publication on 26.05.2024. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.