

УДК 621.01(075.8)

doi: 10.18698/0536-1044-2020-1-21-31

Структурный синтез семейства плоских восьмизвенных кинематических цепей рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложным трехшарнирным звеном

В.И. Пожбелко, Е.Н. Куц

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Structural Synthesis of a Family of Planar 8-Link Kinematic Chains for Linkages with Multiple Joints and the Most Complex Ternary Link

V.I. Pozhbelko, E.N. Kuts

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — South Ural State University (National Research University)

Структурный синтез замкнутых кинематических цепей для создания на их основе разнообразных механизмов является первым и наиболее проблемным (вследствие большой многовариантности структурных решений) этапом креативного проектирования сложных машин. Рассмотрена задача структурного синтеза возможного семейства плоских восьмизвенных рычажных кинематических цепей с различными многократными шарнирами и наиболее сложным трехшарнирным звеном для построения одноподвижных многоконтурных механизмов с многократными шарнирами. Для решения задачи предложена методика синтеза, основанная на поиске всех целочисленных решений обобщенной структурной математической модели плоских рычажных механизмов и выявлении всех структурно-неизоморфных кинематических цепей с помощью двухстолбцовой P -матрицы. В результате структурного синтеза получено семейство восьмизвенных кинематических цепей с многократными шарнирами, содержащее семь новых кинематических структур. Приведены примеры создания одноподвижных механизмов с многократными шарнирами на базе полученных структур, подтверждающие эффективность использования структурного синтеза и анализа сложных механизмов с многократными шарнирами в разных областях современного машиностроения (в точных направляющих механизмах, автоматических линиях, технологических машинах, роботах, манипуляторах и др.).

Ключевые слова: структурный синтез, MJ-механизм, независимые замкнутые контуры, трехшарнирное звено, многократный шарнир

Structural synthesis of closed kinematic chains to create various mechanisms is the first and most difficult stage of creative design of complex machines due to the large variance of possible structural solutions. In this paper, the authors examine the problem of structural synthesis of a family of eight-link kinematic chains with multiple joints of various types and the most complex three-joint link in order to create multi-loop multiple-joint mechanisms with one degree of freedom. To solve this problem, a synthesis technique is proposed based on the search for all integer solutions of a generalized structural mathematical model of plane linkage mechanisms and the identification of all structurally nonisomorphic

kinematic chains using a two-column P -matrix. As the result of the structural synthesis, a family of eight-link multiple joint kinematic chains is obtained, which contains seven new kinematic structures. Examples of creating 1-DOF mechanisms with multiple joints based on the obtained new structures are presented. They confirm the effectiveness of using the structural synthesis procedure and analysis of complex mechanisms with multiple joints in various areas of modern engineering (precise guiding mechanisms, automatic lines, technological machines, robots, manipulators, etc.).

Keywords: structural synthesis, MJ-mechanism, independent closed loops, three-joint link, multiple joint

Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (КЦ) для конструирования на их основе разнообразных механизмов является одним из важнейших этапов проектирования сложных машин [1–13]. Ученые-механики долгое время развивали методы синтеза только для КЦ с однократными шарнирами (Simple Joints — SJ) [14–19]. Для структурного синтеза таких КЦ применялись различные методы [20, 11], основанные на использовании групп Ассур, комбинаторики, теории графов и матриц смежности [21, 22].

КЦ с многократными шарнирами (МКШ), называемые в зарубежной литературе multiple joints (MJ), стали широко применять в современной технике для создания многоконтурных механизмов (MJ-механизмов), так как конструкции с МКШ имеют более компактную структуру, меньшую массу и расширенные функциональные возможности.

Поэтому в последние годы многие исследователи изучают структурный синтез КЦ с МКШ [23, 24]. Однако задача структурного синтеза КЦ с МКШ является наиболее сложной, что связано с необходимостью расчета количества и ассортимента МКШ разного типа.

На сегодняшний день задача структурного синтеза имеет характерную особенность: невозможно заранее рассчитать число различных структур, удовлетворяющих начальным условиям синтеза. Это требует проверки на изоморфность всех синтезируемых на ЭВМ структур, число которых имеет порядок факториала от общего числа звеньев КЦ (сотни тысяч схем) [25–27]. В связи с этим разработка эффективных методов проверки изоморфности синтезированных схем становится особенно актуальной.

Цель работы — решение задачи структурного синтеза возможного семейства плоских восьмизвенных КЦ с МКШ и наиболее сложным трехшарнирным звеном для создания мно-

гоконтурных плоских рычажных MJ-механизмов в одноподвижных приводах сложных машин.

Для решения указанной задачи предлагается использовать комплексный подход профессора В.И. Пожбелко [28–30], заключающийся в выборе числа K независимых замкнутых контуров в качестве основного структурного параметра, в составлении системы структурных уравнений (представляющих собой единую структурную математическую модель механических систем) и в поиске на ее основе всех возможных целочисленных структурных решений [30–33]. Выявление всех структурно-неизоморфных (т. е. неповторяющихся) КЦ будет осуществляться с помощью двухстолбцовой P -матрицы.

Базовые понятия в теории MJ-механизмов.

Рассмотрим замкнутую КЦ механизма с МКШ как совокупность двух- (числом n_2), трех- (числом n_3), ..., i -вершинных (числом n_i) звеньев, подвижно соединенных между собой однократными и/или многократными связями (шарнирами).

С учетом стойки общее число звеньев MJ-механизма

$$\tilde{n} = n_2 + n_3 + n_4 + \dots + n_i.$$

Ассортимент этих звеньев в конкретной КЦ механизма с изменяемыми замкнутыми контурами числом L определяется выражением

$$[LA]_V = [n_2 \ n_3 \ n_4 \ \dots \ n_i], \quad (1)$$

V — общий MJ-фактор, вводимый при структурном синтезе разных КЦ с SJ-цепями ($V = 0$) и MJ-цепями ($V \geq 1$).

В замкнутой КЦ различают взаимно независимые замкнутые контуры числом $K = L - 1$, которые отличаются друг от друга хотя бы одним звеном или одной кинематической парой. В сложных MJ-механизмах для точного расчета числа взаимно независимых контуров можно

использовать предложенную в работе [28] общую формулу

$$K = 1 + \frac{1}{2} \left[V + \sum_{i=2}^{i_{\max}} (i-2)n_i \right] = 1 + \frac{1}{2} (V + n_3 + 2n_4 + \dots), \quad (2)$$

где i — число шарниров; i_{\max} — максимальное число шарниров.

Общий МЖ-фактор V , введенный в выражение (2) для учета в КЦ числа и разных видов шарниров, определяется следующим образом [28]:

$$V = \sum_{j=2}^{j_{\max}} (j-1)v_j = v_2 + 2v_3 + 3v_4 + \dots + (j_{\max} - 1)v_{j_{\max}}; \quad (3)$$

$$0 \leq V \leq 2(K-1),$$

где j , j_{\max} и v_j — кратность, максимальная кратность и число МКШ в K -контурной КЦ ($K \geq 2$).

Для определения числа степеней свободы F в плоских МЖ-механизмах можно использовать предложенную в работе [28] новую формулу подвижности

$$F = \sum_{i=2}^{i_{\max}} (3-i)n_i - V - 3 + f = (n_2 - 3) - [n_4 + \dots + (3 - i_{\max})n_{i_{\max}}] - V + f, \quad (4)$$

где f — дополнительная подвижность.

В отличие от известных классических формул подвижности [1–3, 7] новое структурное уравнение (4) впервые содержит следующие составляющие:

- общий МЖ-фактор V , учитывающий по формуле (3) разные виды ($j_2, j_3, j_4, \dots, j_{\max}$) и

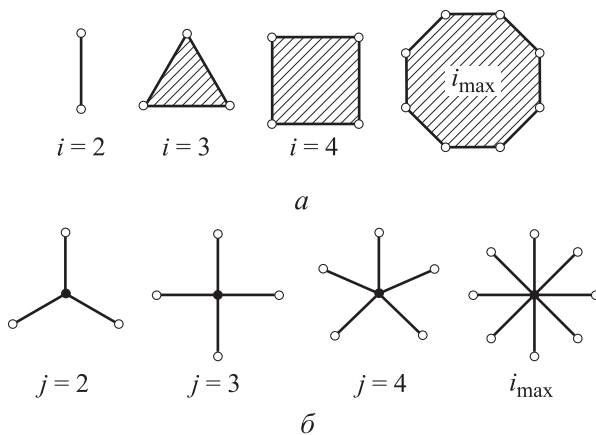


Рис. 1. Структурное представление:
 а — многошарнирных звеньев ($2 \leq i \leq i_{\max}$);
 б — многократных подвижных соединений звеньев ($2 \leq j \leq j_{\max}$)

число ($v_2, v_3, v_4, \dots, v_{j_{\max}}$) МКШ каждого вида (т. е. число v_2 двукратных шарниров j_2 и т. д. до $v_{j_{\max}}$);

- полный ассортимент $[LA]_V$ типа (1) требуемого числа n_i двух- ($i = 2$) и многошарнирных ($i \geq 3$) звеньев, необходимых для построения целого семейства МЖ-механизмов;

- дополнительную подвижность ($f \geq 0$) всех высших кинематических пар.

Это позволяет эффективно использовать формулу подвижности (4) для решения сложных задач структурного синтеза и анализа многоконтурных МЖ-механизмов при заданных входных параметрах синтеза F, K и V .

Проблему поиска структурно повторяющихся цепей (изоморфных) можно решить с помощью предложенной в работе [34] простой двухстрочной идентификационной \mathbf{P} -матрицы

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} R_L^{(*)} \\ r_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^a - B^b - C^c - \dots - L_{S_{\max}}^q \\ 2, 3, 4, 5, \dots, r_{\max} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $R_L^{(*)}$ — ассортимент замкнутых контуров данной КЦ; $A, B, C, \dots, L_{S_{\max}}$ — число сторон в каждом из замкнутых контуров, включая их максимальное число $L_{S_{\max}}$; a, b, c, \dots, q — показатель, учитывающий число многократных шарниров в каждом замкнутом контуре КЦ; r_k — ассортимент в виде числовой последовательности рангов ($2, 3, 4, 5, \dots, r_{\max}$) звеньев, образующих данный замкнутый контур, значение ранга r_k для каждого из звеньев равно сумме шарниров всех звеньев, присоединенных к конкретному звену данной КЦ; r_{\max} — наибольшее значение ранга звена.

Согласно новой концепции неизоморфности [34], две сравниваемые между собой по внутреннему строению МЖ- или СЖ-структуры a и b являются различными, если имеет место численное несовпадение между собой хотя бы одной строки в их матрицах вида $(\mathbf{P})_a$ и $(\mathbf{P})_b$ в случае выполнения неравенства

$$(\mathbf{P})_a \neq (\mathbf{P})_b.$$

В работе [34] показан пример расчета и практического применения \mathbf{P} -матриц вида (5) для установления неизоморфности всего семейства синтезированных восьмизвенных КЦ только с однократными шарнирами.

Структурное представление разнообразных многошарнирных звеньев ($2 \leq i \leq i_{\max}$) и многократных подвижных соединений звеньев ($2 \leq j \leq j_{\max}$) при синтезе и анализе многозвенных КЦ показано на рис. 1.

Целочисленное решение задачи структурного синтеза МЖ-цепей. Для точного аналитического решения задачи структурного синтеза возможного семейства плоских КЦ одноподвижных механизмов ($F = 1$) с МКШ ($V \geq 1$) и наиболее сложным трехшарнирным звеном ($i_{\max} = 3$) с общим числом замкнутых контуров $K = 3$ используем общую для плоских рычажных механизмов *структурную математическую модель В.И. Пожбелко* [28, 30]

$$\begin{cases} \sum_{i=2}^{i_{\max}} n_i = F + 2K + 1; \\ \sum_{i=2}^{i_{\max}} i n_i = 2(F + 3K) - V; \\ \sum_{j=2}^{j_{\max}} (j-1)v_j = V; \\ i_{\max} \leq K + F, \quad j_{\max} \leq K + F. \end{cases} \quad (6)$$

После подстановки в формулу (6) заданных входных параметров синтеза $F = 1$ и $V \geq 1$ получаем систему линейных структурных уравнений

$$\begin{cases} \tilde{n} = n_2 + n_3 = 8; \\ 2n_2 + 3n_3 = 20 - V; \\ v_2 + 2v_3 = V \geq 1. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) имеет только два целочисленных решения, представляющих собой наборы многошарнирных звеньев,

$$\begin{cases} (1) \quad V = 1, n_2 = 5, n_3 = 3, n_4 = 0 \Rightarrow \\ \quad \Rightarrow [LA]_{V=1} = [n_2 n_3 n_4] = [530]; \\ (2) \quad V = 2, n_2 = 6, n_3 = 2, n_4 = 0 \Rightarrow \\ \quad \Rightarrow [LA]_{V=2} = [n_2 n_3 n_4] = [620], \end{cases}$$

на основе которых синтезировано расширенное до 24 структур возможное семейство неизоморфных восьмизвенных МЖ-цепей, представленных в виде сводного атласа на рис. 2 и имеющих разные \mathbf{P} -матрицы вида (5).

При составлении идентификационной \mathbf{P} -матрицы вида (5) для каждой из представленных на рис. 2 синтезированных трехконтурных КЦ (из 24 цепей) учитывались следующие критерии:

1) число многократных шарниров в каждом из замкнутых контуров КЦ (первая строка матрицы);

2) значение ранга каждого из звеньев, образующих данный контур (вторая строка матрицы).

Например, для схемы № 6 (см. рис. 2) идентификационная матрица \mathbf{P}_6 рассчитана следующим образом:

1) указанный в первой строке матрицы \mathbf{P}_6 ассортимент замкнутых контуров КЦ состоит из одного четырехстороннего и трех пятисторонних контуров, где четырехсторонний контур, содержащий один МКШ, обозначен 4^1 , первый из пятисторонних контуров, не содержащий МКШ, — 5^0 , второй пятисторонний контур, содержащий один МКШ, — 5^1 , третий пятисторонний контур, содержащий один МКШ, но имеющий другое внутреннее расположение трехшарнирных звеньев, — 5^{1*} ;

2) указанный во второй строке матрицы \mathbf{P}_6 ассортимент рангов звеньев, образует четыре замкнутых контура, где ранг каждого звена рассчитывается как сумма шарниров всех присоединенных к нему других звеньев. Например, к трехшарнирному звену в середине КЦ присоединены одно двухшарнирное и два трехшарнирных звена, т. е. общее число шарниров $2 + 3 + 3 = 8$, следовательно, ранг трехшарнирного звена в середине КЦ $r = 8$. Аналогично были рассчитаны ранги для всех звеньев КЦ.

Таким образом, на рис. 2 показано семейство синтезированных восьмизвенных МЖ-цепей: № 1–22 с полным ассортиментом $[LA]_{V=1} = [n_2 n_3 n_4] = [530]$; № 23, 24 с $[LA]_{V=2} = [n_2 n_3 n_4] = [620]$.

Сравнение сводного атласа схем, приведенных на рис. 2, с известными аналогами [23, 24] показывает, что он содержит семь новых МЖ-цепей (№ 3, 6, 7, 9, 10, 14, 23), из которых (путем выбора разной стойки) могут быть образованы базовые восьмизвенные МЖ-механизмы для создания из них новых рычажных механизмов с двукратными шарнирами.

Например, на основе КЦ № 3 (см. рис. 2) получен атлас возможных базовых схем восьмизвенных одноподвижных МЖ-механизмов (рис. 3) для дальнейшего построения атласа новых возможных восьмизвенных одноподвижных трехконтурных преобразующих механизмов с двукратными шарнирами (с разными стойкой и входным звеном), приведенного на рис. 4.

Структурный синтез и анализ рычажных механизмов с МКШ. Приведенное на рис. 2 семейство синтезированных рычажных МЖ-цепей с теоретически рассчитанными ассортиментами звеньев может быть использовано для создания

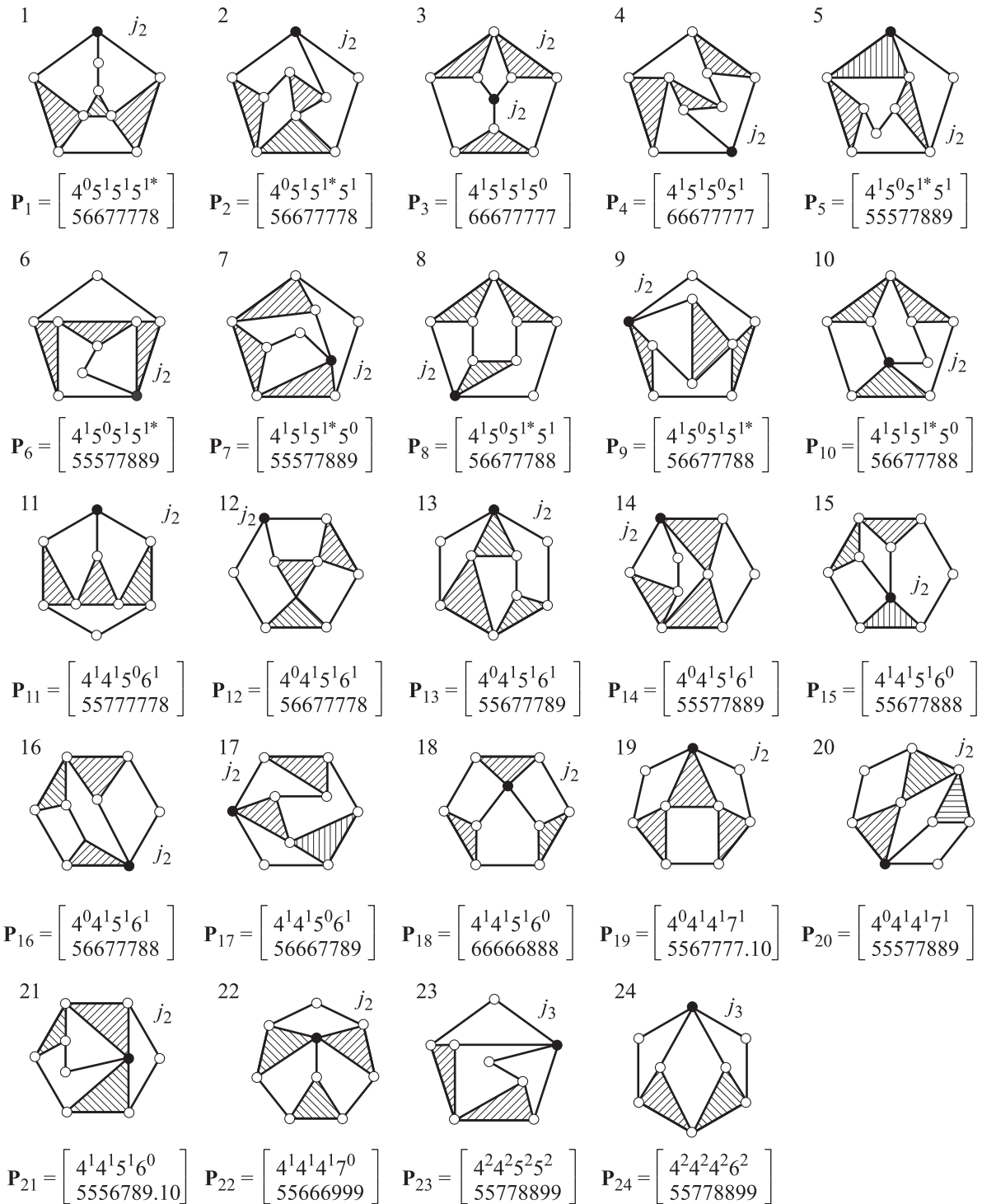


Рис. 2. Сводный атлас схем семейства синтезированных восьмизвенных MJ-цепей при MJ-факторе $V = 1$ (№ 1–22) и $V = 2$ (№ 23, 24)

новых одноподвижных механизмов в разных областях техники.

Пример № 1. Рассмотрим приведенную на рис. 2 новую синтезированную трехконтурную восьмизвенную КЦ № 3 с двукратными шарнирами ($V = 1, j_2$ (222), число сторон в наружном контуре $L_0 = 5$). После выбора в КЦ № 3

наиболее сложного (трехшарнирного) звена в качестве стойки, а наиболее простого (двухшарнирного) звена в качестве ведущего (входного) элемента, можно создать базовый MJ-механизм № 3–4 (см. рис. 3). Затем на его основе может быть спроектирован преобразующий MJ-механизм № 3–4–2 (см. рис. 4), а на базе

последнего — новый механизм летучих ножиц, показанный на рис. 5, а.

Пример № 2. Рассмотрим изображенную на рис. 2 синтезированную трехконтурную восьмизвенную КЦ № 12 с двукратными шарнирами

($V = 1, j_2(222), L_0 = 6$). После выбора в этой КЦ наиболее сложного (трехшарнирного) звена в качестве стойки, а наиболее простого (двухшарнирного) звена в качестве входного элемента, можно сконструировать новый шаговый

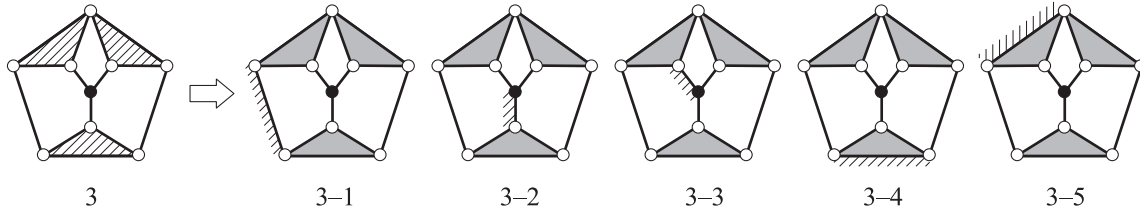


Рис. 3. Атлас возможных базовых схем восьмизвенных одноподвижных МЖ-механизмов, образованных из МЖ-цепи № 3 (см. рис. 2) при МЖ-факторе $V = 1$

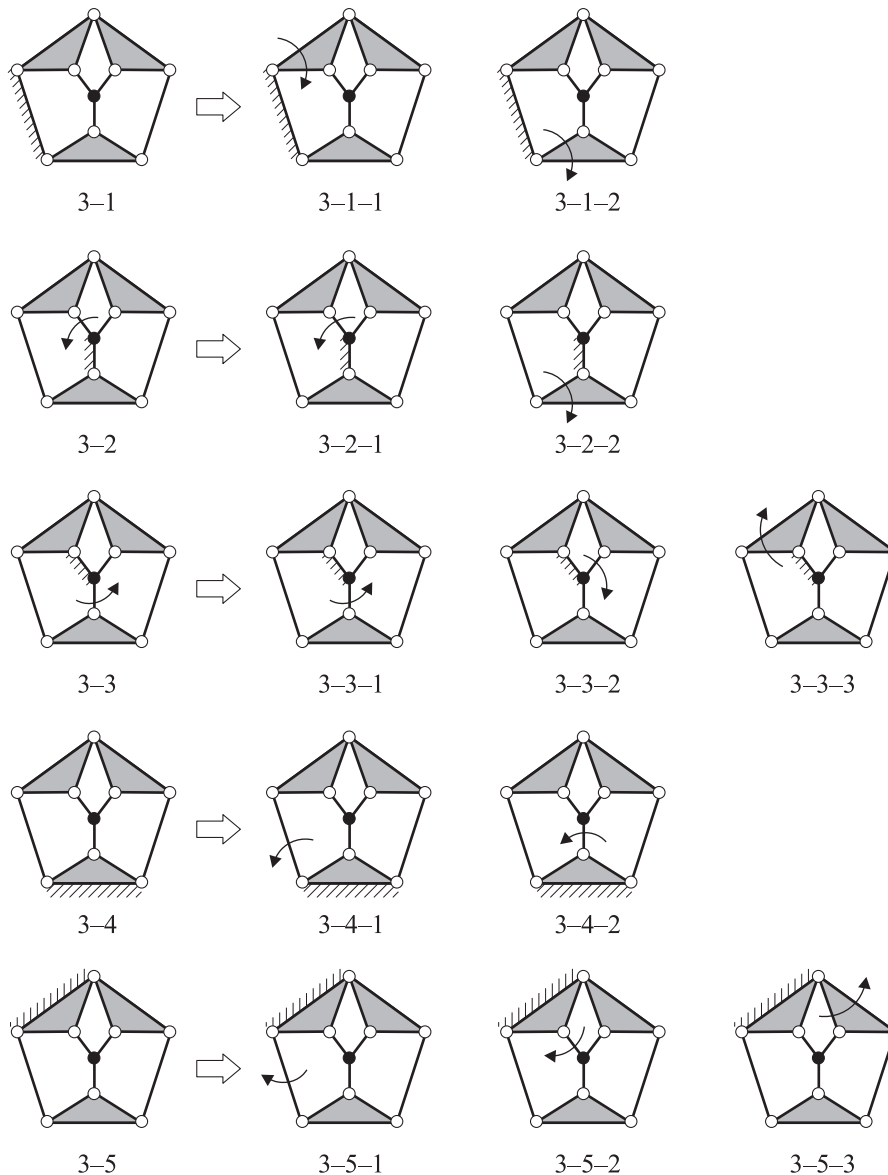


Рис. 4. Атлас возможных схем восьмизвенных одноподвижных трехконтурных преобразующих механизмов с двукратными шарнирами (с разными стойкой и входным звеном), образованных из синтезированной МЖ-цепи № 3 (см. рис. 2) и пяти базовых МЖ-механизмов (см. рис. 3) при МЖ-факторе $V = 1$

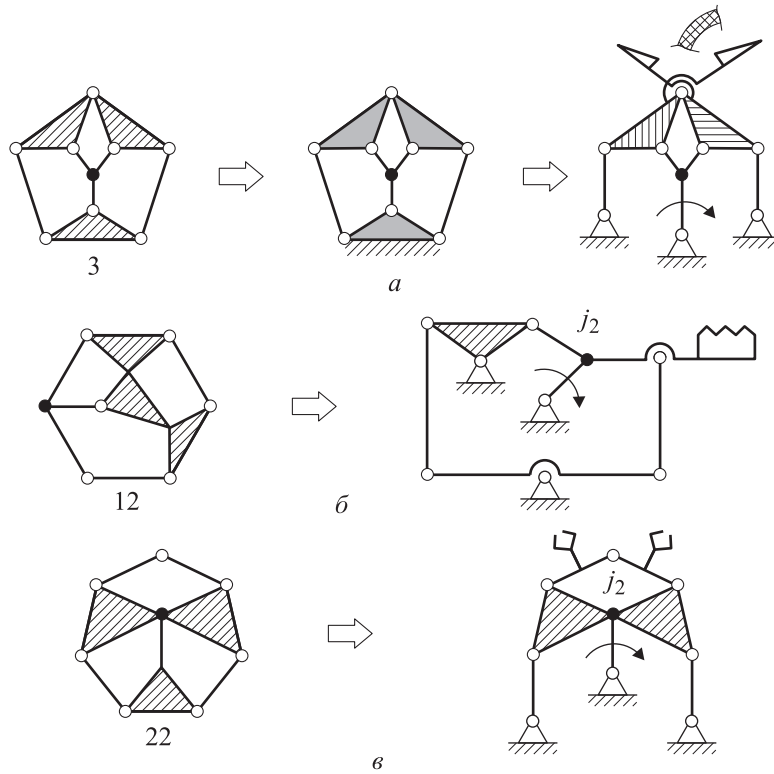


Рис. 5. Механизм летучих ножниц (а), шаговый механизм транспортирования материалов с зубчатой рейкой (б) и двурукий робот (в)

механизм транспортирования материалов с зубчатой рейкой (рис. 5, б).

Пример № 3. Рассмотрим приведенную на рис. 2 синтезированную трехконтурную восьмизвенную КЦ № 22 с двухкратными шарнирами ($V = 1, j_2 (233), L_0 = 7$). После выбора в этой КЦ наиболее сложного (трехшарнирного) звена в качестве стойки, а наиболее простого (двухшарнирного) звена в качестве входного элемента можно сконструировать новый двурукий робот (рис. 5, в).

Следует отметить, что для выделения разных типов двухкратных шарниров введен дополнительный отличительный признак, указывающий конкретный набор $j_2 (222)$ или $j_2 (223)$ многовершинных звеньев, образующих в МЖ-цепи конкретный МКШ.

В целях дальнейшего быстрого топологического анализа и определения числа степеней свободы сложных механизмов с МКШ (см. рис. 5) используем новые для теории механизмов и машин формулы, предложенные в работах [28, 30]:

- для общего МЖ-фактора всей многоконтурной структуры

$$V = \sum (j-1)v_j = v_2 = 1;$$

- для числа независимых замкнутых контуров, образуемых звеньями КЦ ($n_2 = 5, n_3 = 3, n_4 = 0$) с одним двухкратным шарниром

$$K = 1 + \frac{1}{2} [V + \sum (i-2)n_i] = 1 + \frac{1}{2} (V + n_3) = 1 + \frac{1}{2} (1 + 3) = 3;$$

- для числа степеней свободы рычажного механизма с МКШ

$$F = \sum (3-i)n_i - V - 3 = (n_2 - 3) - V = (5 - 3) - 1 = +1;$$

- уравнение проверки собираемости замкнутой многоконтурной цепи (AVC — Assembly Verification Criterion)

$$AVC = 2(K-1) - \sum (i-2)n_i - V = 2(K-1) - n_3 - 2n_4 - V = 2(3-1) - 3 - 1 = 0.$$

Выводы

1. Получено синтезированное на основе целочисленных решений единой структурной математической модели расширенное (по срав-

нению с известным [23, 24]) семейство трехконтурных восьмизвенных МЖ-цепей с двух- и трехкратными шарнирами, включающие в себя семь новых КЦ (шесть с двухкратными шарнирами и одну с трехкратным шарниром).

2. На базе синтезированных восьмизвенной МЖ-цепи № 3 построены атласы из пяти базовых МЖ-механизмов с разной стойкой и из двадцати преобразующих МЖ-механизмов, один

из которых использован для создания механизма летучих ножниц.

3. Эффективность применения процедуры структурного синтеза и анализа сложных механизмов с МКШ в разных областях современного машиностроения (в точных направляющих механизмах, автоматических линиях, технологических машинах, роботах, манипуляторах и др.) подтверждена результатами данной работы.

Литература

- [1] Ассур Л.В. *Исследование плоских стержневых механизмов с точки зрения их структуры и классификации*. Москва, Изд-во АН СССР, 1952. 529 с.
- [2] Кожевников С.Н. *Основания структурного синтеза механизмов*. Киев, Наукова думка, 1979. 232 с.
- [3] Артоболевский И.И. *Механизмы в современной технике. Справочник. Том 1. Шарнирно-рычажные механизмы*. Москва, Наука, 1979. 495 с.
- [4] Крайнев А.Ф. *Механика (искусство построения) машин. Фундаментальный словарь*. Москва, Машиностроение, 2000. 904 с.
- [5] Тимофеев Г.А. *Теория механизмов и механика машин*. Москва, Юрайт, 2019. 368 с.
- [6] Смелягин А.И. *Структура механизмов и машин*. Новосибирск, НГТУ, 2001. 286 с.
- [7] Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. *Theory of Mechanisms*. New York, Oxford Univ. Press, 2016. 976 p.
- [8] Ceccarelli M. *Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulations*. Springer Science & Business Media, 2004. 312 p.
- [9] Babichev D., Evgrafov A. *Structural-kinematic synthesis method for (planar) link. Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanism and Machine Science*. Switzerland, Springer, 2019, pp. 2937–2953.
- [10] Марковец А.В., Полотебнов В.О. Синтез механизмов транспортирования материалов с прямолинейным участком траектории движения зубчатой рейки. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, 2018, № 1, т. 39, с. 117–121.
- [11] Сухих Р.Д. Структурный синтез механизмов по заданному числу звеньев. Ч. 3. *Расчет, проектирование и конструирование железнодорожных машин. Сб. науч. тр.*, Санкт-Петербург, ПГУПС, 2003, с. 3–31.
- [12] Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2004, № 2, т. 2, с. 3–17.
- [13] Глазунов В.А., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991. 95 с.
- [14] Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. *Система проектирования плоских рычажных механизмов*. Москва, Машиностроение, 1988. 232 с.
- [15] Романцев А.А. К вопросу создания структурных схем плоских шарнирных групп звеньев. *Теория механизмов и машин*, 2014, № 1(23), т. 12, с. 81–90.
- [16] Crossley F.R.E. *The permutations of kinematic chains of eight members or less from graph theoretic viewpoint. Developments in Mechanisms*. Oxford, Pergamon Press, 1965, vol. 2, pp. 467–486.
- [17] Tuttle E.R., Peterson S.W., Titus J.E. Enumeration of basis kinematic chains using the theory of finite groups. *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 1989, vol. 111(4), pp. 498–503, doi: 10.1115/1.3259028
- [18] Hwang W.-M., Hwang Y.-W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints. *Mechanism and Machine Theory*, 1992, no. 2, vol. 27, pp. 189–199, doi: 10.1016/0094-114X(92)90008-6
- [19] Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration of planar simple-jointed kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, no. 9, vol. 40, pp. 1030–1050, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.015
- [20] Умнов Н.В., Сильвестров Э.Е. Использование методов гомотопии при синтезе механизмов. *Сб. докл. междунар. конф. по теории механизмов и машин*, Краснодар, Кубанский ГТУ, 2006, с. 47–48.

- [21] Yan H.-S., Chiu Y.-T. On the number synthesis of kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, no. 9, vol. 89, pp. 128–144, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.012
- [22] Ding H., Hou F., Kecskeméthy A., Huang Z. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, no. 11, vol. 46, pp. 1588–1600, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012
- [23] Chu J., Zou Y. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228, 2014, pp. 2178–2192, doi: 10.1177/0954406213516306
- [24] Ding H., Yang W., Huang P., Kecskeméthy A. Automatic structural synthesis of planar multiple joint kinematic chains. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2013, vol. 135, pp. 091007, doi: 10.1115/1.4024733
- [25] Chu J., Cao W. Identification of isomorphism among kinematic chains and inversions using link's adjacent-chain-table. *Mechanism and Machine Theory*, 1994, no. 1, vol. 29, pp. 53–58, doi: 10.1016/0094-114X(94)90019-1
- [26] Ding H., Huang Z. Isomorphism identification of graphs: Especially for the graphs of kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, no. 1, vol. 44, pp. 122–139, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.02.008
- [27] Liu J., Yu D. Representations & isomorphism identification of planar kinematic chains with multiple joints based on the converted adjacent matrix. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, vol. 48, pp. 15–21, doi: 10.3901/JME.2012.05.015
- [28] Пожбелко В.И. Единая теория структуры, структурный синтез и анализ статически определимых механических систем на основе новой формулы подвижности. *Теория механизмов и машин*, 2013, № 2(22), т. 11, с. 15–37.
- [29] Пожбелко В.И. Направленный синтез оптимальных структур плоских механических систем с совмещенными шарнирами (механизмы, фермы, группы Ассура, роботы). Ч. 1. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 10, с. 31–45.
- [30] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open-, closed-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, no. 6, vol. 100, pp. 1–16, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001
- [31] Pozhbelko V., Ermoshina E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints for 1-DOF up to 5-loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, no. 8, vol. 90, pp. 108–127, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.006
- [32] Pozhbelko V. Advanced Technique of Type Synthesis and Construction of Veritable Complete Atlases of Multiloop F-DOF Generalized Kinematic Chains. *Mechanisms and Machine Science*, 2019, vol. 59, pp. 207–214, doi: 10.1007/978-3-319-98020-1_24
- [33] Pozhbelko V. Type Synthesis Method of Planar and Spherical Mechanisms Using the Universal Structural Table with All Possible Link Assortments. *Mechanisms and Machine Science*. Switzerland, Springer, 2019, vol. 73, pp. 1517–1526, doi: 10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [34] Пожбелко В.И. Метод решения задачи выявления изоморфизма или метаформизма при структурном синтезе сложных многоконтурных механических систем. *Теория механизмов и машин*, 2015, № 1(25), т. 13. с. 23–40, doi: 10.5862/ТММ.25.3

References

- [1] Assur L.V. *Issledovaniye ploskikh sterzhnevnykh mekhanizmov s tochki zreniya ikh struktury i klassifikatsii* [The study of flat bar mechanisms in terms of their structure and classification]. Moscow, AN SSSR publ., 1952. 529 p.
- [2] Kozhevnikov S.N. *Osnovaniya strukturnogo sinteza mekhanizmov* [The foundations of structural synthesis of mechanisms]. Kiyev, Naukova dumka publ., 1979. 232 p.
- [3] Artobolevskiy I.I. *Mekhanizmy v sovremennoy tekhnike. Spravochnik. Tom 1. Sharnirno-rychazhnyye mekhanizmy* [Mechanisms in modern technology. Directory. Volume 1. Articulated Linkage]. Moscow, Nauka publ., 1979. 495 p.
- [4] Kraynev A.F. *Mekhanika (iskusstvo postroyeniya) mashin. Fundamental'nyy slovar'* [Mechanics (the art of building) machines. Fundamental Dictionary]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2000. 904 p.
- [5] Timofeyev G.A. *Teoriya mekhanizmov i mekhanika mashin* [Theory of mechanisms and mechanics of machines]. Moscow, Yurayt publ., 2019. 368 p.

- [6] Smelyagin A.I. *Struktura mekhanizmov i mashin* [The structure of mechanisms and machines]. Novosibirsk, NSTU publ., 2001. 286 p.
- [7] Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. *Theory of Mechanisms*. New York, Oxford University Press, 2016. 976 p.
- [8] Ceccarelli M. *Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulations*. Springer Science & Business Media, 2004. 312 p.
- [9] Babichev D., Evgrafov A. *Structural-kinematic synthesis method for (planar) link. Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanism and Machine Science*. Switzerland, Springer, 2019, pp. 2937–2953.
- [10] Markovets A.V., Polotebnov V.O. Synthesis of mechanisms of material handling mechanism with a toothed bar straight line section of the movement. *The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 2018, no. 1, vol. 38, pp. 117–121 (in Russ.).
- [11] Sukhikh R.D. Structural synthesis of mechanisms for a given number of links. Pt. 3. *Sbornik nauchnykh trudov. Raschet, proyektirovaniye i konstruirovaniye zhelezнодорожных mashin* [Collection of scientific papers. Calculation, design and construction of railway cars]. Sankt-Petersburg, PSUPS publ., 2003, pp. 3–31 (in Russ.).
- [12] Dvornikov L.T. Structural analysis of mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2004, no. 2, vol. 2, pp. 3–17 (in Russ.).
- [13] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noy struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow, Nauka publ., 1991. 95 p.
- [14] Peysakh E.E., Nesterov V.A. *Sistema proyektirovaniya ploskikh rychazhnykh mekhanizmov* [System design flat lever mechanisms]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1988. 232 p.
- [15] Romantsev A.A. On the creation of block diagrams of planar hinged groups of links. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2014, no. 1(23), vol. 12, pp. 81–90 (in Russ.).
- [16] Crossley F.R.E. *The permutations of kinematic chains of eight members or less from graph theoretic viewpoint. Developments in Mechanisms*. Oxford, Pergamon Press, 1965, vol. 2, pp. 467–486.
- [17] Tuttle E.R., Peterson S.W., Titus J.E. Enumeration of basis kinematic chains using the theory of finite groups. *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 1989, vol. 111(4), pp. 498–503, doi: 10.1115/1.3259028
- [18] Hwang W.-M., Hwang Y.-W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints. *Mechanism and Machine Theory*, 1992, no. 2, vol. 27, pp. 189–199, doi: 10.1016/0094-114X(92)90008-6
- [19] Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration of planar simple-jointed kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, no. 9, vol. 40, pp. 1030–1050, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.015
- [20] Umnov N.V., Sil'vestrov E.E. The use of homotopy methods in the synthesis of mechanisms. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoy konferentsii po teorii mekhanizmov i mashin* [Collection of reports of the international conference on the theory of mechanisms and machines]. Krasnodar, Kubanskiy STU, 2006, pp. 47–48.
- [21] Yan H.-S., Chiu Y.-T. On the number synthesis of kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, no. 9, vol. 89, pp. 128–144, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.012
- [22] Ding H., Hou F., Kecskeméthy A., Huang Z. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, no. 11, vol. 46, pp. 1588–1600, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012
- [23] Chu J., Zou Y. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228, 2014, pp. 2178–2192, doi: 10.1177/0954406213516306
- [24] Ding H., Yang W., Huang P., Kecskeméthy A. Automatic structural synthesis of planar multiple joint kinematic chains. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2013, vol. 135, pp. 091007, doi: 10.1115/1.4024733
- [25] Chu J., Cao W. Identification of isomorphism among kinematic chains and inversions using link's adjacent-chain-table. *Mechanism and Machine Theory*, 1994, no. 1, vol. 29, pp. 53–58, doi: 10.1016/0094-114X(94)90019-1
- [26] Ding H., Huang Z. Isomorphism identification of graphs: Especially for the graphs of kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, no. 1, vol. 44, pp. 122–139, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.02.008

- [27] Liu J., Yu D. Representations & isomorphism identification of planar kinematic chains with multiple joints based on the converted adjacent matrix. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, vol. 48, pp. 15–21, doi: 10.3901/JME.2012.05.015
- [28] Pozhbelko V.I. A complete theory of structure, structural synthesis and analysis statically determinate mechanical systems on base a new degrees of freedom equation (DOF). *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2013, no. 2(22), vol. 11, pp. 15–37 (in Russ.).
- [29] Pozhbelko V.I. Napravlenyy sintez optimal'nykh struktur ploskikh mekhanicheskikh sistem s sovmeshchennymi sharnirami (mekhanizmy, fermy, gruppy Assura, roboty). CH. 1. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2012, no. 10, pp. 31–45.
- [30] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open-, closed-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, no. 6, vol. 100, pp. 1–16, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001
- [31] Pozhbelko V., Ermoshina E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints for 1-DOF up to 5-loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, no. 8, vol. 90, pp. 108–127, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.006
- [32] Pozhbelko V. Advanced Technique of Type Synthesis and Construction of Veritable Complete Atlases of Multiloop F-DOF Generalized Kinematic Chains. *Mechanisms and Machine Science*, 2019, vol. 59, pp. 207–214, doi: 10.1007/978-3-319-98020-1_24
- [33] Pozhbelko V. Type Synthesis Method of Planar and Spherical Mechanisms Using the Universal Structural Table with All Possible Link Assortments. *Mechanisms and Machine Science*. Switzerland, Springer, 2019, vol. 73, pp. 1517–1526, doi: 10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [34] Pozhbelko V.I. Method for solving the problem of identifying isomorphism or metaformism in the structural synthesis of complex multi-circuit mechanical systems. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2015, no. 1(25), vol. 13, pp. 23–40 (in Russ.), doi: 10.5862/TMM.25.3

Статья поступила в редакцию 04.10.2019

Информация об авторах

ПОЖБЕЛКО Владимир Иванович — заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор. ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (454080, Челябинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 76, e-mail: pozhbelkovi@susu.ru).

КУЦ Екатерина Николаевна — ассистент кафедры строительного производства и теории сооружений. ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (454080, Челябинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 76).

Information about the authors

POZHBELKO Vladimir Ivanovich — Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Doctor of Science (Eng.), Professor. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: pozhbelkovi@susu.ru).

KUTS Ekaterina Nikolaevna — Assistant Lecturer, Department of Applied Mathematics and Physics. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Структурный синтез семейства плоских восьмизвенных кинематических цепей рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложным трехшарнирным звеном. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 1, с. 21–31, doi: 10.18698/0536-1044-2020-1-21-31

Please cite this article in English as:

Pozhbelko V.I., Kuts E.N. Structural Synthesis of a Family of Planar 8-Link Kinematic Chains for Linkages with Multiple Joints and the Most Complex Ternary Link. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 1, pp. 21–31, doi: 10.18698/0536-1044-2020-1-21-31