

УДК 621.01(075.8)

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-23-37

Теория и практика структурного синтеза новых рычажных механизмов с совмещенными цилиндрическими шарнирами для разных областей техники

В.И. Пожбелко, Е.Н. Куц

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

Theory and application of structural synthesis of the new lever mechanisms with the multiple cylinder joints for different technology areas

V.I. Pozhbelko, E.N. Kuts

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

Структурный синтез разнообразных механизмов — первый этап создания надежных и эффективных конструкций механизмов и механических приводов для работы в разных областях машиностроения. С одной стороны, структурный синтез различных подвижных механических систем является наиболее сложным и проблематичным этапом их проектирования вследствие неизвестного и большого числа (десятки тысяч) возможных структурных решений, а с другой — самым важным этапом, определяющим функциональные характеристики и срок службы создаваемых механизмов. Приведены примеры создания безызбыточных механизмов на основе целочисленных решений структурной математической модели всех возможных многоконтурных механизмов со сложными шарнирами разной кратности. Проведен структурный синтез и обоснована эффективность совмещенных цилиндрических шарниров при создании новых плоских и пространственных структур многозвенных механических устройств с разным числом степеней свободы, выполненных в виде многостороннего схвата робота, грузоподъемного механизма, шарнирно-сочлененных рычажных манипуляторов и подвижной механической системы активной сейсмической защиты зданий.

Ключевые слова: структурный синтез, самоустанавливающиеся механизмы, подвижность механизма, замкнутые контуры, сложные шарниры, новые рычажные механизмы

Structural synthesis of various mechanisms is the first stage in creating reliable and efficient designs of mechanisms and mechanical drives for operation in different areas of the mechanical engineering. On the one hand, structural synthesis of various mobile mechanical systems is the most complex and problematic stage in their design due to the unknown and large number (tens of thousands) of possible structural solutions, and on the other hand, it is the most important stage that determines functional characteristics and service life of the created mechanisms. The paper presents examples of creating the non-redundant mechanisms based on the structural mathematical model integer solutions of all possible multi-loop mechanisms with complex hinges of different multiplicity. Structural synthesis and

substantiation of the combined cylindrical hinges effectiveness were performed in creation of new flat and spatial structures of the multi-link mechanical devices with a different number of degrees of freedom, made in the form of multilateral robot gripper, lifting mechanism, articulated lever manipulators and mobile mechanical system of the active seismic building protection.

Keywords: structural synthesis, self-aligning lever mechanisms, mechanism mobility, closed loops, complex hinges, new lever mechanisms

Создание новых перспективных самоустанавливающихся (безызыточных) механизмов и других подвижных устройств в машиностроении — творческая процедура, сложность которой обусловлена большим количеством возможных и заранее неизвестных вариантов ее решения, из которых надо выбрать оптимальный [1–18].

В процессе структурного синтеза проектируемого механизма [19–22] формируется его базовая структура, обеспечивающая требуемое число степеней свободы (подвижность) W , заданное количество структурно-независимых контуров K , отсутствие вредных избыточных связей, минимум числа звеньев в многозвенной кинематической цепи (КЦ), простоту их изготовления и сборки, а также возможность применения наиболее простых и надежно работающих кинематических пар для связи этих звеньев в замкнутую K -контурную КЦ.

Основным критерием оптимального структурного синтеза механизмов является [23, 24] отсутствие в синтезируемой структуре вредных избыточных связей, которые приводят к повышенному трению и изнашиванию, т. е. к малому сроку службы.

Структурный синтез [23–28] — первый наиболее важный и проблемный этап конструирования новых механизмов, включающий в себя различные задачи синтеза групп Ассура [29], создания разнообразных механизмов заданной подвижности $W \geq 1$, построения замкнутых звеньев числом \bar{n} , K -контурных КЦ и полных атласов всех возможных структур (как базы данных для проектировщика).

Однако до сих пор в теории механизмов и машин отсутствует методика точного расчета конечного количества всех возможных структурно неповторяющихся (неизоморфных) вариантов схем механизмов, вследствие чего основной дискуссионный вопрос о полноте построенных атласов [30–38] до сих пор остается открытым. Рассмотрим различные подходы к структурному синтезу механизмов.

С одной стороны, известен предложенный Л.В. Асуром принцип образования механизма с подвижностью $W = 1$, заключающийся в наложении к открытой КЦ из двух звеньев с подвижностью $W_0 = 0$ [36]. Математическая модель такого синтеза имеет вид

$$W = W_0 + 0 + 0 + \dots + 0.$$

Эта модель не является единственной, могут существовать и другие (парадоксальные) пути образования механизма заданной подвижности $W \geq 1$. Например, это может быть модель, состоящая только из одних групп Ассура с интерпретацией $W = 0 + 0 + \dots + 0$, или полученная путем сложения двух статически неопределимых ферм подвижностью $W = -1$ с интерпретацией $W = [(-1) + (-1)]$ и т. д.

Некоторые варианты таких парадоксальных путей синтеза, позволяющие образовать работоспособный механизм с подвижностью $W = 1$, приведены на рис. 1.

Существуют и другие примеры структурного синтеза механизмов без избыточных связей на основе открытых КЦ, не являющихся группами Ассура. Так, в книге [32] предложен новый метод структурного синтеза путем присоединения открытых КЦ к подвижному звену исходного рычажного механизма с подвижностью $W = 1$ для образования так называемых нестационарных механизмов повышенной подвижности ($W = 2$).

В работе [27] рассмотрена методика новых структурных групп плоских шарнирных звеньев для образования многоконтурных механизмов со всеми простыми шарнирами.

В статье [19] предложен новый метод структурного синтеза на основе соединения между собой открытых КЦ с различным числом звеньев для образования многоконтурных рычажных механизмов со всеми возможными совмещенными шарнирами разной кратности и количества для заданного числа взаимно независимых замкнутых контуров, различающихся хотя бы одним звеном или одной кинематической парой.

Следует отметить, что группы Ассра, через которые обычно представляют сложное строение синтезированного механизма [32, 35–36] могут содержать рычажные звенья, которые никогда не входили в состав анализируемого механизма, вследствие чего они являются виртуальными, а не действительными, из которых был собран механизм.

Например, синтезированный исходный шестизвенный рычажный механизм № 5 (см. рис. 1) содержит два трехшарнирных звена, которые отсутствуют в представлении механизма после разделения его структурной схемы на две двухзвенные группы Ассра класса II и стойку с входным звеном.

Образование многозвенных структур на основе наложения разных групп Ассра для преобразования простых одноконтурных структур в более сложные (десяти-, двенадцати-, четырнадцатизвенные и т. д.) многоконтурные КЦ является нецелесообразным и бесперспективным для структурного синтеза (как ручного перебора, так и компьютерного комбинаторного) вследствие огромного массива разных \tilde{n} -звенных групп Ассра.

Их точное суммарное число Σ , впервые определенное с помощью ЭВМ Э.Е. Пейсахом [29], составляет десятки тысяч структур, а их комбинаторный перебор при синтезе даст сотни тысяч вариантов. Так, для $\tilde{n} = 10$ суммарное число $\Sigma = 5445$, для $\tilde{n} \geq 12$ сумма разных групп

Ассра может превышать 100 000 и пока никем не установлена.

В работе [26] доказано, что применение метода синтеза путем усложнения начальной простой структуры оказалось тупиковым даже для построения шестизвенных механизмов рулевого управления вследствие большой сложности компьютерных программ и применения алгебраических уравнений высокой степени для выявления и удаления всех структурно повторяющихся (изоморфных) схем.

Следует отметить, что основная сложность при структурном синтезе заключается в отборе из всего массива генерируемых схем неизоморфных структур, так как массив из десятков тысяч ($\tilde{n}!$) генерируемых в процессе синтеза схем содержит до 99 % структурно повторяющихся вариантов, которые надо выявлять и удалять.

Например, структуры № 5 и 6 (см. рис. 1) при внешней несхожести являются изоморфными, так как имеют одинаковую матрицу смежности [11], а при их комбинаторном компьютерном синтезе возникает много эквивалентных по строению сборок замкнутой КЦ.

С другой стороны, по сравнению с образованием сложных структур путем наложения групп Ассра структурный синтез механизмов, выполняемый для разных задач синтеза на основе всех возможных целочисленных решений в различных структурных математических моделях [13,

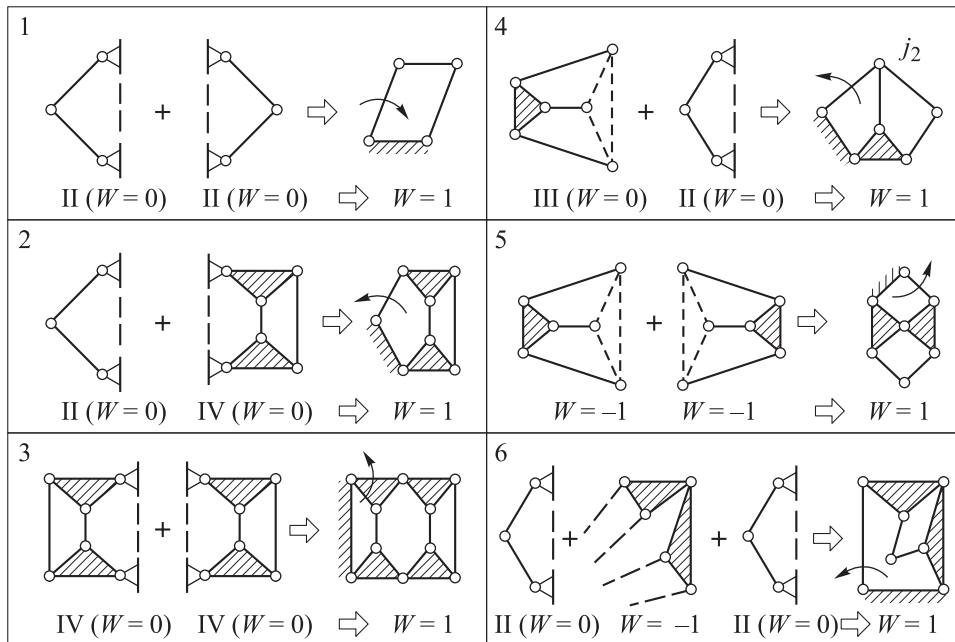


Рис. 1. Примеры парадоксального синтеза схем механизмов при отсутствии избыточных связей

20, 23, 28] является более перспективным и, главное, более результативным для построения полных баз данных, позволяющих синтезировать сложные (многозвенные, многоконтурные, одно- и многоподвижные) структуры механизмов (включая, десяти-, двенадцати- и четырнадцатизвенные с подвижностью $W = 1, 2$ и 3).

Покажем, что подход на основе целочисленного синтеза является более результативным, чем структурный синтез на основе наложения групп Ассур. Например, приведенные в работах [20, 21, 38, 39] универсальные структурные таблицы расчетных кодов $[LA]/V$ правильного строения механизмов впервые содержат все целочисленные наборы $[LA]$ рычажных многошарнирных звеньев для направленного структурного синтеза всех возможных приведенных чисел сложных шарниров V при создании четырех-, шести-, восьми-, десяти-, двенадцати- и четырнадцатизвенных плоских и пространственных безызыточных механизмов со степенью свободы $h = 3$ и подвижностью $W = 1, 2$ и 3 .

В работе [40] предложена и доказана теорема целочисленного структурного синтеза, позволяющая (в зависимости от заданного числа замкнутых контуров КЦ $K \geq 2$) точно рассчитать конечное количество Z возможных целочисленных решений и составить таблицу вида $Z = Z(K)$ в диапазонах $2 \leq K \leq 10$ и $6 \leq \tilde{n} \leq 22$. Также доказана полнота как конечного количества всех указанных расчетных цифровых кодов правильного строения $[LA]/V$ [20, 39], так и всех полученных расчетных наборов сложных шарниров $[MJA]$.

В публикациях [19, 41] предложена составленная на основе полученных целочисленных структурных решений сводная таблица всего множества $[MJA]$, впервые содержащая все возможные расчетные наборы сложных шарниров для гарантированной сборки замкнутых K -контурных КЦ ($K = 2..5$) любой подвижности W , для выполнения структурного синтеза шести-, восьми-, десяти- и двенадцатизвенных многоконтурных рычажных механизмов с учетом применения в их строении сложных шарниров разной кратности и количества.

В основополагающей научной монографии [23] проведен глубокий анализ работ, выполненных в XX веке П.Л. Чебышевым, Л.В. Ассуром, И.И. Артоболевским, Г.Г. Барановым, О.Г. Озолем, Л.Н. Решетовым, М. Грюблером и другими учеными-механиками.

Дополнительному анализу научных исследований по данной тематике, проведенных за последние 50 лет, посвящены и более современные работы, например [9, 13, 14, 39, 40]. По результатам анализа установлено, что на сегодняшний день отсутствуют теоретические и практические исследования по созданию рычажных механизмов со сложными совмещенными шарнирами, несмотря на их широкое использование в разных областях машиностроения.

Цель работы — обоснование процедуры построения и эффективности применения совмещенных цилиндрических шарниров для синтеза новых рычажных механизмов в разных областях техники [42–46].

Основные положения и структурные зависимости. *Целочисленное математическое моделирование строения механизмов.* Рассматриваемые рычажные механизмы содержат многоконтурные (замкнутые или смешанные) КЦ, образованные соединенными между собой рычажными звеньями посредством одноподвижных вращательных кинематических пар, выполненных в виде простых шарниров (при соединении только двух звеньев) или в виде сложных (совмещенных) цилиндрических шарниров (при сборке на одной оси трех и более звеньев) [19].

Предложенная В.И. Пожбелко в единой теории структуры, синтеза и анализа механических систем [20] универсальная структурная математическая модель для синтеза любых плоских и пространственных механизмов, работающих в пространстве движений с тремя степенями свободы ($h = 3$), имеет следующий вид:

$$\begin{cases} [n_3 + 2n_4 + 3n_5 + \dots + (i_{\max} - 2)n_{i_{\max}}] - n_1 = \\ = 2(K - 1) - V; \\ n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + \dots + n_{i_{\max}} = \\ = (W + 2K + 1) - p_2; \\ v_2 + 2v_3 + 3v_4 + \dots + (j_{\max} - 1)v_{j_{\max}} = V, \end{cases} \quad (1)$$

где n_i — число i -шарнирных рычажных звеньев; i_{\max} — наибольшее возможное число шарниров на одном звене; $n_{i_{\max}}$ — число i_{\max} -шарнирных звеньев; p_2 — число двухподвижных кинематических пар; v_j и $v_{j_{\max}}$ — число j -кратных шарниров ($j \geq 2$) и его максимальное значение.

Расчет числа степеней свободы механизма. Расчетное значение подвижности W механиче-

ской системы является основным отличительным признаком любых механизмов ($W \geq 1$), а также любых статически определимых ферм ($W = 0$) и статически неопределимых ферм ($W < 0$).

Для расчета подвижности W плоских и пространственных механизмов, работающих в пространстве движений $h = 3$, применим формулу В.И. Пожбелко [20]

$$W = (2n_1 + n_2 + p_2 - 3) - [n_4 + 2n_5 + 3n_6 + \dots + (i_{\max} - 3)n_{i_{\max}}] - V, \quad (2)$$

которая является более информативной для целочисленного решения разных задач структурного синтеза и анализа сложных многозвенных механизмов.

Формула (2) не только делает расчет менее трудоемким (так как требует подсчета большого количества одноподвижных кинематических пар), но также содержит видовой состав всех звеньев КЦ (в отличие от традиционных формул для расчета подвижности W , предложенных П.Л. Чебышевым [36], М. Грюблером [23] и Ф. Куцбахом [13], включающих в себя только общее число подвижных звеньев).

Код строения КЦ механизма. Предлагаемый код *Code* является основной характеристикой строения различных механических систем (механизмов, ферм, групп Ассур). Его можно представить как

- краткий код, составленный с учетом набора рычажных звеньев $[LA]$ и приведенного числа сложных шарниров V ,

$$Code[LA]/V = [n_2 n_3 n_4 n_5 \dots n_i]/V;$$

- полный (развернутый) код, учитывающий набор рычажных звеньев $[LA]$ и сложных шарниров $[MJA]$,

$$Code[LA]/[MJA] = [n_2 n_3 n_4 n_5 \dots n_i]/[v_2 \cdot v_3 \cdot v_4 \cdot \dots \cdot v_j].$$

Входные и выходные параметры структурного синтеза. Входными параметрами синтеза механизмов, задаваемыми для их подстановки в структурную математическую модель (1), являются подвижность механизма ($W \geq 1$), число замкнутых контуров КЦ ($K \geq 2$) и приведенное число сложных шарниров V ($1 \leq V \leq V_{\max}$, где V_{\max} — его максимальное значение).

Выходными параметрами синтеза являются все неотрицательные целочисленные решения уравнений математической модели (1), пред-

ставляющие собой искомые наборы рычажных звеньев

$$[LA] = [n_2 n_3 n_4 n_5 \dots n_i]$$

и искомые наборы сложных шарниров

$$[MJA] = [v_2 \cdot v_3 \cdot v_4 \cdot \dots \cdot v_j].$$

Структурный синтез четырехстороннего зажимного схвата. Рассмотрим синтез одноподвижного пятиконтурного рычажного механизма для двух вариантов входных параметров.

С учетом первого варианта входных параметров

$$W = 1, \quad K = 5, \quad V = 0, \quad n_1 = 0, \quad p_2 = 0$$

структурная математическая модель (1) для создания одноподвижного пятиконтурного рычажного механизма без применения сложных (совмещенных) шарниров в его замкнутой КЦ принимает вид

$$\begin{cases} n_3 + 2n_4 + 3n_5 + 4n_6 = 2(K - 1) - V = 8; \\ n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 = (W + 2K + 1) = 12; \\ v_2 + 2v_3 + 3v_4 + 4v_5 = 0. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\begin{cases} n_2 = 9; n_3 = 0; n_4 = 1; n_5 = 2; n_6 = 0 \rightarrow \tilde{n} = 12; \\ v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = 0 \rightarrow Code[n_2 n_3 n_4 n_5 n_6]/V = \\ = 0 = [90120]/0. \end{cases} \quad (3)$$

Синтезированная на основе решений (3) структурная схема зажимного устройства, построенная с применением только простых шарниров ($V = 0$) и содержащая три пяти- и четырехшарнирных звена, приведена на рис. 2, а.

С учетом второго варианта входных параметров

$$W = 1, \quad K = 5, \quad n_1 = 0, \quad V = V_{\max} = 2(K - 1) = 8$$

структурная математическая модель (1) приобретает вид

$$\begin{cases} n_3 + 2n_4 + 3n_5 + 4n_6 = 0; \\ n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 = (W + 2K + 1) = 12; \\ v_2 + 2v_3 + 3v_4 + 4v_5 = 8 = V_{\max}. \end{cases}$$

Эта модель имеет целочисленные решения

$$\begin{cases} n_2 = 12; n_3 = n_4 = n_5 = n_6 = 0; \\ v_2 = 8 \rightarrow Code[n_2 n_3 n_4 n_5 n_6]/V = 8 = \\ = [12.0000]/8. \end{cases} \quad (4)$$

Синтезированная на основе решений (4) структурная схема зажимного устройства при-

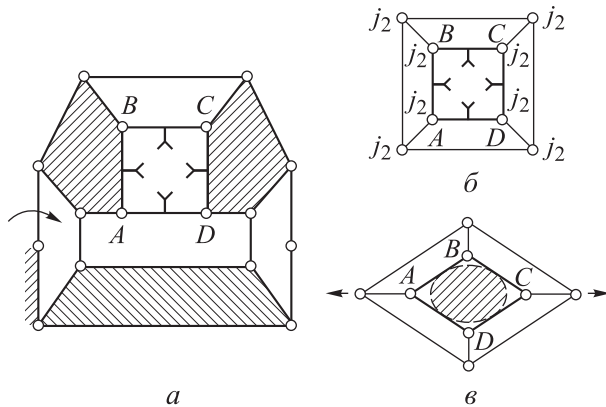


Рис. 2. Результаты синтеза зажимных устройств: *a* — структурная схема плоского механизма с простыми шарнирами; *b* и *v* — структурные схемы компактной пространственной структуры со всеми двойными шарнирами в свободном состоянии и при четырехстороннем зажиме

ведена на рис. 2, *b*. Эта структурная схема по сравнению с приведенной на рис. 2, *a*, является более простой (все звенья двухшарнирные), компактной, менее трудоемкой в изготовлении и сборке (рычажные звенья одной длины) и в эксперименте на реально изготовленной пространственной конструкции универсального четырехстороннего зажимного схвата [43] обеспечивает надежный зажим изделий различной формы.

Синтезированный четырехсторонний зажимной схват [43] относится к механическим системам переменной структуры, так как в течение одного цикла работы (зажим–отжим объекта) в процессе движения звеньев зажимного рычажного механизма происходит следующее изменение его структуры и подвижности W , определяемой по формуле (2):

- в свободном состоянии (см. рис. 2, *b*), т. е. при отсутствии контакта зажимного ромба $ABCD$ с объектом, ромб представляет собой подвижный шарнирный четырехзвенник с расчетной подвижностью

$$W_1 = (n_2 - 3) - V = (12 - 3) - 8 = 1,$$

что обеспечивает движение сторон ромба $ABCD$ к зажимаемому объекту;

- в фазе зажима (рис. 2, *v*), т. е. после четырехстороннего контакта всех сторон ромба $ABCD$ с зажимаемым объектом, ромб вместе с зажатым объектом превращается в жесткое четырехшарнирное звено ($n_4 = 1$), а число двухшарнирных звеньев уменьшается до $n_2 = 8$, исходный двенадцатизвенный механизм превращается в девятизвенную ($\tilde{n} = n_2 + n_4 = 9$) ферму

с приведенным числом сложных шарниров $V = \nu_2 = 4$ и расчетной подвижностью

$$W_2 = (n_2 - 3) - n_4 - V = (8 - 3) - 1 - 4 = 0,$$

т. е. возникает другая структура с подвижностью $W_2 = 0$, обеспечивающая надежный четырехсторонний зажим объекта.

Структурный синтез грузоподъемного шарнирного механизма.

Под таким механизмом с маятниковым подвесом груза будем понимать многосвязное рычажное устройство с шарнирным подвесом поднимаемого (или опускаемого) груза, в котором при таком движении груза отсутствуют как вредные угловые колебания шарнирного подвеса с грузом (угол $\gamma = 0$), так и любые удары (жесткие и мягкие) груза в конце его опускания на опорную поверхность (т. е. с нулевыми скоростью и ускорением).

Такой режим движения шарнирно подвешенного груза особенно необходим при перемещении опасных грузов (контейнеров с жидкими радиоактивными отходами, емкостей с кислотой или расплавленным металлом, опасных боеприпасов и др.), а также хрупких стеклянных и тонкостенных предметов.

Самыми известными шарнирно-рычажными передачами для преобразования углового поворота на входе в приближенно-точное прямолинейное движение на выходе являются два следующих механизма.

Шестизвенный кривошипно-кулисный рычажный механизм привода строгального станка с подвижностью $W = 1$, выполненный в виде замкнутой двухконтурной КЦ с одним вращательным приводным двигателем [36]. Его недостатком является применение двух поступательных кинематических пар (одна установлена на входе, другая — на выходе).

Восьмизвенный двухкоромысловый инверсор Поселье — Липкина [25], выполненный в виде замкнутой трехконтурной КЦ и предназначенный для преобразования углового поворота коромысла (от ручного привода на входе) в движение на выходе чертящей точки E геометрической вершины шарнирного ромба на выходе этой цепи. При параметрах $\tilde{n} = n_2 = 8$, $V = \nu_2 = 4$ инверсор обладает подвижностью

$$W = (n_2 - 3) - V = (8 - 3) - 4 = 1.$$

Недостатком этого устройства является невозможность его применения в качестве грузоподъемного механизма, так как в нем отсут-

ствуется выходное рабочее звено, а чертящая точка E не является материальным объектом.

Рассмотрим возможность создания грузоподъемного механизма путем введения в его КЦ дополнительного одношарнирного рычажного звена в виде шарнирного подвеса с грузом (т. е. путем синтеза смешанной КЦ).

Создадим грузоподъемный шарнирный механизм с маятниковым подвесом груза с подвижностью входного кривошипа $W_1 = 1$, подвижностью шарнирного подвеса $W_2 = 1$ с учетом выполнения четырехконтурной цепи ($K = 4$) с одноподвижными кинематическими парами ($p_2 = 0$) и применением сложных шарниров с $V = V_{\max} - 2(K - 1) = 6$.

С учетом заданных входных параметров

$$W = W_1 + W_2 = 2; \quad K = 4; \quad V = 6$$

математическая модель (1) принимает вид

$$\begin{cases} (n_3 + 2n_4 + 3n_5) - n_1 = 2(K - 1) - V = 0; \\ n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 = W + 2K + 1 = 11; \\ v_2 + 2v_3 + 3v_4 = V - 6. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\begin{cases} n_1 = 1; n_2 = 9; n_3 = 1; n_4 = 0; n_5 = 0 \rightarrow \tilde{n} = 11; \\ v_2 = 4; v_3 = 1; v_4 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Синтезированная на основе решений (5) структурная схема одиннадцатизвенного рычажного механизма со смешанной КЦ, содержащей четыре замкнутых контура и одношарнирное звено, собранной с применением четырех двойных шарниров (j_2) и одного тройного шарнира (j_3), показана на рис. 3, а.

В структурную схему синтезированного на уровне изобретений [42] грузоподъемного механизма с маятниковым подвесом груза (см. рис. 3, а) введено дополнительное одношарнирное звено, установленное между крайними звеньями шарнирного ромба через двойной шарнир E и являющееся выходным рабочим звеном в виде шарнирного подвеса переносимого груза (для его подъема и опускания точно по вертикали без угловых колебаний этого подвеса, т. е. при $\gamma = 0$).

В отличие от восьмизвенного инверсора Поселье — Липкина синтезированный механизм с выходным одношарнирным рабочим звеном (см. рис. 3, а) имеет согласно формуле (2) повышенную подвижность

$$\begin{aligned} W &= (2n_1 + n_2 - 3) - V - 2(n_4 + 2n_5) = \\ &= (2 \cdot 1 + 9 - 3) - 6 - 2 \cdot 0 = 2. \end{aligned}$$

Результаты компьютерного моделирования синтезированного грузоподъемного механизма

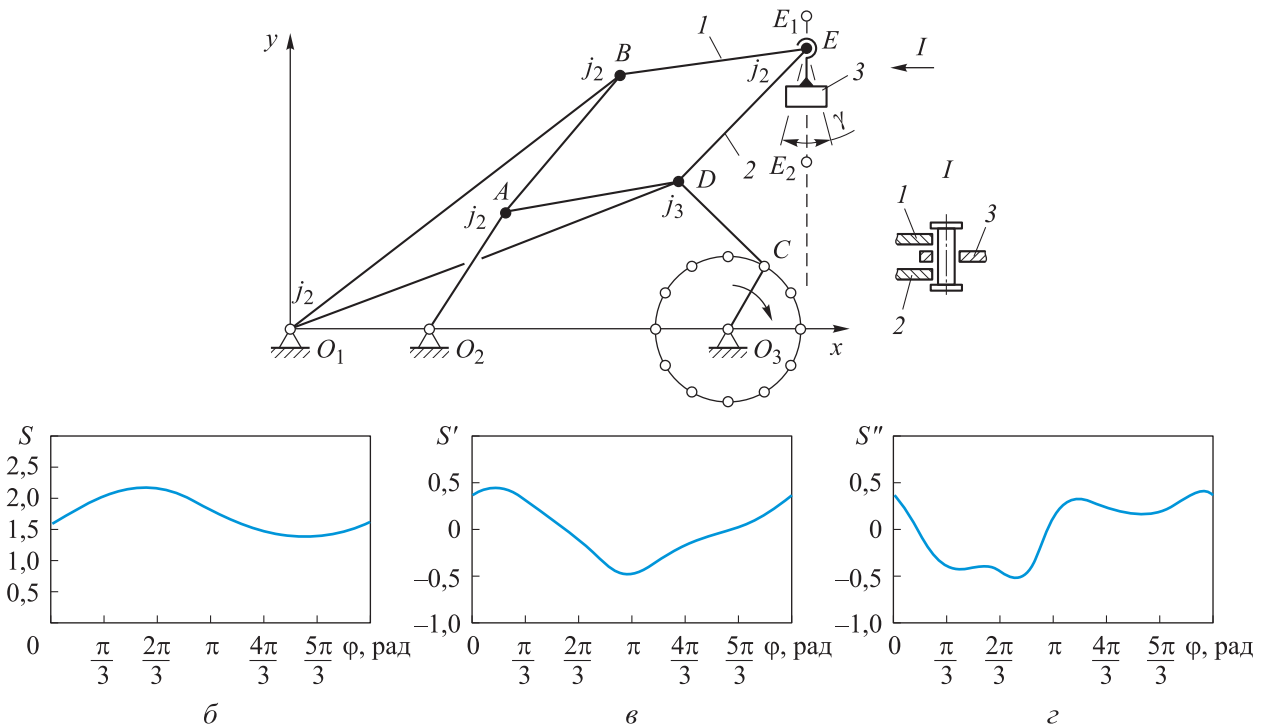


Рис. 3. Результаты структурного синтеза (а) и компьютерного моделирования движения грузоподъемного механизма в виде графиков перемещения (б), аналогов скоростей (в) и ускорений (г) т. Е шарнирного закрепления подвеса груза

[42], приведенные на рис. 3, б-з, подтверждают полное отсутствие угловых колебаний ($\gamma = 0$) подвеса с грузом и скачков (жестких и мягких ударов) на графиках скоростей $s'(\varphi)$ и ускорений $s''(\varphi)$ за полный цикл подъема и опускания этого груза. Это же полностью подтверждено на экспериментальной модели данного механизма.

Структурный синтез механической системы активной сейсмозащиты зданий. При строительстве зданий в сейсмоопасных районах возникает проблема эффективной сейсмозащиты их стен от стихийных землетрясений. Применяемый в настоящее время способ пассивной сейсмозащиты зданий, заключающийся в их установке на отдельные подвижные столбчатые элементы, которые взаимосвязаны упругими резинометаллическими элементами, является неэффективным, особенно для районов вечной мерзлоты.

Рассмотрим возможность создания металлической системы активной сейсмозащиты на основе применения рычажных многоконтурных механизмов со сложными шарнирами, устанавливаемыми внутри защищаемого здания для создания противодействия его разрушению от динамического воздействия землетрясения.

С учетом входных параметров

$$W = 1; \quad K = 5; \quad n_1 = 0; \quad p_2 = 0;$$

$$V \leq V_{\max} = 2(K - 1) = 8 \rightarrow V = 6$$

структурная математическая модель (1) принимает вид

$$\begin{cases} n_3 + 2n_4 + 3n_5 + 4n_6 = 2(K - 1) - V = 2; \\ n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 = W + 2K + 1 = 12; \\ v_2 + 2v_3 + 3v_4 + 4v_5 = V = 6. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\begin{cases} n_2 = 10; \quad n_3 = 2; \quad n_4 = n_5 = n_6 = 0 \rightarrow \tilde{n} = 12; \\ v_2 = 6; \quad v_3 = v_4 = v_5 = 0 \rightarrow \text{Code}[n_2 n_3 n_4 n_5 n_6] / V = (6) \\ = 6 \rightarrow [10.2000] / 6. \end{cases}$$

Синтезированная на основе решений (6) структурная схема двенадцатизвенного пятиконтурного рычажного механизма с шестью двойными шарнирами (j_2) показана на рис. 4.

Полученный механизм представляет собой синтезированную на уровне изобретений [44] подвижную механическую систему активной сейсмозащиты здания, приводимую в действие

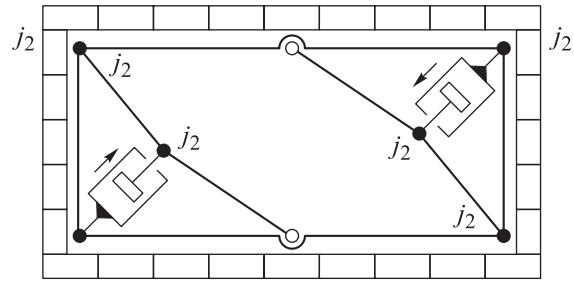


Рис. 4. Результаты синтеза подвижной механической системы активной сейсмозащиты зданий

при возникновении землетрясения с учетом его динамического воздействия (в баллах).

Для увеличения числа точек контактного противодействия (на рис. 4 число таких точек по внутреннему периметру стены равно шести) в рычажном механизме с подвижностью $W = 1$ установлено два приводных гидроцилиндра встречного направления действия, что повышает жесткость системы при ее установке внутри длинномерных зданий.

Структурный синтез плоского платформенного манипулятора с тремя степенями свободы.

Рассмотрим возможность применения совмещенных цилиндрических шарниров для создания платформенных манипуляторов, содержащих подвижную платформу с закрепленным на ней рабочим органом.

При входных параметрах

$$W = 3; \quad K = 5,$$

$$V \leq V_{\max} = 2(K - 1) = 8 \rightarrow V = 6$$

структурная математическая модель (1) принимает вид

$$\begin{cases} n_3 + 2n_4 + 3n_5 + 4n_6 = 2(K - 1) - V = 2; \\ n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 = W + 2K + 1 = 14; \\ v_2 + 2v_3 + 3v_4 + 4v_5 = V = 6. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\begin{cases} n_2 = 12; \quad n_3 = 2; \quad n_4 = n_5 = n_6 = 0 \rightarrow \tilde{n} = 14; \\ v_2 = 6; \quad v_3 = v_4 = v_5 = 0 \rightarrow \text{Code}[n_2 n_3 n_4 n_5 n_6] / V = (7) \\ = 6 \rightarrow [12.2000] / 6. \end{cases}$$

Структурная схема синтезированного на основе решений (7) рычажного механизма для образования платформенного манипулятора с подвижностью $W = 3$ [45] приведена на рис. 5, а. Эта схема содержит шесть двойных цилиндрических шарниров с параллельными осями вращения (j_2) и три приводных гидроци-

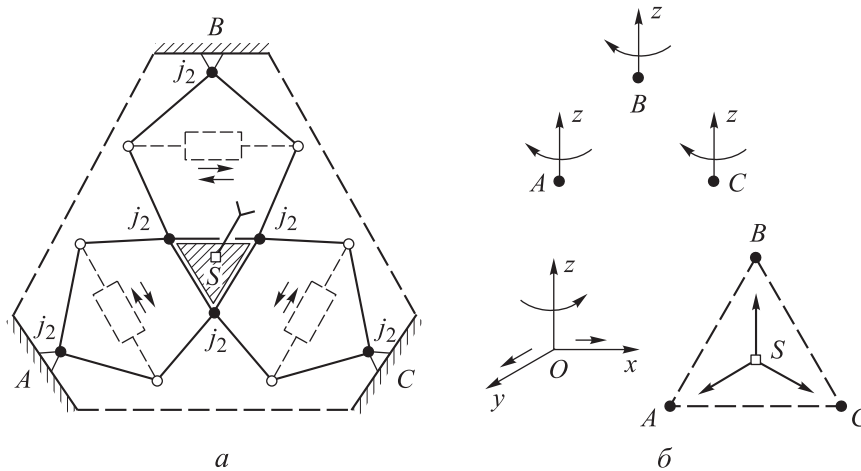


Рис. 5. Результаты синтеза плоского платформенного манипулятора с подвижностью $W = 3$: а — структурная схема манипулятора; б — возможные варианты движений платформы с рабочим органом

линдра, установленных внутри замкнутых контуров.

Результаты экспериментального исследования изготовленной действующей модели синтезированного плоского платформенного манипулятора (см. рис. 5, а), приведенные на рис. 5, б, подтвердили его работоспособность с подвижностью $W = 3$ и возможность выполнения следующих движений подвижной платформы с рабочим органом:

- вращения вокруг параллельных вертикальных осей z ;
- поступательного движения вдоль оси x или y ;
- поступательного движения вдоль осей, параллельных оси x или y ;
- поступательного движения вдоль каждой из трех осей, проходящих через вершины A , B и C , расположенные в опорных точках манипулятора;
- сохранения в процессе всех этих перемещений (свойство изоморфности) заданного горизонтального положения подвижной платформы с рабочим органом.

Преимущества синтезированного платформенного манипулятора со сложными шарнирами (см. рис. 5, а) перед известной платформой Стюарта с двенадцатью сложными сферическими шарнирами [35] заключаются в упрочении конструкции (за счет исключения всех двенадцати сферических шарниров), расширении функциональности манипулятора и упрощении системы его управления путем раздельной кинематики каждого из трех приводных двигателей.

Структурный синтез плоскопространственного манипулятора с тремя степенями свободы.

Рассмотрим возможности применения совмещенных цилиндрических шарниров для создания плоскопространственного манипулятора, который выполнен на основе плоского параллелограммного рычажного механизма, установленного на поворотную платформу.

С учетом входных параметров

$$W = 3; K = 3; V \leq V_{\max} = 2(K - 1) = 4 \rightarrow V = 2$$

структурная математическая модель (1) принимает вид

$$\begin{cases} n_3 + 2n_4 = 2(K - 1) - V = 2; \\ n_2 + n_3 + n_4 = W + 2K + 1 = 10; \\ v_2 + 2v_3 = V = 3. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\begin{cases} n_2 = 9; n_4 = 1 \rightarrow \tilde{n} = n_2 + n_4 = 10; \\ v_2 = 2; v_3 = 0 \rightarrow Code[n_2 n_3] / V = 2 \rightarrow [901] / 2. \end{cases} \quad (8)$$

Структурная схема синтезированного на основе решений (8) плоскопространственного манипулятора с подвижностью $W = 3$ приведена на рис. 6, а. Манипулятор содержит два двойных цилиндрических шарнира с параллельными осями вращения (j_2). Схема рабочего пространства манипулятора показана на рис. 6, б.

По сравнению с платформой Стюарта [35], синтезированный на уровне изобретений [46] манипулятор нового типа, выполненный в виде шарнирного параллелограмма, имеет следующие преимущества: простота сборки в плоско-

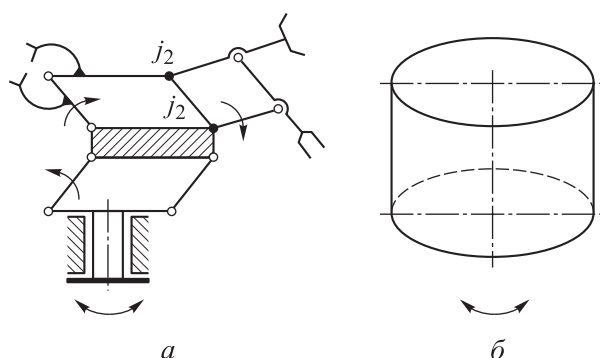


Рис. 6. Результаты синтеза поворотного плоскопространственного манипулятора на основе трехпараллелограммного механизма с подвижностью $W = 3$:
 а — структурная схема механизма; б — схема рабочего пространства манипулятора

сти в сочетании с работой в объемном рабочем пространстве, компактность в нерабочем положении и эксплуатационная эффективность благодаря раздельной кинематики управления несколькими рабочими органами.

Выводы

1. Предложенная методика структурного синтеза многозвенных механических систем (выполняемая без трудоемкого и бесперспективного перебора всех возможных сочетаний и наслоений друг на друга десятков тысяч [29] устанавливаемых групп Ассур) может быть применена для создания на уровне изобретений [42–46] новых разнообразных рычажных механизмов с расчетными совмещенными цилиндрическими шарнирами для разных областей техники в виде плоских и пространственных конструкций с десятью, одиннадцатью, двенадцатью и четырнадцатью звеньями КЦ.

2. Полная работоспособность синтезированных многозвенных механизмов с совмещенными шарнирами расчетного количества и кратности подтверждена результатами математического моделирования их кинематики и экспериментальными исследованиями их действующих макетов.

Литература

- [1] Артоболевский И.И. *Механизмы в современной технике*. Москва, ЛЕНАНД, 2019. 500 с.
- [2] Глазунов В.А., ред. *Новые механизмы в современной робототехнике*. Москва, Техносфера, 2018. 316 с.
- [3] Мудров А.Г., Мудрова А.А., Сахапов Р.Л. *Пространственные аппараты с мешалкой и смесители*. Москва, КноРус, 2021. 190 с.
- [4] Марковец К.И., Полотебнов В.О. Синтез механизмов транспортирования материалов с прямолинейным участком траектории движения зубчатой рейки. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, 2018, т. 39, № 1, с. 117–121.
- [5] Брискин Е.С., Беляев К.В. Шагающая машина Восьминог-М. *Прогресс транспортных средств и систем – 2005. Мат. межд. науч.-практ. конф.* Волгоград, ВолГТУ, 2005, с. 611–612.
- [6] Ceccarelli M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer, 2004. 312 p.
- [7] Li G., Miao Z., Li B. et al. Type synthesis to design variable camber mechanisms. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 8, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016666003>
- [8] Peisakh E.E. Technique of automated structural synthesis of planar jointed mechanisms. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2009, vol. 38, no. 1, pp. 62–70, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618809010129>
- [9] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm of planar simple kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [10] Hwang W.M., Hwang Y.W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints. *Mech. Mach. Theory*, 1992, vol. 27, no. 2, pp. 189–199, doi: [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(92\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0094-114X(92)90008-6)
- [11] Sun W., Kong J., Sun L. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains with multiple joints and isomorphism identification. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [12] Hasan A. Study of multiple jointed kinematic chains. *IJCER*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 13–19.
- [13] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47 no. 1, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>

- [14] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2019. 896 p.
- [15] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000619>
- [16] Talaba D. Mechanical models and the mobility of robots and mechanisms. *Robotica*, 2015, vol. 33, no. 1, pp. 181–193, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574714000149>
- [17] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1030–1050, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_56
- [18] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. In: *Advances in mechanical engineering*. *Springer*, 2017, pp. 45–56, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53363-6_6
- [19] Pozhbelko V., Ermoshina E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints of 1-DOF up to 5-loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. *Mech. Mach. Theory*, 2015, vol. 90, pp. 108–127, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.006>
- [20] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open, closed loop and mixed mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [21] Пожбелко В.И. Единая теория структуры механических систем. В: *Методы решения задач синтеза механизмов*. Челябинск, ЧГТУ, 1993, с. 19–56.
- [22] Ассур Л.В. *Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации*. Москва, Изд-во АН СССР, 1952. 592 с.
- [23] Кожевников С.Н. *Основания структурного синтеза механизмов*. Киев, Наукова думка, 1979. 232 с.
- [24] Решетов Л.Н. *Самоустанавливающиеся механизмы*. Москва, Машиностроение, 1979. 334 с.
- [25] Крайнев А.Ф. *Механика машин*. Москва, Машиностроение, 2001. 904 с.
- [26] Умнов Н.В., Сильвестров Э.Е. Использование методов гомотопии при синтезе механизмов. *Ст. док. межд. конф. по теории механизмов и машин*. Краснодар, Кубанский ГТУ, 2006, с. 47–48.
- [27] Романцев А.А. К вопросу создания структурных схем плоских шарнирных групп звеньев. *Теория механизмов и машин*, 2014, т. 12, № 1, с. 81–90.
- [28] Несмеянов И.А., Герасун В.М., Дяшкин-Титов В.В. Структурно-геометрический синтез манипулятора-трипода с кинематическими парами 5 класса. *Аграрная наука — основа успешного развития АПК и сохранения экосистем. Мат. межд. науч.-практ. конф.* Т. 3. Волгоград, Волгоградский ГАУ, 2012, с. 236–240.
- [29] Пейсах Э.Е. *Классификация плоских групп Асура*. В: *Академик Иван Иванович Артоболевский*. Москва, Наука, 2007, с. 147–160.
- [30] Пейсах Э.Е. Атлас структурных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2006, т. 4, № 1, с. 3–17.
- [31] Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2004, т. 2, № 2, с. 3–17.
- [32] Смелягин А.И. *Структура машин, механизмов и конструкций*. Москва, Инфра-М, 2019. 387 с.
- [33] Пейсах Э.Е. О структурном синтезе рычажных механизмов (комментарии к статье Л.Т. Дворникова. Опыт структурного синтеза механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2004, № 2(4)). *Теория механизмов и машин*, 2005, т. 3, № 1, с. 77–80.
- [34] Пейсах Э.Е. К дискуссии по проблеме структурного синтеза плоских шарнирных механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2006, т. 4, № 1, с. 49–54.
- [35] Коловский М.З., Евграфов А.Н., Семенов Ю.А. и др. *Теория механизмов и машин*. Москва, Академия, 2006. 560 с.
- [36] Фролов К.В., ред. *Теория механизмов и механика машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 664 с.
- [37] Кун С., Госселин К. *Структурный синтез параллельных механизмов*. Москва, Физматлит, 2012. 275 с.

- [38] Пожбелко В.И., Лившиц В.А. *Теория механизмов и машин в вопросах и ответах*. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2004. 439 с.
- [39] Куц Е.Н., Пожбелко В.И. Универсальный алгоритм синтеза структурных схем сложных одноподвижных и многоподвижных рычажных механизмов. *Современное машиностроение. Наука и образование*. Мат. 12-й Межд. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2022, с. 91–100.
- [40] Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Целочисленный структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов со сложными шарнирами для разных областей машиностроения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 6, с. 23–36, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-6-23-36>
- [41] Куц Е.Н. Структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложным двухшарнирным звеном. *Современное машиностроение. Наука и образование*. Мат. 8-й Межд. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2019, с. 201–214.
- [42] Куц Е.Н. Шарнирный грузоподъемный манипулятор. Патент РФ 2728850. Заявл. 08.10.2019, опубл. 31.07.2020.
- [43] Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Шарнирное зажимное устройство. Патент РФ 2729690. Заявл. 19.11.2019, опубл. 11.08.2020.
- [44] Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Подвижная механическая система сейсмозащиты зданий. Патент РФ 2742677. Заявл. 08.06.2020, опубл. 19.02.2021.
- [45] Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Платформенный механизм. Патент РФ 2737249. Заявл. 04.12.2019, опубл. 26.11.2020.
- [46] Пожбелко В.И. Параллельный манипулятор с тремя степенями свободы. Патент РФ 2753217. Заявл. 08.12.2020, опубл. 12.08.2021.

References

- [1] Artobolevskiy I.I. *Mekhanizmy v sovremennoy tekhnike* [Mechanisms in modern technics]. Moscow, LENAND Publ., 2019. 500 p. (In Russ.).
- [2] Glazunov V.A., ed. *Novye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018. 316 p. (In Russ.).
- [3] Mudrov A.G., Mudrova A.A., Sakhapov R.L. *Prostranstvennyye apparaty s meshalkoy i smesiteli* [Spatial apparatus with agitators and mixers]. Moscow, KnoRus Publ., 2021. 190 p. (In Russ.).
- [4] Markovets K.I., Polotebnov V.O. Synthesis of mechanisms of material handling mechanism with a toothed bar straight line section of the movement. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti* [The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry], 2018, vol. 39, no. 1, pp. 117–121. (In Russ.).
- [5] Briskin E.S., Belyaev K.V. [Vosminog-M walking machine]. *Progress transportnykh sredstv i sistem — 2005. Mat. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Progress of Vehicles and Transport Systems — 2005. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Volgograd, VolGTU Publ., 2005, pp. 611–612. (In Russ.).
- [6] Ceccarelli M. Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. *Springer*, 2004. 312 p.
- [7] Li G., Miao Z., Li B. et al. Type synthesis to design variable camber mechanisms. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 8, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016666003>
- [8] Peisakh E.E. Technique of automated structural synthesis of planar jointed mechanisms. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2009, vol. 38, no. 1, pp. 62–70, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618809010129>
- [9] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm of planar simple kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [10] Hwang W.M., Hwang Y.W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints. *Mech. Mach. Theory*, 1992, vol. 27, no. 2, pp. 189–199, doi: [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(92\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0094-114X(92)90008-6)

- [11] Sun W., Kong J., Sun L. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains with multiple joints and isomorphism identification. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [12] Hasan A. Study of multiple jointed kinematic chains. *IJCER*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 13–19.
- [13] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47 no. 1, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>
- [14] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2019. 896 p.
- [15] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000619>
- [16] Talaba D. Mechanical models and the mobility of robots and mechanisms. *Robotica*, 2015, vol. 33, no. 1, pp. 181–193, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574714000149>
- [17] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1030–1050, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_56
- [18] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. In: *Advances in mechanical engineering*. Springer, 2017, pp. 45–56, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53363-6_6
- [19] Pozhbelko V., Ermoshina E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints of 1-DOF up to 5-loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. *Mech. Mach. Theory*, 2015, vol. 90, pp. 108–127, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.006>
- [20] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open, closed loop and mixed mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [21] Pozhbelko V.I. Edinaya teoriya struktury mekhanicheskikh system [Unified theory of the structure of mechanical systems]. V: *Metody resheniya zadach sinteza mekhanizmov* [Methods of solving problems of mechanism synthesis]. Chelyabinsk, ChGTU Publ., 1993, pp. 19–56. (In Russ.).
- [22] Assur L.V. *Issledovanie ploskikh sterzhnevnykh mekhanizmov s nizshimi parami s tochki zreniya ikh struktury i klassifikatsii* [Study of flat bar mechanisms with inferior pairs in terms of their structure and classification]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1952. 592 p. (In Russ.).
- [23] Kozhevnikov S.N. *Osnovaniya strukturnogo sinteza mekhanizmov* [Fundamentals of structural synthesis of mechanisms]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).
- [24] Reshetov L.N. *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy* [Self-aligning mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 334 p. (In Russ.).
- [25] Kraynev A.F. *Mekhanika mashin* [Machine mechanics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 904 p. (In Russ.).
- [26] Umnov N.V., Silvestrov E.E. [Using homotopy methods for mechanism synthesis.]. *St. dok. mezhd. konf. po teorii mekhanizmov i mashin* [Proc. Int. Conf. on Mechanisms and Machine Theory]. Krasnodar, Kubanskiy GTU Publ., 2006, pp. 47–48. (In Russ.).
- [27] Romantsev A.A. To the question of creating structural schemes of flat articulated groups of links. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2014, vol. 12, no. 1, pp. 81–90. (In Russ.).
- [28] Nesmeyanov I.A., Gerasun V.M., Dyashkin-Titov V.V. [Structural and geometrical synthesis of a tripod manipulator with kinematic pairs of class 5]. *Agrarnaya nauka — osnova uspehnogo razvitiya APK i sokhraneniya ekosistem. Mat. mezhd. nauch.-prakt. konf. T. 3* [Agrarian Science — Basis of Successful Development of Agroindustrial Complex and Preservation of Ecosystem. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 3]. Volgograd, Volgogradskiy GAU Publ., 2012, pp. 236–240. (In Russ.).
- [29] Peysakh E.E. Klassifikatsiya ploskikh grupp Assura [Classification of flat Assur groups]. V: *Akademik Ivan Ivanovich Artobolevskiy* [Academician Ivan Ivanovich Artobolevskiy]. Moscow, Nauka Publ., 2007, pp. 147–160. (In Russ.).

- [30] Peysakh E.E. Atlas of structural schemes of eight-link planar articulated mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2006, vol. 4, no. 1, pp. 3–17. (In Russ.).
- [31] Dvornikov L.T. Experience of structural synthesis of mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2004, vol. 2, no. 2, pp. 3–17. (In Russ.).
- [32] Smelyagin A.I. *Struktura mashin, mekhanizmov i konstruksiy* [Structure of machines, mechanisms and constructions. Moscow, Infra-M Publ., 2019. 387 p. (In Russ.).
- [33] Peysakh E.E. On the structural synthesis of lever mechanisms (comments on the article by L.T. Dvornikov Experience of structural synthesis of mechanisms. Theory of Mechanisms and Machines, 2004, no. 2(4)). *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2005, vol. 3, no. 1, pp. 77–80. (In Russ.).
- [34] Peysakh E.E. To the discussion on the problem of structural synthesis of planar articulated mechanism. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2006, vol. 4, no. 1, pp. 49–54. (In Russ.).
- [35] Kolovskiy M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A. et al. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 560 p. (In Russ.).
- [36] Frolov K.V., ed. *Teoriya mekhanizmov i mekhanika mashin* [Theory of mechanisms and mechanics of machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 664 p. (In Russ.).
- [37] Kun S., Gosselin K. *Strukturnyy sintez paralelnykh mekhanizmov* [Structural synthesis of parallel mechanisms]. Moscow, Fizmatlit, 2012. 275 p. (In Russ.).
- [38] Pozhbelko V.I., Livshits V.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin v voprosakh i otvetakh* [Theory of mechanisms and machines in questions and answer]. Chelyabinsk, Izd-vo YuUrgU, 2004. 439 p. (In Russ.).
- [39] Kutz E.N., Pozhbelko V.I. [A new structural synthesis method of multiloop linkages with multiple joints]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Mat. 12-oy Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Modern Mechanical Engineering: Science and Education. Proc. 12th Sci.-Pract. Conf.]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2022, pp. 91–100. (In Russ.).
- [40] Pozhbelko V.I., Kuts E.N. Integer structural synthesis of multiloop lever mechanisms with multiple joints for different areas of mechanical engineering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 6, pp. 23–36, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-6-23-36> (in Russ.).
- [41] Kuts E.N. [Modern mechanical engineering: science and education structural synthesis of multiloop linkage mechanisms with multiple joints and the most complex binary link]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Mat. 8-oy Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Modern Mechanical Engineering: Science and Education. Proc. 8th Sci.-Pract. Conf.]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2019, pp. 201–214. (In Russ.).
- [42] Kuts E.N. *Sharnirnyy gruzopodemnyy manipulyator* [Hinged load lifting manipulator]. Patent RU 2728850. Appl. 08.10.2019, publ. 31.07.2020. (In Russ.).
- [43] Pozhbelko V.I., Kuts E.N. *Sharnirnoe zazhimnoe ustroystvo* [Hinged clamping device]. Patent RU 2729690. Appl. 19.11.2019, publ. 11.08.2020. (In Russ.).
- [44] Pozhbelko V.I., Kuts E.N. *Podvizhnaya mekhanicheskaya sistema seymozashchity zdaniy* [Movable mechanical seismic protection system of a building]. Patent RU 2742677. Appl. 08.06.2020, publ. 19.02.2021. (In Russ.).
- [45] Pozhbelko V.I., Kuts E.N. *Platformennyy mekhanizm* [Platform mechanism]. Patent RU 2737249. Appl. 04.12.2019, publ. 26.11.2020. (In Russ.).
- [46] Pozhbelko V.I. *Parallelnyy manipulyator s tremya stepenyami svobody* [Parallel manipulator with three degrees of freedom]. Patent RU 2753217. Appl. 08.12.2020, publ. 12.08.2021.

Статья поступила в редакцию 23.12.2022

Информация об авторах

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

КУЦ Екатерина Николаевна — старший преподаватель кафедры «Строительное производство и теория сооружений». ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (454080, Челябинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 76, e-mail: ekaterina.n.kuts@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Теория и практика структурного синтеза новых рычажных механизмов с совмещенными цилиндрическими шарнирами для разных областей техники. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 23–37, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-23-37

Please cite this article in English as:

Pozhbelko V.I., Kuts E.N. Theory and application of structural synthesis of the new lever mechanisms with the multiple cylinder joints for different technology areas. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 23–37, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-23-37

Information about the authors

POZHBELKO Vladimir Ivanovich — Honored worker of Higher School of RF, Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technical Mechanics. 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: pozhhbelkovi@susu.ru).

KUTS Ekaterina Nikolaevna — Senior Lecturer, Department of Construction Operations and Theory of Structures. 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: ekaterina.n.kuts@gmail.com).



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие

«Теория поддресоривания высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин»

Авторы: Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач, А.А. Стадухин

Рассмотрены вопросы теории поддресоривания транспортных гусеничных машин: критерии плавности хода, прогнозирование быстроходности при ограничении по системе поддресоривания, математическое моделирование движения гусеничной машины по неровностям местности и моделирование дорожно-грунтовых условий, синтез многоуровневых систем поддресоривания и выбор их характеристик, управляемые системы поддресоривания гусеничных и колесных машин, а также вопросы управления углом складывания секций двухзвенной гусеничной машины в целях повышения быстроходности. Представлены перспективы развития систем поддресоривания.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Транспортные средства специального назначения» и «Наземные транспортно-технологические средства».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>