

УДК 621.01(075.8)

doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-55-72

Универсальный метод структурного синтеза и построения полного атласа многоконтурных ортогональных структур самоустанавливающихся рычажных механизмов в машиностроении

В.И. Пожбелко

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

Universal Structural Method in Synthesis and Constructing the Complete Atlas of the Multiloop Orthogonal Structures of the Self-Adjusting Linkages in Mechanical Engineering

V.I. Pozhbelko

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

Рассмотрены теория и практика структурного синтеза, классификации сборок и построения полного атласа многоконтурных механизмов нового класса, названных ортогональными, в которых многошарнирные рычажные звенья выполнены с расположением всех шарниров на одной линии. Предложен оригинальный универсальный метод структурного синтеза указанных многозвенных рычажных механизмов с заданным большим числом независимых замкнутых контуров в кинематической цепи для создания разнообразных механизмов с заданным разным числом степеней свободы их привода. Использование этого метода для создания новых эффективных многозвенных механизмов не требует применения сложных компьютерных программ и рассмотрения десятков тысяч групп Ассура, чтобы построить полные атласы в замкнутых цепях механизмов параллельной структуры, гарантировано не содержащие вредных избыточных связей. Это позволяет решить задачу структурного синтеза самоустанавливающихся ортогональных механизмов, включающих в себя как однократные, так и многократные шарнирные соединения рычажных звеньев. На базе предложенного алгоритма ортогонального структурного синтеза впервые построен полный атлас из двадцати неизоморфных трехконтурных ортогональных восьмизвенных базовых кинематических цепей, на основе которых синтезировано двадцать семь новых схем одноподвижных плоских шарнирных механизмов с простыми шарнирами, что увеличивает возможный состав их базы данных до 180 замкнутых структур. Эффективность применения предложенного универсального метода синтеза подтверждена примерами изобретений разнообразных многоконтурных ортогональных самоустанавливающихся рычажных механизмов и манипуляторов параллельной структуры.

Ключевые слова: оптимальный структурный синтез, самоустанавливающиеся рычажные механизмы, атлас неизоморфных цепей, шарнирные манипуляторы

The paper considers theory and practice of structural synthesis, classification of assembly and construction of a complete atlas of the new class multi-loop mechanisms, where the multi-hinge linkages are made with all hinges positioned on the same line, such mechanisms are called the orthogonal mechanisms. Original universal method is proposed for structural synthesis of these multi-hinge linkage mechanisms with a given large number of independent closed loops in the kinematic chain to create a variety of mechanisms with the given different number of degrees of freedom of their drive. Using this method to create new efficient multilink mechanisms does not require introduction of complex computer programs and consideration of tens of thousands of the Assur groups in order to build complete atlases in closed chains of the parallel structure mechanisms reliably not containing any harmful redundant links. This makes it possible to solve the problem of structural synthesis of the self-adjusting orthogonal mechanisms, including both single and multiple hinged joints of the lever links. Based on the orthogonal structural synthesis proposed algorithm, a complete atlas of 20 non-isomorphic three-circuit orthogonal eight-link basic kinematic chains was constructed for the first time, which formed the basis for synthesizing 27 new schemes of single-moving flat hinged mechanisms with simple hinges. This increases the possible composition of their database to 180 closed structures. Effectiveness of the proposed universal synthesis method is confirmed by examples of inventions of various multi-loop orthogonal self-adjusting lever mechanisms and manipulators of the parallel structure.

Keywords: optimal structural synthesis, self-adjusting lever mechanisms, atlas of non-isomorphic chains, articulated manipulators

Обоснование проблемы структурного синтеза.

Многоконтурные многозвенные самоустанавливающиеся рычажные механизмы с неподвижными вращательными кинематическими парами нашли широкое применение в разных отраслях машиностроения благодаря надежности, технологичности изготовления и широким эксплуатационным возможностям [1–7].

Структурный синтез таких многоконтурных механизмов параллельной структуры является первоочередным, наиболее важным и самым проблематичным этапом по следующим причинам [8–14]:

- неизвестное количество возможных (неизоморфных решений) не позволяет оценить правильность и полноту результатов синтеза для построения атласа;

- полный массив расчетной информации в виде генерируемых комбинаторным путем базовых кинематических цепей (БКЦ) с числом звеньев \tilde{n} для образования на их основе разных механизмов составляет $\tilde{n}!$, вследствие чего, для $\tilde{n}=8$ этот массив составит 40 150 замкнутых БКЦ, а для $\tilde{n}=11$ и более — несколько миллионов таких структур;

- первый парадокс заключается в том, что из десятков и сотен тысяч структурных схем (генерируемых на первом этапе синтеза) только 0,1 % оказываются структурно неповторяющимися (неизоморфными [15–19]), т. е. из генерируемых БКЦ более 99,9 % схем оказываются

«мусорными», и их надо удалять из массива информации;

- второй парадокс состоит в том, что компьютерная программа для выявления и удаления из массива 99,9 % «мусорных» схем оказывается не только более сложной, но и ненадежной по сравнению с программой их генерирования, вследствие чего будет давать заведомо ошибочный результат для построения атласа.

Рассмотренные в научной литературе [15, 20–29] и отсутствующие (из-за их сложности и неоднозначности) в базовых учебниках по теории механизмов и машин (ТММ) [23, 30] методы структурного синтеза многоконтурных механизмов и построения атласов всех возможных структур замкнутых многозвенных БКЦ и механизмов можно подразделить следующим образом:

- синтез и построение атласов замкнутых БКЦ в виде неизоморфных топологических графов, который можно применять для создания рычажных и зубчатых механизмов [16–19, 30–42];

- синтез БКЦ и механизмов на основе целочисленных решений структурных математических моделей [5, 33, 43, 44];

- теоретический единичный структурный синтез последовательным наложением разных групп Ассур [17, 30, 35], который нельзя использовать на практике для построения атласов со всеми возможными неизоморфными структурами по следующим причинам:

– число n -звенных групп Ассур ($n = 6, 8, 10, 12$) составляет десятки тысяч [17], а их перебор дает сотни тысяч схем, из которых необходимо оставить только 0,01 %;

– согласно работе профессора Н.В. Умнова [29], такой метод синтеза является тупиковым, так как требует составления на основе матриц изоморфности и решения уравнений очень высокой степени, а также наличия очень сложных программных комплексов как для генерирования всех возможных схем, так и для отсева из них 99,9 % «мусорных» схем.

Цель исследования — разработка универсального метода структурного синтеза и построения полного атласа ортогональных схем БКЦ для оптимального (по теории профессоров С.Н. Кожевникова [28] и Л.Н. Решетова [42]) синтеза любых сложных \tilde{n} -звенных самоустанавливающихся (без избыточных связей, $q = 0$) механизмов с числом независимых (внутренних) замкнутых контуров K [6].

Предлагаемый метод исключает перебор десятков тысяч сочетаний всех возможных многозвенных групп Ассур, а его эффективность подтверждена примерами [45–48].

Научная дискуссия об атласах структурного синтеза. Одной из самых сложных проблем, имеющих как научное (в ТММ), так и практическое (в машиностроении) значение, является построение атласов всех возможных сложных многоконтурных БКЦ для создания на их основе самоустанавливающихся механизмов.

Чтобы атлас БКЦ был полным, т. е. содержал все возможные структуры, они должны быть неповторяющимися, а их количество N должно быть равно расчетной величине N^* , не зависящей ни от метода синтеза, ни от компьютерной технологии или неавтоматических методов построения атласа.

Атласы полученных структур, в которых $N > N^*$, являются избыточными, так как включают в себя изоморфные схемы. Атласы, где $N < N^*$, не охватывают все возможные структуры, и тогда выбранную из них схему нельзя считать оптимальной для машиностроения.

В результате возникает ситуация, названная *hard nut* (твердым орешком) [9–14, 20], при которой:

- с одной стороны, только атласы, которые удовлетворяют критерию $N = N^*$, могут называться полными;

- с другой стороны, в научной литературе (как отечественной, так и зарубежной) до сих пор отсутствует «магическая формула» для расчета величины N^* ;

- отсутствие этого строгого математического критерия приводит к другим случайным словесным оценочным критериям достоверности результатов синтеза (внешне похожи или *well-known* (как у всех) [9, 11, 28]) и возникновению научных дискуссий, при которых ни у кого нет математического аргумента в виде расчетной величины N^* .

Примером, подтверждающим сложность проблемы структурного синтеза, является начатая более ста лет назад (в 1917 г.) научная дискуссия о достоверности полученного разными авторами (в их синтезированных атласах) разного количества ($N = 12...25?$) схем шести- и восьмизвенных БКЦ и одноподвижных шарнирных механизмов с простыми шарнирами.

Первый атлас восьмизвенных неизоморфных цепей, содержащий двенадцать замкнутых структур, который построил М. Грюблер, приведен в его учебнике по ТММ, изданном в Германии в 1917 г.

Второй атлас восьмизвенных БКЦ, расширенный до шестнадцати замкнутых структур, составил К. Хайн в 1955 г. Позже его подтвердил Э.Е. Пейсах [34].

Этот же атлас в течение многих десятилетий (начиная с 1955 г.) был повторен в работах зарубежных ученых [11, 23, 34] с применением как теории графов, так и разных компьютерных технологий автоматического структурного синтеза.

В большом электронном каталоге Э.Е. Пейсаха, впервые построенном с использованием компьютерных технологий [34–37], приведены результаты структурного синтеза атласов из девяти одноподвижных шестизвенных механизмов, шестнадцати неизоморфных восьмизвенных цепей и 153 шарнирных одноподвижных механизмов, а также массив атласов из \tilde{n} -звенных групп Ассур числом от 10 (для $\tilde{n} = 6$) до 251 638 (для $\tilde{n} = 12$).

В работе А.А. Романцева [41] предложен новый метод синтеза шарнирных групп звеньев нулевой подвижности и на его основе построен атлас из 54 шестизвенных шарнирных групп нулевой подвижности ($W = 0$) и рассмотрены разные подходы к идентификации структур.

В разных работах В.И. Пожбелко приведены полученные на основе единой теории структу-

ры [6, 32] следующие результаты структурного синтеза:

- топологический атлас (на основе теории графов) и соответствующий ему атлас из двадцати неизоморфных восьмизвенных БКЦ для синтеза механизмов с числом степеней свободы (подвижностью) $W = 1$ [8, 26];

- расширенный атлас [44], содержащий двадцать цепей для синтеза механизмов и пять дополнительных цепей для создания механизмов с подвижностью $W = 1$ и 2;

- комплект атласов [33] из 66 трехконтурных восьмизвенных цепей, включающих в себя 24 неизоморфных БКЦ и всех возможных 42 их обратимых инвариантов, из которых только за счет всех вариантов стойки построен атлас из 116 механизмов;

- полный комплект атласов с рассчитанными на основе единой структурной математической модели [6] с различными универсальными структурными таблицами всех возможных кодов правильного строения многозвенных ($\tilde{n} = 4 \dots 15$) K -контурных рычажных механизмов без избыточных связей с подвижностью $W = 1, 2, 3$ [6, 32, 44].

В работе профессора Л.Т. Дворникова [38] на основе добавляемых к базисному звену расчетных виртуальных звеньев построен атлас из семи разных шестизвенных механизмов, категорично и математически бездоказательно названный полным составом шестизвенных шарнирных механизмов (очевидно, Л.Т. Дворников не знал, что well-known установлено существование девяти таких механизмов, из которых четыре являются механизмами Watt и пять — механизмами Stephenson, и все они приведены в атласе Э.Е. Пейсаха [37]).

В этой же работе Л.Т. Дворникова [38] на основе того же «ручного метода» построен атлас из 90 разных восьмизвенных плоских рычажных механизмов, также категорично и математически бездоказательно названных их полным составом (очевидно, профессор Дворников не знал, что Э.Е. Пейсах в 1998 г. создал расширенный (в 1,5 раза) атлас из 153 механизмов [36], и чтобы подогнать свои результаты к их правильному числу начал в журнале ТММ [37] двухлетнюю дискуссию (7 или 9, 90 или 153) в такой некорректной для ученого форме, что она [37] была прекращена редакцией.

В работе Л.Т. Дворникова [39] база данных из 160 восьмизвенных шарнирных механизмов,

голословно заявленная как полная, таковой тоже не является, так как первоначальный атлас профессора Э.Е. Пейсаха [36] из 153 механизмов (с учетом полученного в настоящей статье атласа с двадцатью семью дополнительными схемами) можно расширить до 180.

Предложенный в работе [40] атлас из двадцати двух внешне непохожих восьмизвенных замкнутых цепей, опять же математически бездоказательно и голословно был заявлен как полный. Этот вывод, к сожалению, только вводит читателя в заблуждение и показывает некомпетентность в данном вопросе профессора Л.Т. Дворникова, так как простой (и доступный даже обычному студенту) анализ строения этих внешне непохожих 22 цепей на основе well-known матриц смежности звеньев вида 8×8 позволяет точно установить, что этот атлас ошибочно содержит три пары повторяющихся структур (что видно в атласе, приведенном в статье [40]), с учетом исключения которых правильно составленный атлас будет содержать только девятнадцать неизоморфных восьмизвенных цепей.

Предлагаемый далее алгоритм ортогонального структурного синтеза позволяет:

- получить формулу для математически точного расчета количества возможных неизоморфных БКЦ N^* ;

- построить полный атлас из $N = [N^* = 20]$ ортогональных восьмизвенных БКЦ и производных от них 27 дополнительных механизмов, что расширяет общее число существующих трехконтурных восьмизвенных механизмов с простыми шарнирами до 180;

- установить на основе точного математического критерия $N^* = 20$, что полный атлас должен содержать именно 20 (не более 25 и не менее 12) разных неизоморфных трехконтурных восьмизвенных БКЦ для синтеза из них всех возможных рычажных механизмов подвижностью $W = 1$, и тем самым закрыть 100-летнюю научную дискуссию по полученным разными авторами атласам.

Основные понятия и структурные уравнения.

Расчетный ассортимент (набор) двух- ($i = 2$) *и мног шарнирных* ($i \geq 3$) *звеньев БКЦ для синтеза механизма без избыточных связей определяется выражением*

$$[LA] = [n_2 n_3 n_4 \dots n_{i_{\max}}]; \quad i_{\max} = K + W, \quad (1)$$

где n_i — число шарнирных звеньев БКЦ.

Расчетный ассортимент (набор) замкнутых контуров БКЦ

$$[L_{\alpha}] = [\alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \dots - \alpha_{k_{\max}}] = [4 - 5 - 6 - \dots - k_{\max}], \quad (2)$$

где α_k — число контуров с количеством сторон k ; k — число сторон каждого из $(K + 1)$ -х замкнутых контуров БКЦ; $k_{\max} = L_0$ — число сторон наружного (внешнего наибольшего) контура БКЦ.

Расчетный диапазон изменения числа сторон наружного контура в K -контурной БКЦ

$$4 \leq L_0 \leq [(W + 2K + 1) - V],$$

где V — приведенное число многократных шарнирных соединений звеньев, с расчетным диапазоном

$$0 \leq V \leq [V_{\max} = 2(K - 1) + n_1]. \quad (3)$$

Это диапазон позволяет охватить при синтезе семейства механизмов как с простыми шарнирами ($V = 0$), так и со всеми возможными структурами ($V \geq 1$) [7].

Расчетные коды правильного строения замкнутых БКЦ синтезируемых механизмов имеют вид

$$\text{Code}[LA]/V = [n_2 n_3 n_4 \dots n_{\max}] / V.$$

Расчетные коды составлены в виде полного каталога универсальных структурных таблиц для синтеза всех возможных плоских и пространственных сферических механизмов со следующими входными параметрами: $W = 1, 2, 3$; $1 \leq K \leq 6$; $0 \leq V \leq 10$; $4 \leq \tilde{n} \leq 15$ [6, 32, 44].

Структурная матрица, содержащая информацию о требуемом цифровом коде строения подвижной механической системы для структурного синтеза механизмов без избыточных связей с заданными входными параметрами W, K, V , имеет вид

$$[S]_W^K = [LA]/V. \quad (4)$$

Полный массив всех возможных цифровых вариантов структурных матриц для синтеза рычажных механизмов с подвижностью $W = 1, 2, 3$ приведен в работах [6, 32, 44].

Ортогональные рычажные ML -звенья (ML — Multiple Link) представляют собой многошарнирные звенья ($i \geq 3$), все шарниры которых расположены на одной линии.

Основные типы сборок для структурного синтеза ортогональных БКЦ, создаваемых из расчетных наборов $[LA]/V$, следующие:

- сборка А, выполняемая из всех многошарнирных звеньев ($i \geq 3$), входящих в состав $[LA]/V$, представляет собой начальный этап структурного синтеза БКЦ.

- сборка В, заключающаяся в добавлении к сборке А всех двухшарнирных звеньев ($i = 2$) из расчетного набора $[LA]/V$ для превращения открытой цепи ML -звеньев в замкнутую K -контурную цепь, является заключительным этапом структурного синтеза БКЦ;

- сборка М, заключающаяся в образовании из сборки В семейства механизмов с различным выбором стойки и входных звеньев.

Классификация сборок А. По возможному взаиморасположению ортогональных ML -звеньев сборку А подразделяют на три основных вида:

I — раздельную, где все ML -звенья из расчетного набора $[LA]$ отделены друг от друга;

II — совместную, в которой все ML -звенья из расчетного набора $[LA]$ шарнирно соединены между собой;

III — комбинированную, включающую в себя шарнирно связанные и отдельно расположенные ML -звенья из расчетного набора $[LA]$.

Условие существования раздельных сборок А зависит от состава набора $[LA]$ и определяется соотношением

$$2n_2 \geq 3n_3 + 4n_4 + \dots + i_{\max} n_{\max}.$$

Для идентификации ортогональных сборок А многошарнирных ML -звеньев используют два критерия:

- $\mu = e + i$ — число свободных шарниров для присоединения через них к ML -звеньям всех двухшарнирных звеньев из расчетного набора $[LA]$;

- $\bar{c} = ei$ — индекс сборки А, где e — число внешних шарниров на ортогональных ML -звеньях; i — число внутренних (т. е. расположенных между внешними) шарниров на ортогональных ML -звеньях.

Идентификация замкнутых неизоморфных сборок В проводится по набору в их строении замкнутых контуров

$$[L_{\alpha}] = [4 - 5 - 6 - \dots - L_0].$$

Расчетное количество неизоморфных БКЦ, которое должен содержать полный атлас K -контурных структур, представляет собой общее число сочетаний между собой сборок А и В и определяется выражением

$$N_{\Pi}^* = \sum_{k=1}^{k_{\max}} (A_k B_k). \quad (5)$$

Согласно соотношению (3) любой полный атлас синтезированных K -контурных \tilde{n} -звенных БКЦ (независимо от того, каким методом выполнен их структурный синтез) должен содержать количество структур N_{Π} , равное расчетному N_{Π}^* :

$$N_{\Pi} = N_{\Pi}^*.$$

Расчетное количество неизоморфных механизмов, которое должен содержать полный атлас таких K -контурных структур, представляет собой общее число сочетаний сборок C (с выбором в качестве стройки разных i -шарнирных звеньев) и D (с выбором разных i -шарнирных входных звеньев) и определяется выражением

$$N_M^* = \sum_{i=2}^{i_{\max}} (C_i D_i).$$

Структурная математическая модель многоконтурных механизмов (VIP-Model) представляет собой совместную систему линейных алгебраических уравнений с большим числом неизвестных избыточных структурных параметров для синтеза всех возможных БКЦ с ортогональными звеньями.

Согласно единой теории структуры механических систем [6] для любых плоских и пространственных рычажных механизмов без избыточных связей, работающих в пространстве с числом степеней свободы h в диапазоне $2 \leq h \leq 6$, $W \geq 1$; $K \geq 2$; $0 \leq V \leq 2(K-1)$, VIP-Model имеет вид

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{i_{\max}} i n_i = 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V; \\ \sum_{i=1}^{i_{\max}} (i-2) n_i = 2(K-1) - V; \\ \sum_{k=4}^{k_{\max}} k \alpha_k = 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V, \end{cases} \quad (6)$$

где K_h — число замкнутых контуров, существующих в пределах пространства возможных движений $2 \leq h \leq 6$; f — дополнительная подвижность высших кинематических пар (по сравнению с одноподвижными кинематическими парами) [6].

Предлагаемая трехкомпонентная модель многоконтурных механических систем состоит из трех структурно взаимосвязанных компонентов в виде расчетных наборов ML -, BL -звеньев (BL — Binary Link) и L_{α} -замкнутых контуров, рассчитываемых на основе структурных уравнений модели (6) и представляющих собой це-

лочисленные решения $[LA] = [ML] + [BL]$ (1) и $[L_{\alpha}]$ (2) для составления на их базе алгоритма ортогонального структурного синтеза многоконтурных самоустанавливающихся рычажных механизмов.

Полный массив впервые установленных целочисленных решений общей математической модели (6) представляет все возможные выходные параметры структурного синтеза K -контурных механизмов, которые сведены в периодические в диапазоне $0 \leq V \leq 2(K-1)$ (для каждого из контуров $K \geq 2$) оригинальные универсальные структурные таблицы расчетных кодов $[LA]/V$ правильного строения механизмов [6, 36, 44].

Алгоритм ортогонального структурного синтеза БКЦ многоконтурных механизмов. Предлагаемый универсальный метод структурного синтеза позволяет создать все возможное многообразие контурных \tilde{n} -звенных подвижных структур ($W \geq 1$) без избыточных связей, т. е. осуществить оптимальный структурный синтез (по С.Н. Кожевникову [28]) без применения:

- десятков, сотен и тысяч различных групп Ассура с подвижностью $W = 0$, указанных в полном электронном каталоге Э.Е. Пейсаха [18];
- генерирования из этого множества групп Ассура массива из сотен тысяч ($\tilde{n}!$) возможных многозвенных схем;
- еще более сложного и заведомо ненадежного отбора из этих сотен тысяч схем 0,1 % неизоморфных структур для попытки построения их полного атласа.

Алгоритм ортогонального структурного синтеза БКЦ многоконтурных механизмов включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Расчет всех неотрицательных целочисленных решений структурной математической модели (6) для построения на их основе структур любой сложности и полных атласов БКЦ многоконтурных механизмов при входных параметрах структурного синтеза

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

Следует отметить, что применение для создания конкретных и наиболее востребованных в машиностроении многозвенных рычажных механизмов ($6 \leq \tilde{n} \leq 15$) с входными параметрами синтеза $1 \leq W \leq 3$, $2 \leq K \leq 6$, $0 \leq V \leq 10$ полного каталога универсальных структурных

таблиц всех расчетных кодов $[LA]/V$ правильного строения механизмов без избыточных связей [6, 32, 44] позволяет начать синтез сразу с шага 2.

Тогда дальнейший синтез БКЦ из расчетного набора $[LA]$ разделяют на два этапа — сборку А (из всех звеньев с числом шарниров $i \geq 3$) и сборку В (путем добавления к ним всех остальных звеньев с $i = 2$).

Шаг 2. Сборка А (начальный этап синтеза БКЦ), выполняемая в виде открытых кинематических цепей (с числом свободных шарниров $\mu \geq 4$), образованных из всех входящих в данный набор $[LA]$ ортогональных многошарнирных звеньев (с числом шарниров $i \geq 3$).

Шаг 3. Сборка В (конечный этап синтеза БКЦ), осуществляемая путем присоединения к сборке А всех остальных двухшарнирных звеньев, для образования замкнутых кинематических цепей с заданным числом независимых замкнутых контуров и их расчетным ассортиментом $[L_\alpha]$, обеспечивающим число сторон наружного контура L_0 в расчетном диапазоне

$$4 \leq L_0 \leq (L_0)_{\max} = (W + 2K + 1) - V,$$

где $(L_0)_{\max}$ — максимальное число сторон наружного контура.

Шаг 4. Построение систематизированных полных атласов БКЦ, в которых количество неизоморфных схем N должно быть равно его значению N^* , рассчитанному по формуле (5), независимо от метода и применяемых компьютерных технологий должен выполняться критерий полноты атласа $N = N^*$.

Шаг 5. Построение системного атласа механизмов, образованного на основе полного атласа БКЦ путем задания в каждой из синтезированных структур всех возможных вариантов выбора стойки и входного звена (сборка М).

Ортогональный структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов, работающих в разных h -пространствах. Рассмотрим некоторые практические задачи структурного синтеза самоустанавливающихся рычажных механизмов параллельной структуры, замкнутые контуры которых собираются и работают в пространствах с разным числом степеней свободы ($h \geq 2$).

С учетом входных параметров синтеза

$$W = 1, \quad K = 2 \quad (h_1 = 3, h_2 = 2), \quad V = 0$$

структурная математическая модель (6) принимает вид

$$\begin{cases} 2n_2 + 3n_3 = 2(W + h_1 + h_2) \Rightarrow 12; \\ n_3 = 2(K - 1) \Rightarrow 2; \\ 4\alpha_4 + 5\alpha_5 = 2(W + h_1 + h_2) \Rightarrow 12. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\bullet n_2 = 3; \quad n_3 = 3 \Rightarrow [LA]/V = [n_2 n_3]/V = [32]/V = 0;$$

$$\bullet [L_\alpha] = [4 - 4 - 4].$$

На основе этих решений по алгоритму структурного синтеза (шаг 2) устанавливаем существование (рис. 1):

• отдельной сборки А1, состоящей из двух трехшарнирных ортогональных звеньев ($n_3 = 2$);

• сборки В1 для образования замкнутой двухконтурной БКЦ путем присоединения к сборке А1 трех двухшарнирных звеньев ($n_2 = 3$) и последующего образования из этой БКЦ разных механизмов (М1, М2, М3);

• сборки М1, представляющей собой пятизвенный плоский трехкривошипный параллелограммный механизм без мертвых положений [45], где первый контур ($h_1 = 3$) замыкается двухзвенной группой Ассур, а второй контур ($h_2 = 2$) — звеном с $W = 0$;

• сборки М2, представляющей собой пространственный складывающийся платформенный манипулятор-трипод со свойством постоянной ориентации выходной платформы [45];

• сборки М3, где путем замены в сборке В1 двух вращательных кинематических пар поступательными и выбора трехшарнирной стойки, получаем новый пятизвенный рычажный механизм двухпоршневого двигателя или компрессора [46], в котором оба поршня соединены общим шатуном ВС, их направляющие расположены под углом 90° между собой, длина кривошипа СА равна половине длины шатуна, а кривошип соединен с серединой шатуна.

Новые двухконтурные пятизвенные ортогональные рычажные механизмы 5М1 и 5М2 (см. рис. 1) можно использовать в качестве блочных модулей для сборки из них по вертикали выполненного на уровне изобретения нового пространственно-плоского сферического складывающегося восьмиконтурного семнадцатизвенного платформенного V-манипулятора с четырьмя отдельно управляемыми

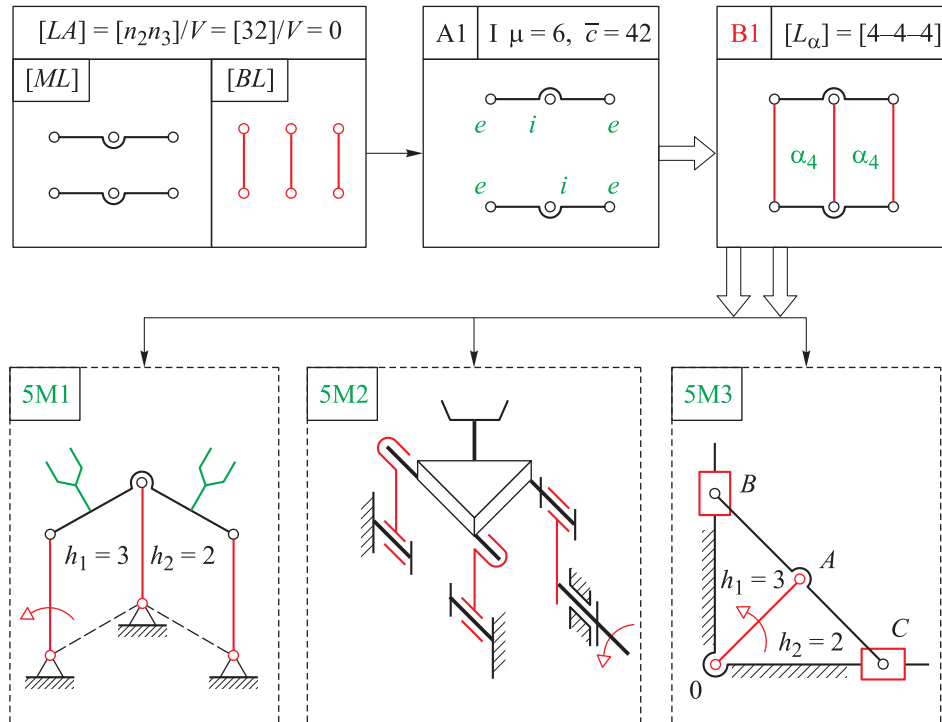


Рис. 1. Процедура структурного синтеза двухконтурных пятизвенных ортогональных рычажных механизмов, работающих в разных h -пространствах ($W = 1, K = 2, V = 0, q = 0, h_1 = 3, h_2 = 2$)

степенями свободы вращения выходной платформы вокруг параллельных осей и вокруг пересекающихся в одной точке осей [48].

Ортогональный структурный синтез складывающегося грузоподъемного шарнирного манипулятора. Для структурного синтеза зададим следующие входные параметры:

- работа манипулятора выполняется от одного приводного двигателя ($W = 1$);
- число замкнутых контуров БКЦ $K = 5$;
- структурная схема БКЦ должна содержать только простые шарниры ($V = 0$);
- наиболее сложное звено БКЦ — четырехшарнирное ($i_{\max} = 4$);
- все замкнутые контуры БКЦ собираются и работают в h -пространстве с тремя степенями свободы [6].

Возможны два варианта решения этой задачи. Первый вариант — поиск всех возможных решений структурной математической модели.

Второй вариант является более простым и заключается в применении уже составленного и математически точного полного атласа всего массива единственно возможных целочисленных решений в виде универсальной структурной таблицы F1 [6], согласно которой существуют только три структурные матрицы (4)

$$|S_{W=1}^{K=5} = [LA] / V \Rightarrow [56100] / 0;$$

$$|S_{W=1}^{K=5} = [LA] / V \Rightarrow [72300] / 0;$$

$$|S_{W=1}^{K=5} = [LA] / V \Rightarrow [80400] / 0,$$

предназначенные для синтеза всех возможных двенадцатизвенных рычажных механизмов без избыточных связей со следующими наборами $[LA]$ звеньев пятиконтурных БКЦ:

$$[LA]_1 = [n_2 n_3 n_4 n_5 n_6] = [56100];$$

$$[LA]_2 = [n_2 n_3 n_4 n_5 n_6] = [72300];$$

$$[LA]_3 = [n_2 n_3 n_4 n_5 n_6] = [80400].$$

Из этих наборов более простое строение ($n_4 = \min = 1$) синтезируемого механизма обеспечит расчетный набор рычажных звеньев $[LA] = [56100]$, содержащий требуемые проектные параметры строения БКЦ

$$n_2 = 2, n_3 = 6, n_4 = 1, n_5 = 0, n_6 = 0.$$

Далее по алгоритму ортогонального синтеза путем последовательной сборки A1 (из указанных в наборе $[LA]$ многошарнирных ML -звеньев количеством $n_3 = 6$ и $n_4 = 1$) и сборки B1 (из всех указанных в $[LA]$ двухшарнирных звеньев количеством $n_2 = 5$) сначала получаем искомую замкнутую структуру двенадцатизвен-

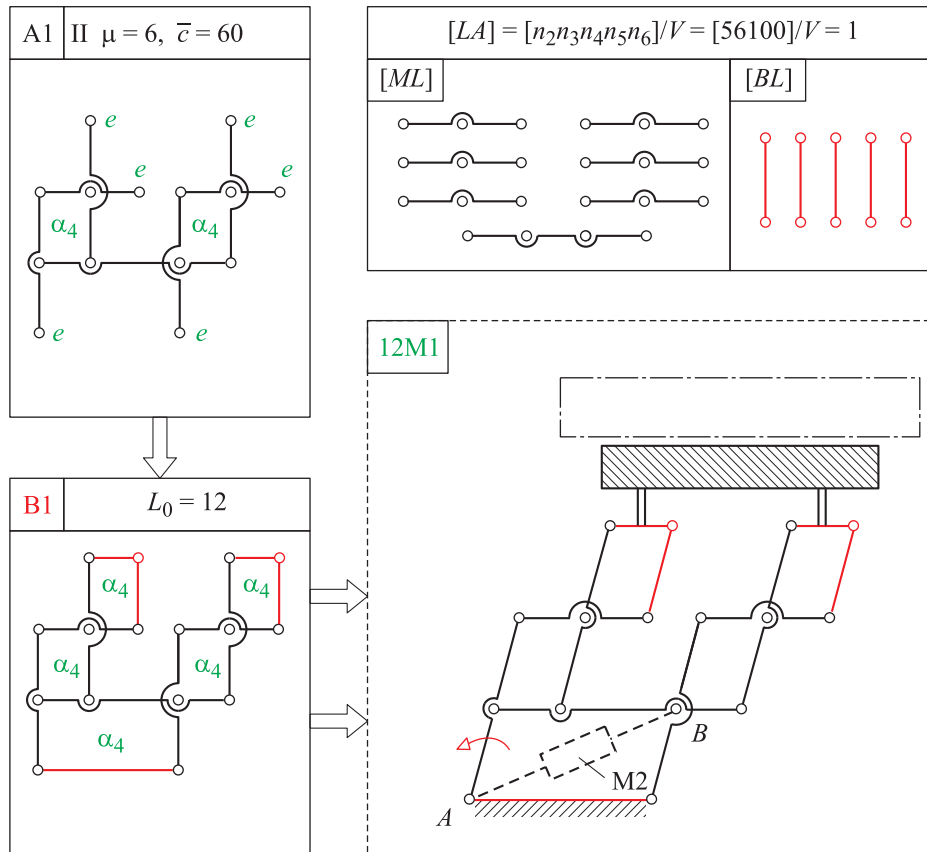


Рис. 2. Процедура структурного синтеза пятиконтурного двенадцатизвенного ортогонального рычажного механизма складывающегося грузоподъемного манипулятора длинномерных грузов ($W = 1, K = 5, V = 0, h = 3, q = 0$)

ной БКЦ, а затем выбираем в сборке M1 двухшарнирное звено в качестве стойки и соединенное со стойкой трехшарнирное звено в качестве входного звена с внешним вращательным приводом.

В результате получаем оригинальный и даже выполненный на уровне изобретения [47] складывающийся грузоподъемный шарнирный манипулятор параллельной структуры, предназначенный для двухкоординатного перемещения преимущественно длинномерных грузов.

Синтезированный на рис. 2 многоконтурный двенадцатизвенный шарнирный механизм также гарантировано не содержит вредных избыточных связей (что доказано разложением его структурной схемы на все группы Ассур с $W = 0$), и, следовательно, является самоустанавливающимся [42] и перспективным для применения в машиностроении.

Отметим, что с учетом возможного применения (сборка M2) в складывающемся грузоподъемном манипуляторе (рис. 3) поступательного привода, установленного [47] через два двойных шарнира A и B, также получаем само-

устанавливающийся многоконтурный, но уже четырнадцатизвенный механизм со стандартным кодом $[LA]/V = [76100]/V = 2$.

Ортогональный структурный синтез полного атласа многоконтурных БКЦ. Покажем возможность решения на основе предложенного построения полного атласа всех возможных трехконтурных восьмизвенных БКЦ с простыми шарнирами (для создания на их основе атласа одноподвижных шарнирных механизмов для машиностроения.)

При заданных входных параметрах

$$W = 1, K = 3, V = 0, h = 3$$

структурная математическая модуль (6) принимает вид

$$\begin{cases} 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 = 2(W + 3K) \Rightarrow 20; \\ n_3 + n_4 = 2(K - 1) \Rightarrow 4; \\ 4\alpha_4 + 5\alpha_5 + 6\alpha_6 + 7\alpha_7 + 8\alpha_8 = 2(W + 3K) \Rightarrow 20. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $n_2 = 4, n_3 = 4, n_4 = 0 \Rightarrow [LA]_1 = [440]/V = 0;$
- $n_2 = 5, n_3 = 2, n_4 = 1 \Rightarrow [LA]_2 = [521]/V = 0;$
- $n_2 = 6, n_3 = 0, n_4 = 2 \Rightarrow [LA]_3 = [602]/V = 0;$
- $[LA]_1 = [4-4-4-8]; [LA]_2 = [4-4-5-7];$
 $[LA]_3 = [4-4-6-6]; [LA]_4 = [4-5-5-6];$
 $[LA]_5 = [5-5-5-5].$

На основе полного массива целочисленных решений $[LA]_1 - [LA]_5$ по алгоритму ортогонального синтеза устанавливаем следующее (см. рис. 3):

- для расчетного набора звеньев $[LA]_1 = [440]/V = 0$ есть только девять совместных и смешанных сборок А многошарнирных ML-

звеньев (A1–A9), на базе которых существуют десять замкнутыхборок В (B1–B10);

- для расчетного набора звеньев $[LA]_2 = [521]/V = 0$ имеются только шесть отдельных, совместных и смешанныхборок А многошарнирных ML-звеньев (A10–A15), на основе которых существуют семь замкнутыхборок В (B11–B17);

- для расчетного набора звеньев $[LA]_3 = [602]/V = 0$ есть только две отдельные и совместные сборки А многошарнирных ML-звеньев (A16, A17), на основе которых существуют три замкнутые сборки В (B18–B20).

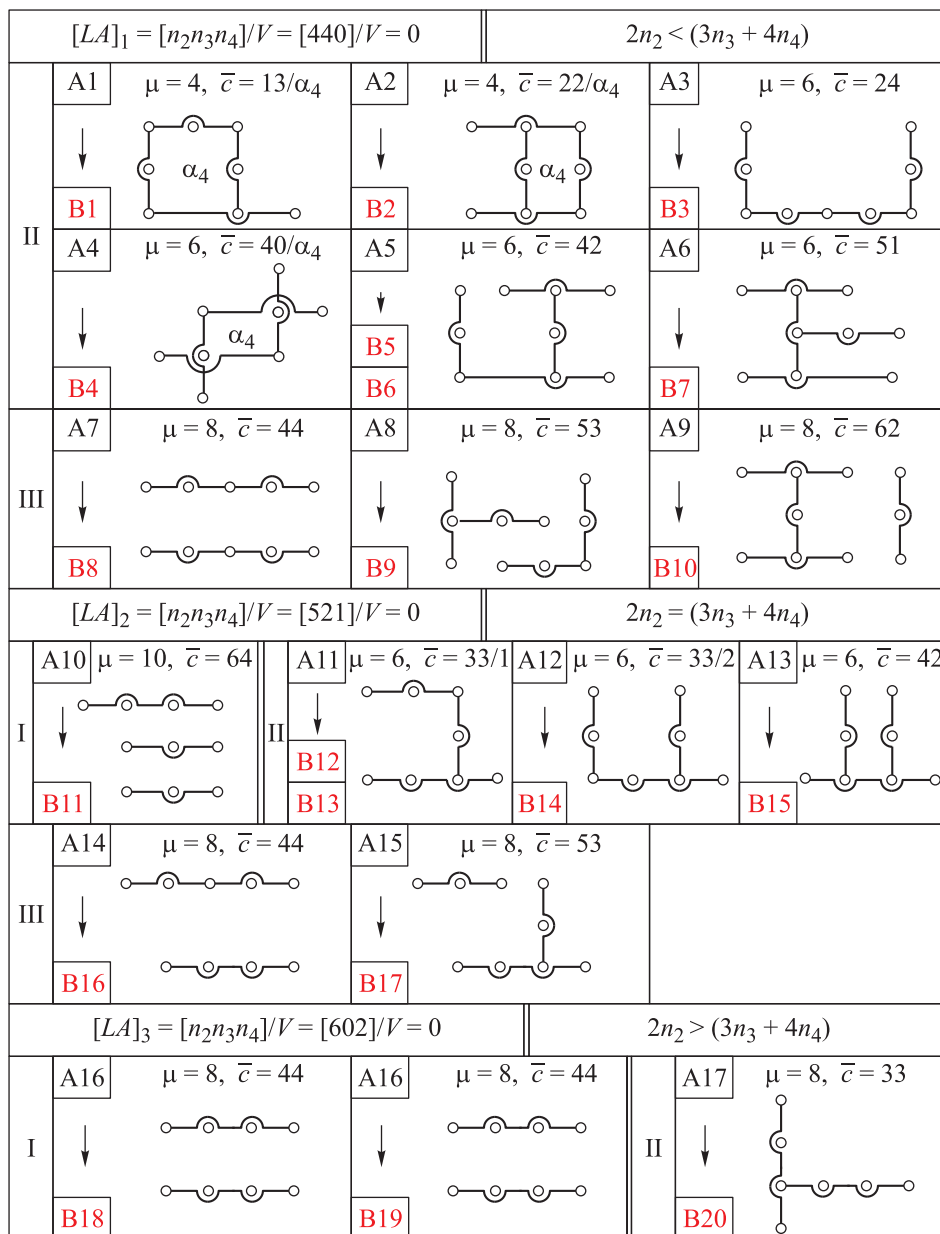


Рис. 3. Полный атлас неизоморфныхборок ML-звеньев для структурного синтеза восьмизвенных трехконтурных БКЦ механизмов ($W = 1, V = 0, q = 0$)

С учетом всех возможных типов (I, II, III) разных сборок А и В общее количество неизоморфных трехконтурных восьмизвенных кинематических цепей, которое должен содержать полный атлас БКЦ с простыми шарнирами, можно рассчитать по преобразованной формуле (10)

$$N_{8Ц}^* = \sum_{k=1}^{k_{max}} (A_k B_k) = (A1 \Rightarrow B1) + (A2 \Rightarrow B2) + (A3 \Rightarrow B3) + (A4 \Rightarrow B4) + (A5 \Rightarrow B5 + B6) + \dots + (A6 \Rightarrow B7) + (A7 \Rightarrow B8) + (A8 \Rightarrow B9) + (A9 \Rightarrow B10) + (A10 \Rightarrow B11) + (A11 \Rightarrow B12 + B13) + \dots + (A12 \Rightarrow B14) +$$

$$+ (A13 \Rightarrow B15) + (A14 \Rightarrow B16) + (A15 \Rightarrow B17) + (A16 \Rightarrow B18 + B19) + \dots + (A17 \Rightarrow B20) \Rightarrow N_{8Ц}^* = 20.$$

Отметим, что итоговый атлас из двадцати синтезированных неизоморфных ортогональных БКЦ с параметрами $K = 3$ и $\tilde{n} = 8$, где все цепи систематизированы между собой по наружному контуру ($5 \leq L_0 \leq 8$), удовлетворяет необходимому критерию полноты $N_{8Ц} = [N_{8Ц}^* = 20]$. Поэтому он не только является полным атласом, но и все его двадцать неизоморфных схем БКЦ совпадают по своему строению с полученным ранее атласом графов [26], что позволяет на основе новых четырех цепей

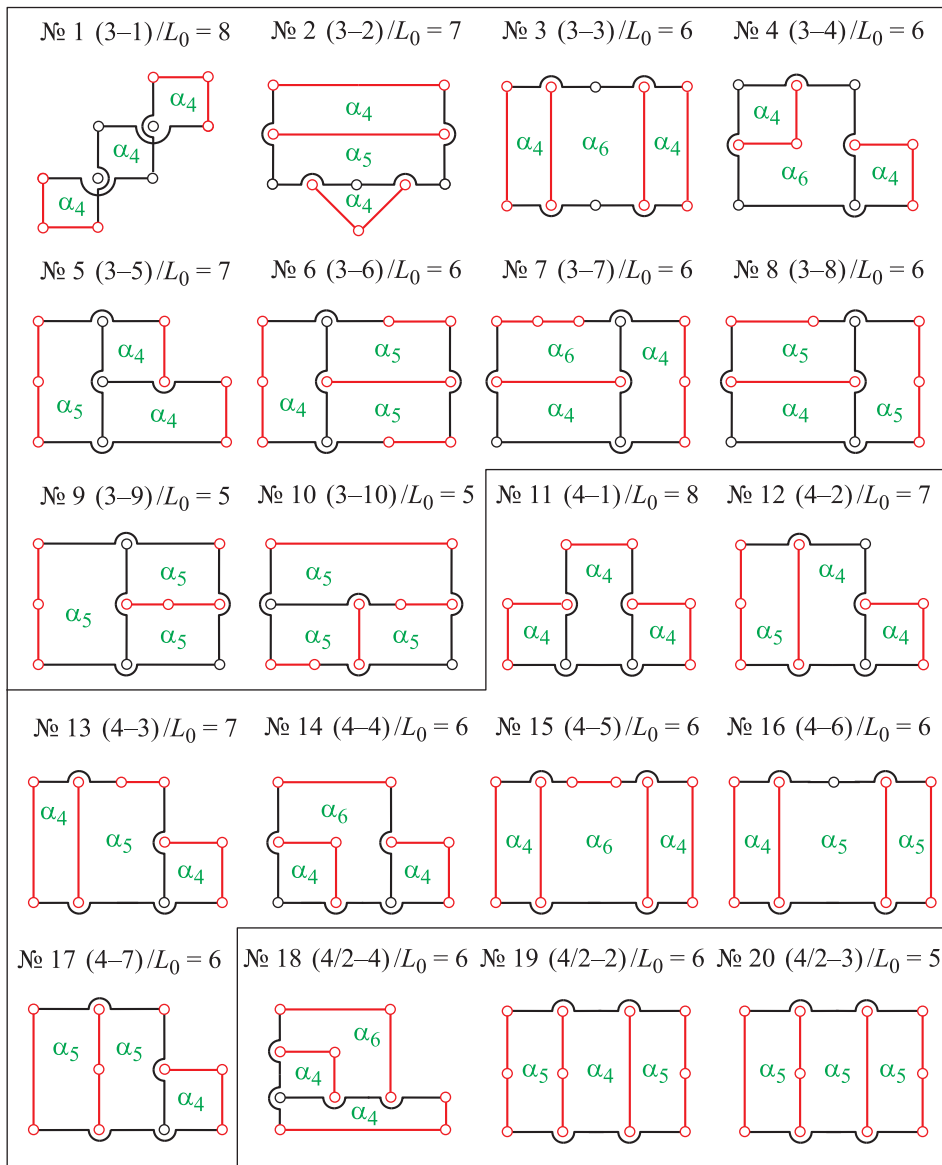


Рис. 4. Полный атлас из двадцати синтезированных восьмизвенных трехконтурных ортогональных БКЦ плоских одноподвижных шарнирных механизмов

№ 4 [LA] = [440]	№ 14 [LA] = [521]	№ 17 [LA] = [521]	№ 20 [LA] = [602]
C1	C5	C9	C14
C2	C6	C10	C15
C3	C7	C11	C16
C4	C8	C12	C17
		C13	C18
$\Delta_1 = 4$	$\Delta_2 = 8$	$\Delta_3 = 10$	$\Delta_4 = 5$
$\Delta N_{8M} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = 27$			

Рис. 5. Атлас из двадцати семи ($\Delta N_{8M} = 27$) дополнительных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов ($K = 3, V = 0, q = 0$), образованных на основе четырех новых синтезированных БКЦ (см. рис. 4, № 4, 14, 17 и 20) из полного атласа неизоморфных ортогональных структурных схем

(рис. 4, № 4, 14, 17 и 20) синтезировать 27 новых механизмов (рис. 5) и увеличить базу данных со 153 [36] до 180 работоспособных восьмизвенных плоских шарнирных механизмов.

Этот положительный и математически аргументированный вывод позволяет закончить более чем 100-летнюю словесную научную дискуссию о том, сколько должно существовать восьмизвенных неизоморфных БКЦ (12 или 25?).

Анализ синтезированного на рис. 4 полного атласа из двадцати разных трехконтурных БКЦ также позволяет установить следующие

закономерности (для поиска ошибок в других избыточных ($N_{8Ц} > 20$) или недостаточных ($N_{8Ц} < 20$) атласах:

- полный атлас восьмизвенных БКЦ должен включать в себя не только их сумму ($N = 20$), но и указанное на рис. 4 определенное количество разных расчетных наборов звеньев [LA] по следующим трем категориям:

CI — [LA] = [440] / $V = 0$ — десять БКЦ (№ 1–10);

СИ — [LA] = [521] / $V = 0$ — семь БКЦ (№ 11–17);

СИ — $[LA] = [602]/V = 0$ — три БКЦ (№ 18–20);

- полный атлас восьмизвенных БКЦ должен содержать схемы с полным диапазоном числа сторон наружного контура $5 \leq L_0 \leq 8$ и всеми решениями $[L_\alpha]$ наборов замкнутых контуров, которые подразделены на пять видов:

$[L_\alpha]_1 = [4-4-4-8]$ — две БКЦ (№ 1 и 11);

$[L_\alpha]_2 = [4-4-5-7]$ — четыре БКЦ (№ 2, 5, 12 и 13);

$[L_\alpha]_3 = [4-4-6-6]$ — шесть БКЦ (№ 3, 4, 7, 14, 15 и 18);

$[L_\alpha]_4 = [4-5-5-6]$ — пять БКЦ (№ 6, 8, 16, 17 и 19);

$[L_\alpha]_5 = [5-5-5-5]$ — три БКЦ (№ 9, 10 и 20).

Выводы

1. Предложен основной принцип образования многозвенных механических систем в виде нового класса сложных многоконтурных механизмов ($K \geq 2$), названных ортогональными, в которых все многошарнирные рычажные звенья кинематической цепи выполнены с расположением всех шарниров данного звена на одной линии (прямой или кривой). Сборка А (из ортогональных звеньев) замыкается сборкой В (из двухшарнирных звеньев) для построения ортогональных структурных схем и создания из них ортогональных рычажных механизмов для разных областей техники.

2. Изложена общая теория анализа структуры, синтеза, классификации сборок ортогональных звеньев и идентификации строения ортогональных многоконтурных механизмов, позволяющая сформировать следующие основные правила построения неизоморфных ортогональных структур в виде их полного атласа:

- число двухшарнирных звеньев, соединенных в общую цепь через простые шарниры не должно быть больше двух;

- наименьшее число сторон замкнутого контура, образуемого с применением ортогональных звеньев, должно быть не меньше четырех;

- внешний (наружный) замкнутый контур ортогональных БКЦ для построения их полного атласа должен содержать наибольшее число сторон из расчетного набора замкнутых для данной БКЦ.

3. Предлагаемое представление строения сложных многоконтурных механизмов в виде ортогональных структурных схем при создании

их полных атласов имеет следующие преимущества:

- является более понятным конструктору для их применения в машинах, например, по сравнению с моделями строения БКЦ в виде топологических графов [10–15, 20–29];

- упрощает составление алгоритмов автоматического структурного синтеза с использованием компьютерных технологий, снижает трудоемкость и повышает надежность программ идентификации всех неизоморфных структур (по сравнению с общепринятым в ТММ [16–19, 35–42] традиционным представлением строения многоконтурных рычажных механизмов в виде многоугольных структурных схем, где многошарнирные звенья изображены как разные многоугольники).

4. Предложенный универсальный метод структурного синтеза и построения полного атласа многоконтурных ортогональных структур самоустанавливающихся рычажных механизмов имеет следующие достоинства:

- не требует многотысячного перебора всех возможных n -звенных групп Ассур с нулевой подвижностью, где полный электронный каталог Э.Е. Пейсаха [17] содержит 5442 ($n=10$) и 251 637 ($n=12$) структур;

- может быть неограниченно применен для направленного синтеза любых K -контурных ($K \geq 2$) и \tilde{n} -звенных ($\tilde{n} > 4$) сложных рычажных механизмов без избыточных связей, что подтверждено рассмотренными примерами синтезированных плоских и пространственных самоустанавливающихся механизмов (с входными параметрами синтеза $W=1$; $2 \leq K \leq 6$; $5 \leq \tilde{n} \leq 14$; $V=0$, $V=2$), выполненных на уровне изобретений [45–48] для разных областей техники.

5. Впервые построенный (на основе предложенного алгоритма ортогонального структурного синтеза) полный атлас из двадцати неизоморфных ортогональных трехконтурных восьмизвенных структурных схем позволяет закрыть более чем 100-летнюю и только словесную (в терминах «well-known» и «acknowledged», не имеющих точных расчетов и математических доказательств) как бы научную дискуссию о правильности и полноте построенных атласов многоконтурных структурных схем.

6. Предложенный полный атлас всех возможных неизоморфных восьмизвенных ортогональных трехконтурных цепей (с замкнутыми контурами без избыточных связей) позволил:

• установить существование четырех новых восьмизвенных ортогональных структур и на их основе синтезировать 27 новых схем самонастраивающихся одноподвижных механизмов со всеми простыми шарнирами;

• увеличить базу данных плоских восьмизвенных шарнирных механизмов со 153 схем до 180 для конструирования в различных областях машиностроения.

Литература

- [1] Артоболовский 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] Смелягин А.И., Приходько А.А. Структурный синтез сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2014, № 5–6, с. 85–88.
- [6] Пожбелко В.И. Единая теория структуры, синтеза и анализа многозвенных механических систем с геометрическими, гибкими и динамическими связями звеньев. Часть 1. Базовые структурные уравнения и универсальные таблицы строения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 9, с. 24–23, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-24-43>
- [7] Куц Е.Н. Структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложным двухшарнирным звеном. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2019, № 8, с. 201–214.
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms. In: IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1517–1526, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [10] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [11] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. et al. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>
- [12] Chen L.M. *Digital and discrete geometry*. Springer, 2014. 322 p.
- [13] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2011. 857 p.
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] Пейсах Э.Е. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера). Часть 1. *Теория механизмов и машин*, 2008, т. 6, № 1, с. 4–14.
- [17] Пейсах Э.Е. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера). Часть 2. *Теория механизмов и машин*, 2008, т. 6, № 2, с. 3–17.
- [18] Пейсах Э.Е. Атлас структурных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2006, т. 4, № 1, с. 3–17.
- [19] Пейсах Э.Е. К дискуссии по проблеме структурного синтеза плоских шарнирных механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2006, т. 4, № 1, с. 49–54.
- [20] 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>
- [21] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. In: IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1030–1050, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_56

- [22] Peisakh E.E. An algorithmic description of the structural synthesis of planar Assur group. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2007, vol. 36, no. 6, pp. 505–514, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618807060015>
- [23] Vicker J.J., Pennock G.R., Shingley J.E. *Theory of mechanisms*. Oxford University Press, 2017. 950 p.
- [24] Ceccarelli M. Fundamentals of mechanisms of robotic manipulations. *Springer*, 2004. 312 p.
- [25] Kong X., Gosselin C.M. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 268 p.
- [26] Gogu G. Structural synthesis of parallel robots. Part 1: Methodology. *Springer*, 2008. 706 p.
- [27] Tsai L.W. Robot Analysis. *The mechanics of serial and parallel manipulators*. Wiley, 1999. 520 p.
- [28] Aefattani R., Luck C.A. A lamina-emergent frustum using a bistable collapsible compliant mechanism. *J. Mech. Des.*, 2018, vol. 140, no. 12, art. 125001, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037621>
- [29] Ding H., Hou F., Kecskemethy A. et al. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mech. Mach. Theory*, 2011, vol. 46, no. 11, pp. 1588–1600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012>
- [30] Тимофеев Г.А., ред. *Теория механизмов и машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 566 с.
- [31] Pozhbelko V. Advanced technique of type synthesis and construction of veritable complete atlases of F-DOF generalized kinematic chains. In: EnCoMes-2018. *Springer*, 2019, vol. 59, pp. 207–214, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-98020-1_24
- [32] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open-, closed-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [33] Кожевников С.Н. *Основания структурного синтеза механизмов*. Киев, Наукова Думка, 1979. 232 с.
- [34] Умнов Н.В., Сильвестров Э.Е. Использование методов гомотопии при синтезе механизмов. *Сб. док. межд. конф. по теории механизмов и машин*. Краснодар, Кубанский ГТУ, 2006, с. 47–48.
- [35] Крайнев А.Ф. *Механика машин. Фундаментальный словарь*. Москва, Машиностроение, 2000. 904 с.
- [36] Пожбелко В.И. Метод топологического структурного анализа и новые критерии идентификации сложных многоконтурных механических систем. *Теория механизмов и машин*, 2014, т. 12, № 2, с. 50–65.
- [37] Пожбелко В.И. Универсальный метод топологического синтеза многоконтурных структур и атлас кинематических цепей восьмизвенных механизмов и их инвариантов. *Теория механизмов и машин*, 2014, т. 12, № 2, с. 66–80.
- [38] Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2004, т. 2, № 2, с. 3–17.
- [39] Дворников Л.Т. *Полный состав плоских шарнирных восьмизвенных механизмов*. Патент РФ 2015620078. Заявл. 19.11.2014, опубл. 15.01.2015.
- [40] Дворников Л.Т., Гудимова Л.Н. Обоснования универсального метода синтеза кинематических цепей Грюблера. *Фундаментальные исследования*, 2015, № 4, с. 48–54.
- [41] Романцев А.А. К вопросу создания структурных схем плоских шарнирных групп звеньев. *Теория механизмов и машин*, 2014, т. 12, № 1, с. 81–90.
- [42] Решетов Л.Н. *Самоустанавливающиеся механизмы*. Москва, Машиностроение, 1991. 288 с.
- [43] Несмеянов И.А. Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов с параллельной кинематикой. *Вестник Брянского ГТУ*, 2019, № 4, с. 4–13, doi: https://doi.org/10.30987/article_5cb58f4ed2c444.85435034
- [44] Пожбелко В.И. Универсальный алгоритм синтеза структурных схем сложных одноподвижных и многоподвижных рычажных механизмов. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2022, № 11, с. 91–100.
- [45] Пожбелко В.И. *Шарнирный трехкривошипный механизм*. Патент РФ 2740526. Заявл. 07.07.2020, опубл. 15.01.2021.

- [46] Пожбелко В.И. *Рычажный пятизвенный двухпоршневой механизм*. Патент РФ 2751011. Заявл. 08.12.2020, опублик. 07.07.2021.
- [47] Пожбелко В.И. *Складывающийся грузоподъемный манипулятор параллельной структуры*. Патент РФ 2780824. Заявл. 27.10.2021, опублик. 04.10.2022.
- [48] Пожбелко В.И. *Сферический V-манипулятор*. Патент РФ 2730345. Заявл. 23.01.2020, опублик. 21.08.2020.

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 apparatuses 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. *Tekhnologiya legkoy promyshlennosti* [The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry], 2018, vol. 39, no. 1, pp. 117–121. (In Russ.).
- [5] Smelyagin A.I., Prikhodko A.A. Structural synthesis of reciprocating rotational mixing device complex actuator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [Izvestiya Vuzov. Food Technology], 2014, no. 5–6, pp. 85–88. (In Russ.).
- [6] Pozhbelko V.I. A unified theory of structure, synthesis and analysis of multibody mechanical systems with geometrical, flexible and dynamic connections. Part 1. Basic structural equations and universal structure tables. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 9, pp. 24–23, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-24-43> (in Russ.).
- [7] Kuts E.N. Structural synthesis of multiloop lever mechanisms with multiple hinges and the most complex double hinge link. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2019, no. 8, pp. 201–214. (In Russ.).
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms. In: *IFTToMM WC-2019*. Springer, 2019, pp. 1517–1526, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [10] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [11] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. et al. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>
- [12] Chen L.M. *Digital and discrete geometry*. Springer, 2014. 322 p.
- [13] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2011. 857 p.
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] Peysakh E.E. Structural synthesis of closed kinematic chains (Grübler chains). Part 1. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2008, vol. 6, no. 1, pp. 4–14. (In Russ.).
- [17] Peysakh E.E. Structural synthesis of closed kinematic chains (Grübler chains). Part 2. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2008, vol. 6, no. 2, pp. 3–17. (In Russ.).
- [18] Peysakh E.E. Atlas of structural diagrams of eight-link flat articulated mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2006, vol. 4, no. 1, pp. 3–17. (In Russ.).

- [19] Peysakh E.E. To the discussion of the problem of structural synthesis of planar articulated mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2006, vol. 4, no. 1, pp. 49–54. (In Russ.).
- [20] 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>
- [21] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. In: IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1030–1050, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_56
- [22] Peisakh E.E. An algorithmic description of the structural synthesis of planar Assur group. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2007, vol. 36, no. 6, pp. 505–514, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618807060015>
- [23] Vicker J.J., Pennock G.R., Shingley J.E. *Theory of mechanisms*. Oxford University Press, 2017. 950 p.
- [24] Ceccarelli M. Fundamentals of mechanisms of robotic manipulations. *Springer*, 2004. 312 p.
- [25] Kong X., Gosselin C.M. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 268 p.
- [26] Gogu G. Structural synthesis of parallel robots. Part 1: Methodology. *Springer*, 2008. 706 p.
- [27] Tsai L.W. Robot Analysis. *The mechanics of serial and parallel manipulators*. Wiley, 1999. 520 p.
- [28] Aefattani R., Luck C.A. A lamina-emergent frustum using a bistable collapsible compliant mechanism. *Mech. Des.*, 2018, vol. 140, no. 12, art. 125001, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037621>
- [29] Ding H., Hou F., Kecskemethy A. et al. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mech. Mach. Theory*, 2011, vol. 46, no. 11, pp. 1588–1600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012>
- [30] Timofeev G.A., ed. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Mechanisms and machines theory]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 566 p. (In Russ.).
- [31] Pozhbelko V. Advanced technique of type synthesis and construction of veritable complete atlases of F-DOF generalized kinematic chains. In: EnCoMes-2018. *Springer*, 2019, vol. 59, pp. 207–214, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-98020-1_24
- [32] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open-, closed-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [33] Kozhevnikov S.N. *Osnovaniya strukturnogo sinteza mekhanizmov* [Fundamentals of structural synthesis of mechanisms.]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).
- [34] Umnov N.V., Silvestrov E.E. [Using homotopy methods in mechanism synthesis]. *Sb. dok. mezhd. konf. po teorii mekhanizmov i mashin* [Proc. Int. Conf. on Mechanisms and Machines Theory]. Krasnodar, Kubanskiy GTU Publ., 2006, pp. 47–48. (In Russ.).
- [35] Kraynev A.F. *Mekhanika mashin. Fundamentalnyy slovar* [Mechanics of machines. A fundamental dictionary]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 904 p. (In Russ.).
- [36] Pozhbelko V.I. The method of topological structural analysis and new criteria for the identification of complex multi-circuit mechanical systems. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2014, vol. 12, no. 2, pp. 50–65. (In Russ.).
- [37] Pozhbelko V.I. Universal method of topological synthesis of multiloop structures and atlas of kinematic chains of eight-link mechanisms and their invariants. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2014, vol. 12, no. 2, pp. 66–80. (In Russ.).
- [38] 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.).
- [39] Dvornikov L.T. *Polnyy sostav ploskikh sharnirnykh vozmizvennykh mekhanizmov* [Full composition of flat articulated eight-link mechanisms]. Patent RU 2015620078. Appl. 19.11.2014, publ. 15.01.2015. (In Russ.).
- [40] Dvornikov L.T., Gudimova L.N. Justifications of a universal synthesis method of kinematic chains. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, no. 4, pp. 48–54. (In Russ.).
- [41] 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.).

- [42] Reshetov L.N. *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy* [Self-aligning mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 288 p. (In Russ.).
- [43] Nesmeyanov I.A. Structural synthesis of self-aligning gears of industrial robots with parallel kinematics. *Vestnik Bryanskogo GTU* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2019, no. 4, pp. 4–13, doi: https://doi.org/10.30987/article_5cb58f4ed2c444.85435034 (in Russ.).
- [44] Pozhbelko V.I. Universal algorithm for the synthesis of structural schemes of complex single and multi-moving lever mechanisms. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2022, no. 11, pp. 91–100. (In Russ.).
- [45] Pozhbelko V.I. *Sharnirnyy trekhkrivoshipnyy mekhanizm* [Hinged crank mechanism]. Patent RU 2740526. Appl. 07.07.2020, publ. 15.01.2021. (In Russ.).
- [46] Pozhbelko V.I. *Rychazhnyy pyatizvennyy dvukhporschnevoy mekhanizm* [Lever five-link mechanism]. Patent RU 2751011. Appl. 08.12.2020, publ. 07.07.2021. (In Russ.).
- [47] Pozhbelko V.I. *Skladyvayushchiysya gruzopodemnyy manipulyator parallelnoy struktury* [Folding lifting manipulator of parallel structure]. Patent RU 2780824. Appl. 27.10.2021, publ. 04.10.2022. (In Russ.).
- [48] Pozhbelko V.I. *Sfericheskiy V-manipulyator* [Spherical V-manipulator]. Patent RU 2730345. Appl. 23.01.2020, publ. 21.08.2020. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.01.2023

Информация об авторе

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).

Information about the author

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).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пожбелко В.И. Универсальный метод структурного синтеза и построения полного атласа многоконтурных ортогональных структур самоустанавливающихся рычажных механизмов в машиностроении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 3, с. 55–72, doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-55-72

Please cite this article in English as:

Pozhbelko V.I. Universal Structural Method in Synthesis and Constructing the Complete Atlas of the Multiloop Orthogonal Structures of the Self-Adjusting Linkages in Mechanical Engineering. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 3, pp. 55–72, doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-55-72