

УДК 621.01

doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-38-48

Многоконтурная теория образования самоустанавливающихся механизмов в машиностроении и практика построения полного атласа K -цепей двухподвижных механизмов

В.И. Пожбелко

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

Multiloop theory of the self-aligning mechanisms formation in machine engineering and practical construction of the complete atlas for the two-degree-of-freedom mechanism K -chains

V.I. Pozhbelko

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

Изложен новый подход к построению механизмов на основе целочисленных решений структурной математической модели — своеобразной внешней оболочкой многоконтурной кинематической цепи, заполняемой всеми возможными расчетными наборами взаимно независимых замкнутых контуров для создания разнообразных механизмов без избыточных связей. Эффективность предлагаемого подхода подтверждена примерами его применения в конструкциях, созданных на уровне изобретений: в механизме манипулятора для выполнения групповых операций и в четырехъемкостном вибрационном смесителе, синтезированном на основе плавающего параллелограмма без особых неуправляемых и мертвых положений. Приведен пример построения и комплексного анализа систематизированного полного атласа из шестидесяти замкнутых цепей для создания двухподвижных самоустанавливающихся рычажных механизмов в машиностроении, содержащего двадцать новых структурных схем без избыточных связей. Работоспособность новых двухподвижных рычажных механизмов подтверждена экспериментально и расчетами их степени подвижности на основе новых универсальных структурных формул.

Ключевые слова: структурный синтез, многоконтурный механизм, избыточные связи, замкнутые контуры, атлас механизмов, структурные формулы

The paper provides a new approach to representing the mechanisms design in the form of a structural mathematical model calculated on the basis of the integer solutions, it is a kind the multi-loop kinematic chain outer shell filled with all possible calculated sets of the mutually independent closed loops to create various mechanisms without the redundant connections. The proposed approach efficiency was confirmed by examples of its application in designs created at the invention levels: a manipulator mechanism for group operations and a four-capacitance vibration mixer synthesized on the basis of a floating parallelogram without special uncontrolled and dead center positions. An extended example is considered of constructing a comprehensive analysis of a systematized complete atlas that consists of sixty closed circuits to create the two-degree-of-freedom self-aligning lever mechanisms in

mechanical engineering and contains twenty new structural diagrams without the redundant connections. Performance of the new two-degree-of-freedom lever mechanisms was confirmed experimentally and by calculating their mobility based on the new universal structural formulas.

Keywords: structural synthesis, multi-circuit mechanism, redundant connections, closed circuits, atlas of mechanisms, structural formulas

Синтез структурных схем разнообразных сложных механизмов (многозвенных, многоконтурных, одно- и многоподвижных) [1–18], с одной стороны, является первоочередным и наиболее сложным вследствие большого количества возможных структурных решений, а с другой — самым важным этапом создания надежно работающих механизмов для разных областей машиностроения. Этот этап заключается в поиске всех возможных структурных схем и их представления в виде систематизированного атласа (как банка данных для конструктора) [19–26].

В основополагающей научной монографии ведущего ученого-механика С.Н. Кожевникова [17] выполнен подробный анализ научных работ по синтезу механизмов (начиная с 1883 г.), выполненных П.Л. Чебышевым, Л.В. Ассуром, И.И. Артоболовским, В.В. Добровольским, О.Г. Озолем, Г.Г. Барановым, Л.Н. Решетовым, М. Грюблером и другими учеными.

В этой монографии С.Н. Кожевников впервые поставил и обосновал задачу оптимального структурного синтеза механизмов как статически определимых систем без вредных избыточных связей. Такие механизмы, являющиеся наиболее перспективными для машиностроения (благодаря низким трению, изнашиванию, трудоемкости изготовления и сборки, увеличенному сроку службы), названы Л.Н. Решетовым [18] самоустанавливающимися.

Начальный пример составления атласов всех возможных структурных схем механизмов выполнен в 1997 г. Э.Е. Пейсахом на основе компьютерных технологий, но только для элементарных одноподвижных механизмов с простыми шарнирами [21]. В 1999 г. ученый-механик А. Рао [13] построил атлас из 40 замкнутых цепей механизмов со степенью подвижности $W = 2$, который оказался неполным.

Цель работы — создание нового подхода к образованию оптимальной структуры работоспособных многоконтурных механизмов без избыточных связей и построение действительно полного атласа всех возможных многоконтурных

турных K -цепей для создания разнообразных двухподвижных рычажных механизмов в машино- и приборостроении.

Базовые понятия и структурные уравнения.

Согласно единой теории структуры механических систем [6, 8, 12] для направленного синтеза и анализа многоконтурных механизмов с числом избыточных связей $q = 0$ можно использовать следующие новые целочисленные структурные зависимости входных и выходных параметров.

Расчетный ассортимент (набор) i -шарнирных (i -парных) звеньев для синтеза K -контурной \tilde{n} -звенной кинематической цепи механизма (K -цепи)

$$[LA] = [n_2 n_3 n_4 n_5 \dots n_{i_{\max}}], \quad i_{\max} = K + W; \quad (1)$$

$$\lim i = K + W + h,$$

где n_i — число i -шарнирных звеньев K -цепи; K — число независимых (внутренних) замкнутых контуров \tilde{n} -звенной цепи; h — число степеней свободы пространства, в котором собираются замкнутые контуры K -цепи и работает образованный из них механизм с заданной степенью подвижности ($W \geq 1$) без избыточных связей, $1 \leq h \leq 6$.

Расчетный ассортимент (набор) из общего числа k -сторонних замкнутых контуров количеством ($K + 1$)

$$[L_\alpha] = [\alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \dots - \alpha_{k_{\max}}] = [3 - 4 - 5 - \dots - L_0], \quad (2)$$

где $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_k$ — замкнутые контуры структурной схемы K -цепи механизма с числом сторон $k \leq k_{\max}$; L_0 — число сторон наибольшего замкнутого контура с максимальным числом сторон $k_{\max} \leq \tilde{n}$.

Расчетный ассортимент (набор), состоящий из перечня чисел сторон k_i всех независимых замкнутых K -контуров, входящих в состав расчетного набора $[L_\alpha]$,

$$[L_K] = [k_1 / k_2 / k_3 / \dots]. \quad (3)$$

Приведенное число многократных шарниров (МКШ) K -цепи V , находящееся в диапазоне

$$0 \leq V \leq [2(K-1) + n_1]. \quad (4)$$

Число независимых замкнутых контуров

$$K = 1 + \frac{1}{2} [V + n_3 + 2n_4 + 3n_5 + \dots + (i_{\max} - 2)n_{i_{\max}}]. \quad (5)$$

Формула (5) отражает связь параметра K с расчетным набором звеньев $[LA]$ и приведенным числом V .

Новые универсальные структурные формулы подвижности

$$W = (\tilde{n} - 1) - \sum_{h=1}^{h=6} (h-1)K_h + f; \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{i_{\max}} in_i + V \right) - \sum_{h=1}^{h=6} hK_h + f; \quad (7)$$

$$W = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=3}^{k_{\max}} k\alpha_k + V \right) - \sum_{h=1}^{h=6} hK_h + f, \quad (8)$$

где f — дополнительная подвижность низших и высших кинематических пар с относительной подвижностью звеньев $H \geq 2$ и числом p_H в данной K -цепи механизма, $f = p_2 + 2p_3 + 3p_4 + 4p_5$; K_h — число замкнутых контуров в h -пространстве.

Целевая функция структурного синтеза

$$\Phi(q) = (q_{h=1} + q_{h=2} + q_{h=3} + q_{h=4} + q_{h=5} + q_{h=6}) = 0, \quad (9)$$

где q_h — число избыточных связей, возникающих при замыкании каждого из независимых K -контуров цепи в заданном h -пространстве.

Выполнение целевой функции (9) обеспечивает сборку всех $(K+1)$ -х замкнутых контуров K -цепи без возникновения в каждом из них избыточных связей в задаваемом (для каждого из этих контуров) h -пространстве возможного движения их звеньев.

Расширенная структурная математическая модель (V -model) для синтеза K -цепей самоустанавливающихся механизмов

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{i_{\max}} in_i = 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} hK_h - f \right) - V; \\ \sum_{i=1}^{i_{\max}} (i-2)n_i = 2(K-1) - V; \\ \sum_{k=3}^{k_{\max}} k\alpha_k = 2(W + \sum_{h=2}^{h=6} hK_h - f) - V; \\ \Phi(q) = \sum_{h=1}^{h=6} q_h = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Новый принцип образования структуры механизмов без избыточных связей заключается в том, что при синтезе механизмов в расчетном наборе $[L_\alpha]$ один из замкнутых контуров (начиная с контура с наибольшим числом сторон L_0) рассматривается как внешняя оболочка в виде базового замкнутого контура (БЗК), которая для построения искомой K -цепи заполняется всеми остальными замкнутыми K -контурами из расчетного набора $[L_\alpha]$, стороны которых образованы всеми рычажными звеньями из расчетного набора $[LA]$ и соединены между собой кинематическими парами.

Таким образом, число структурных элементов внутри БЗК при образовании структуры механизма будет равно задаваемому при синтезе числу K независимых замкнутых контуров K -цепи.

Универсальный L_0 -алгоритм структурного синтеза является поэтапным и состоит из нахождения целочисленных решений уравнений (10) в виде расчетных наборов $[LA]$ и $[L_\alpha]$ разного вида (этап 1), построения БЗК (этап 2), его заполнения структурными элементами в виде всех остальных замкнутых контуров из расчетных наборов $[LA]$ и $[L_\alpha]$ (этап 3) и выбора стойки и входных звеньев в синтезированной K -контурной цепи без избыточных связей (этап 4).

Структурный синтез механизма относительного манипулирования для групповых операций. Рассмотрим практическую задачу создания на основе предлагаемого принципа образования структуры механизмов многоконтурного ($K=3$) самоустанавливающегося ($q=0$) двухподвижного ($W=2$) механизма рычажного манипулятора относительного манипулирования, содержащего все рычажные звенья ($H=1, f=0$) с параллельными осями простых шарниров ($V=0$) для работы в пространстве с числом степеней свободы $h=3$.

С учетом входных параметров синтеза

$$W = 2; K = 3; h = 3; V = 0; H = 1; f = 0; q = 0$$

расширенная структурная математическая модель (10) принимает вид

$$\begin{cases} \sum in_i = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 22; \\ \sum (i-2)n_i = [2(K-1) - V] \Rightarrow 4; \\ \sum k\alpha_k = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 22. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

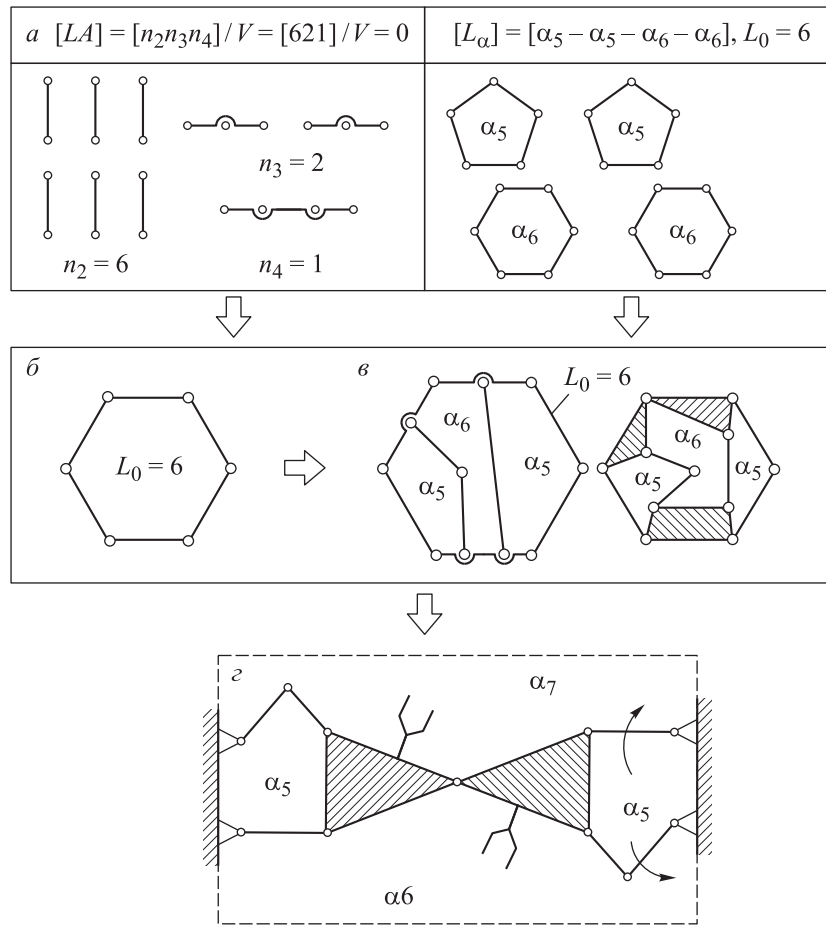


Рис. 1. Схемы поэтапного L_0 -алгоритма структурного синтеза трехконтурного двухплатформенного механизма относительного манипулирования:
 а — расчетные наборы звеньев $[LA]$ и замкнутых контуров $[L_\alpha]$;
 б — построение наружного БЗК ($L_0 = 6$);
 в — заполнение этого БЗК тремя независимыми замкнутыми контурами α_5, α_5 и α_6 ;
 з — образование механизма

- $[LA] = [n_2 n_3 n_4] / V = [621] / V = 0 \Rightarrow \tilde{n} = n_2 + n_3 + n_4 = 9;$
- $[L_\alpha] = [\alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_6] \Rightarrow L_0 = 6.$

Схема синтезированного на основе расчетных наборов звеньев $[LA]$ и замкнутых контуров $[L_\alpha]$ и выполненного на уровне изобретения [23] трехконтурного двухплатформенного механизма относительного манипулирования с двумя рабочими органами приведена на рис. 1.

По формулам (6)–(8) получена подвижность $W = 2$, которая совпадает с заданной и подтверждена на действующей модели синтезированного рычажного механизма, выполненного по структурной схеме (см. рис. 1).

Структурный синтез рычажного механизма многоемкостного виброресмесителя. Рассмотрим задачу создания двухконтурного ($K = 2$) самоустанавливающегося ($q = 0$) двухподвижного ($W = 2$) многоемкостного виброресмесителя,

выполненного с применением рычажных звеньев с параллельными осями шарниров в виде одноподвижных вращательных кинематических пар ($H = 1, f = 0$) для работы в пространстве с числом степеней свободы $h = 3$.

С учетом входных параметров

$$W = 2; K = 2; h = 3; H = 1; f = 0; V = 2; q = 0$$

расширенная структурная математическая модель (10) принимает вид

$$\begin{cases} \sum in_i = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 14; \\ \sum (i - 2)n_i = [2(K - 1) - V] \Rightarrow 0; \\ \sum k\alpha_k = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 14. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $[LA] = [n_2 n_3] / V = [70] / V = 2 \Rightarrow \tilde{n} = n_2 + n_3 = 7;$
- $[L_\alpha] = [\alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_5] \Rightarrow L_{\max} = 5.$

Схема синтезированного на основе расчетных наборов звеньев $[LA]$ и замкнутых контуров $[L_\alpha]$ в виде двухконтурной K -цепи с двумя двойными шарнирами (j_2) и выполненного на уровне изобретения [24] вибросмесителя содержит оригинальный механизм плавающего четырехштанного параллелограмма без особых (неуправляемых и мертвых) положений приведена на рис. 2.

По формулам (6)–(8) получена подвижность $W = 2$, которая подтверждена экспериментально на действующей модели синтезированного рычажного механизма, выполненного по структурной схеме (см. рис. 2).

Критерии классификации структурного строения K -контурных цепей механизмов. В качестве отличительных структурных признаков

синтезированных K -цепей [6] для построения систематизированного полного атласа всех возможных неизоморфных K -цепей введены следующие целочисленные критерии:

- расчетный набор i -шарнирных звеньев $[LA]$, определяемый по выражению (1);
- расчетный набор $(K + 1)$ -х замкнутых контуров $[L_\alpha]$, вычисляемый по формуле (2);
- наибольшее число сторон L_0 БЗК в строении K -цепи ($3 \leq L_0 \leq L_{\max}$);
- наиболее сложное i -шарнирное звено и их количество в составе K -цепи ($2 \leq i \leq i_{\max}$);
- набор многошарнирных звеньев $[LA]_K = \{n_i\}$, образующих каждый из замкнутых контуров в K -цепи, рассчитываемый по формуле (3);
- приведенное число V многократных подвижных соединений звеньев ($V = 3$ и более

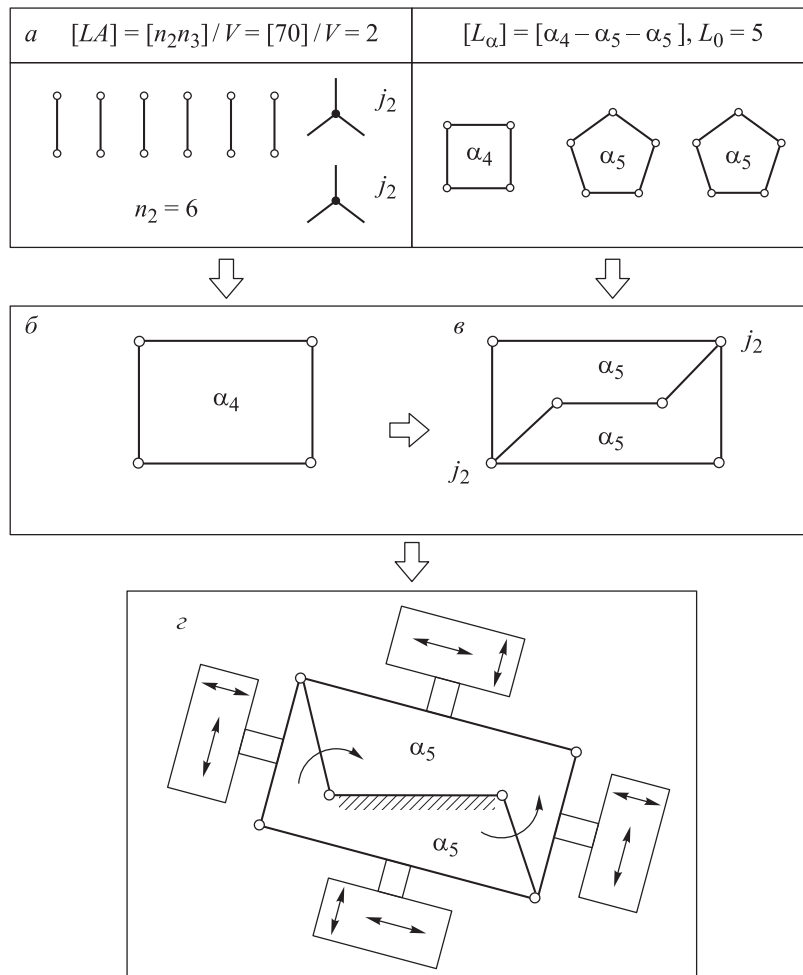


Рис. 2. Схемы поэтапного L_0 -алгоритма структурного синтеза двухконтурного самоустанавливающегося механизма четырехъемкостного вибросмесителя:

- a* — расчетные наборы звеньев $[LA]$ и замкнутых контуров $[L_\alpha]$;
б — построение наружного БЗК (α_4);
в — заполнение этого БЗК двумя независимыми замкнутыми контурами α_5 и α_5 ;
z — образование механизма

звеньев в одном узле), где эти соединения могут быть выполнены в виде сложных цилиндрических/сферических шарниров (МКШ) или сложных поступательных пар, рассчитываемое по формуле (4) для всех K -цепей [26];

- контурное приведенное число V_K ($V_K \leq V$), определяемое по выражению (4) для каждого замкнутого контура;

- взаиморасположение МКШ в каждом из замкнутых контуров при заданном $V_K \geq 1$;

- набор МКШ разной кратности ($j \geq 2$) или количества ($v_j \geq 1$) в составе всей K -цепи;

- набор МКШ разной кратности ($j \geq 2$) или количества ($v_j \geq 1$) в составе каждого из отдельных замкнутых контуров K -цепи;

- набор i -шарнирных звеньев, образующих данный МКШ при сборке всей K -цепи;

- взаиморасположение МКШ — на разных звеньях или на одном звене данной K -цепи;

- идентификационная двухстрочная P -матрица [6] для неизоморфной K -цепи, включающая в себя полный ассортимент рангов всех звеньев, учитывающих их сборку в этой цепи;

- структурная матрица $[S]_W^K = [LA]/V$, содержащая все требуемые цифровые коды строения для синтеза механизмов без избыточных связей (полный расчетный массив всех возможных кодов правильного строения с $q = 0$ для механизмов со степенью подвижности $W = 1, 2, 3$ приведен в работах [6, 25]).

Технология и алгоритм построения полного атласа K -цепей двухподвижных самоустанавливающихся механизмов. Рассмотрим практическую задачу построения полного систематизированного (по указанным критериям классификации) атласа K -контурных кинематических цепей ($K = 3$) для создания на их основе двухподвижных ($W = 2$) самоустанавливающихся ($q = 0$) рычажных механизмов с одноподвижными кинематическими парами ($H = 1, f = 0$), выполненных с параллельными осями ($h = 3$) всех простых шарниров ($V = 0$).

Этап 1. С учетом входных параметров

$$W = 2, K = 3, h = 3, V = 0, H = 1, f = 0, q = 0$$

расширенная структурная математическая модель (10) принимает вид

$$\begin{cases} \sum in_i = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 22; \\ \sum (i - 2)n_i = [2(K - 1) - V] \Rightarrow 4; \\ \sum k\alpha_k = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 22. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие взаимосвязанные целочисленные решения:

- $[LA]_1 = [n_2 n_3 n_4] = [540]$;

$$[LA]_2 = [n_2 n_3 n_4] = [621];$$

$$[LA]_3 = [n_2 n_3 n_4] = [702];$$

$$[LA]_4 = [n_2 n_3 n_4 n_5] = [7101];$$

- $[L_\alpha]_1 = [4 - 4 - 4 - 10]$; $[L_\alpha]_2 = [4 - 4 - 5 - 9]$;

$$[L_\alpha]_3 = [4 - 4 - 6 - 8]$$
; $[L_\alpha]_4 = [4 - 5 - 5 - 8]$;

$$[L_\alpha]_5 = [4 - 4 - 7 - 7]$$
; $[L_\alpha]_6 = [4 - 5 - 6 - 7]$;

$$[L_\alpha]_7 = [5 - 5 - 5 - 7]$$
; $[L_\alpha]_8 = [5 - 5 - 6 - 6]$;

$$[L_\alpha]_9 = [4 - 6 - 6 - 6].$$

Эти решения содержат изменение числа шарниров на одном звене в расчетном диапазоне $2 \leq i \leq 5$ и изменение числа сторон k в замкнутых контурах в расчетном интервале $4 \leq k \leq 10$.

Этап 2. Построенный на основе всех установленных решений $[LA]$ и $[L_\alpha]$ математической модели (10) систематизированный полный атлас из 60 неизоморфных K -цепей приведен на рис. 3. Он включает в себя 20 новых структур по сравнению с известным бессистемным атласом А. Рао [13].

В качестве примера применения предлагаемой новой технологии структурного синтеза приведен алгоритм образования трехконтурной K -цепи (см. рис. 3, цепь № 47 (4-24)) и создания на ее основе нового двухплатформенного механизма относительного манипулирования (см. рис. 1) [23].

В полном атласе, приведенном на рис. 3, введены обозначения замкнутых контуров

$$\alpha_k = \alpha; \alpha^*; \alpha^{**},$$

предлагаемые в качестве нового критерия отличия замкнутых контуров с одинаковым числом их сторон (например, $k = 4, k = 5$ или $k = 6$), но различающихся по наборам $[LA]_K$ рычажных звеньев, образующих стороны этих контуров.

Общие закономерности строения и теоремы образования многоконтурных K -цепей многоподвижных механизмов. Из сводного анализа особенностей структуры всех 60 типов K -цепей, приведенных в систематизированном полном атласе (см. рис. 3), можно установить следующие общие закономерности строения замкнутых кинематических цепей многоподвижных механизмов ($W \geq 2$).

Анализ особенностей строения всех представленных на атласе на рис. 3 возможных неизоморфных K -цепей ($K = 3$) показывает,

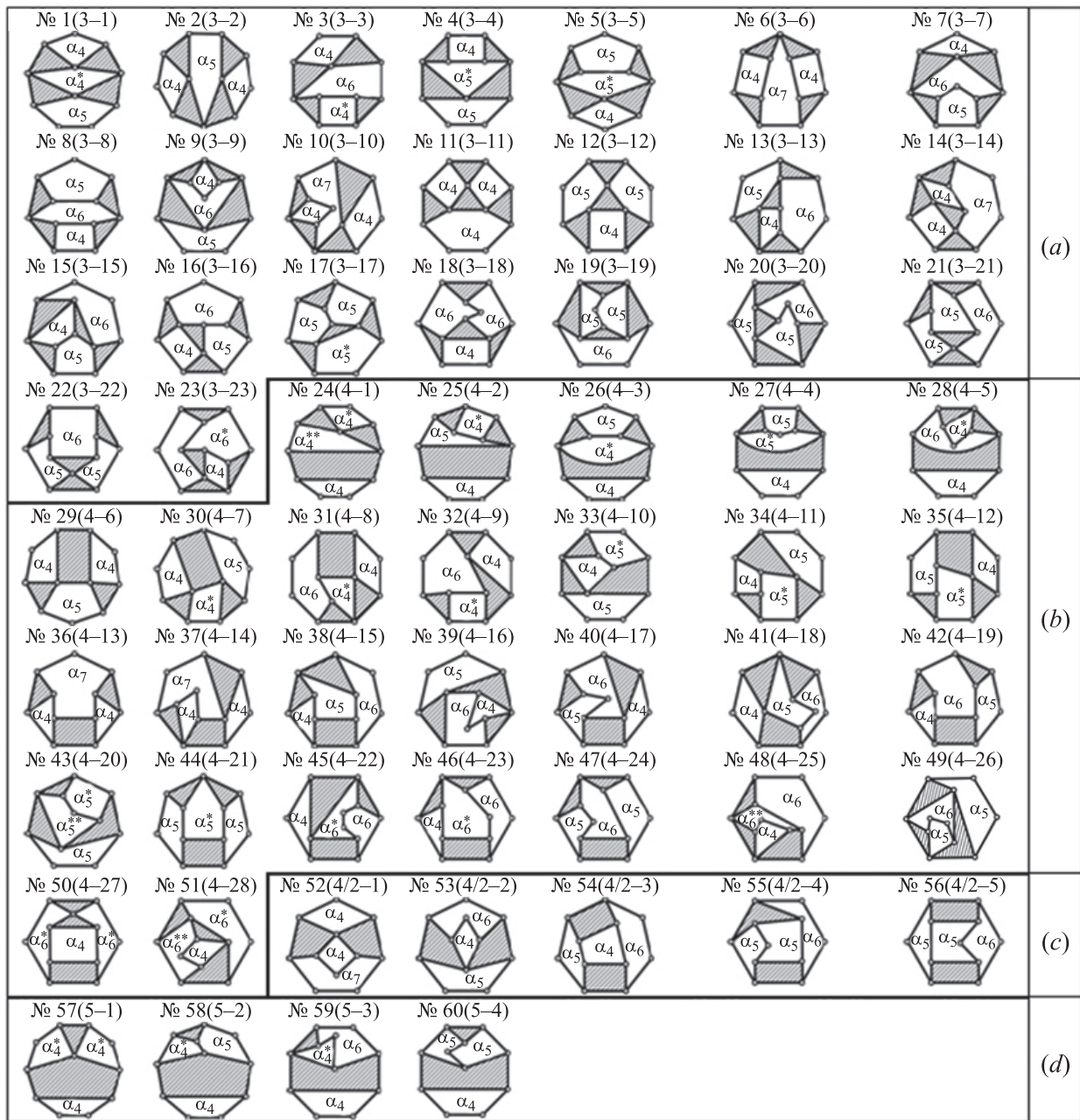


Рис. 3. Систематизированный полный атлас из 60 синтезированных непересекающихся K -цепей трехконтурных двухподвижных рычажных механизмов

что существуют количественные варианты наборов звеньев $[LA]$, включающие в себя следующие четыре категории (см. рис. 3):

(a) — 23 варианта строения K -цепей с $[LA] = [n_2 n_3 n_4] = [540]$ (№ 1–23);

(b) — 28 вариантов строения K -цепей с $[LA] = [n_2 n_3 n_4] = [621]$ (№ 24–51);

(c) — 5 вариантов строения K -цепей с $[LA] = [n_2 n_3 n_4] = [702]$ (№ 52–56);

(d) — 4 варианта строения K -цепей с $[LA] = [n_2 n_3 n_4 n_5] = [7101]$ (№ 57–60).

2. Все типы структуры синтезированных замкнутых многоподвижных механизмов со степенью подвижности $W = 2$ можно подразделить на два класса.

Класс А — неразделимые многоконтурные K -цепи, которые нельзя конструктивно разделить на отдельные кинематические цепи механизмов со степенью подвижности $W = 1$. В состав этого класса входят K -цепи № 1–23 и № 29–55. Общее количество K -цепей класса А равно 51 (в атласе А. Пао — 35 [13]).

Класс В — разделимые многоконтурные K -цепи, которые конструктивно (за счет разделения наиболее сложного i -шарнирного звена) можно подразделить на несколько отдельных механизмов со степенью подвижности $W = 1$. Указанный класс содержит K -цепи № 24–28 ($i = 4$) и № 57–60 ($i = 5$). Общее количество K -цепей класса В равно 9 (в атласе А. Рао — 5 [13]).

3. С учетом установленной взаимосвязи строения структур, образующих классы А и В с разным числом шарниров кинематических пар i на наиболее сложном звене K -цепи, можно сформулировать три теоремы о построении замкнутых кинематических цепей многоподвижных ($W \geq 2$) механизмов.

Теорема 1. Выполнение наиболее сложного звена многоконтурной кинематической K -цепи с числом i подвижных соединений (кинематических пар) с другими звеньями, находящемся в диапазоне $2 \leq i \leq (K + 1)$, приводит к образованию только неразделимых кинематических цепей одно- и многоподвижных механизмов ($W \geq 1$), которые нельзя разделить на более простые замкнутые K -цепи механизмов с меньшей величиной W .

Теорема 2. Выполнение наиболее сложного звена многоконтурной кинематической K -цепи ($K \geq 2$) с числом подвижных соединений (кинематических пар) с другими звеньями $i \geq (K + 1)$ приводит к образованию конструктивно разделимых (по этому сложному звену K -цепей) многоподвижных механизмов ($W \geq 2$), которые можно разделить на отдельные механизмы, например, со степенью подвижности $W = 1$.

Теорема 3. Выполнение наиболее сложного звена K -цепи с граничным числом i^* его подвижных соединений (кинематических пар) с другими звеньями, определяемым выражением $i^* = K + 1$, приводит к образованию:

- неразделимых K -цепей класса А, возникающих при одностороннем соединении этого

сложного звена с наружным контуром L_0 K -цепи;

- конструктивно разделимых K -цепей класса В, образуемых при многостороннем соединении этого сложного звена с наружным контуром L_0 K -цепи.

Выводы

1. Разработан новый подход к образованию оптимальной структуры многоконтурных самоустанавливающихся механизмов путем их представления в виде расчетного наружного БЗК, заполняемого различными расчетными структурными элементами (в виде независимых замкнутых K -контуров). Новый подход позволяет выполнить направленный структурный синтез сложных механизмов и решить задачу построения полного атласа из всех возможных K -цепей для конструирования из них механизмов без вредных избыточных связей для разных областей техники.

2. Построенный на основе предложенного подхода систематизированный полный атлас многоконтурных механизмов указывает на существование 60 типов структур трехконтурных K -цепей для создания на их основе самоустанавливающихся механизмов со степенью подвижности $W = 2$ в машиностроении. По сравнению с известным бессистемным атласом А. Рао, содержащим 40 цепей [13], новый атлас включает в себя семейство из 20 новых структур, выполненных без пересекающихся звеньев, показанных в работах [26, 27].

3. Предложены три новые универсальные структурные формулы для определения степени подвижности W , которые являются эквивалентными и определяют (требуемые для выполнения условия $q = 0$) наборы $[LA]$, $[L_\alpha]$ и число сторон всех замкнутых контуров в синтезируемой K -цепи любых механизмов.

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] 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
- [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] 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*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [13] Rao A.C. Loop based detection of isomorphism among chains, inversions and type of freedom in multi degree of freedom chain. *J. Mech. Des.*, 2000, vol. 122, no. 1, pp. 31–42, doi: <https://doi.org/10.1115/1.533543>
- [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] 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>
- [16] 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
- [17] Кожевников С.Н. *Основания структурного синтеза механизмов*. Киев, Наукова Думка, 1979. 232 с.
- [18] Решетов Л.Н. *Самоустанавливающиеся механизмы*. Москва, Машиностроение, 1991. 288 с.
- [19] 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.
- [20] Крайнев А.Ф. *Механика машин. Фундаментальный словарь*. Москва, Машиностроение, 2000. 904 с.
- [21] Пейсах Э.Е. Атлас структурных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2006, т. 4, № 1, с. 3–17.
- [22] Тимофеев Г.А., ред. *Теория механизмов и машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 566 с.
- [23] Пожбелко В.И. *Платформенный механизм относительного манипулирования*. Патент РФ 2758391. Заявл. 25.02.2021, опубл. 28.10.2021.
- [24] Пожбелко В.И. *Механизм плавающего шарнирного параллелограмма*. Патент РФ 2765387. Заявл. 19.08.2021, опубл. 28.01.2022.
- [25] Пожбелко В.И. Универсальный алгоритм синтеза структурных схем сложных одноподвижных и многоподвижных рычажных механизмов. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2022, № 11, с. 91–100.
- [26] Pozhbelko V.I., Kuts E.N. A new general methodology for the topological structure analysis of multiloop mechanisms with multiple joints and crossing links. In: MTM&Robotics 2020. *Springer*, 2020, pp. 155–163, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60076-1_14

- [27] 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

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. *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] 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] 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.).
- [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] 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*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [13] Rao A.C. Loop based detection of isomorphism among chains, inversions and type of freedom in multi degree of freedom chain. *J. Mech. Des.*, 2000, vol. 122, no. 1, pp. 31–42, doi: <https://doi.org/10.1115/1.533543>
- [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] 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>
- [16] 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
- [17] Kozhevnikov S.N. *Osnovaniya strukturnogo sinteza mekhanizmov* [Fundamentals of structural synthesis of mechanisms.]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).
- [18] Reshetov L.N. *Samoustnavlivayushchiesya mekhanizmy* [Self-aligning mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 288 p. (In Russ.).
- [19] 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.).

- [20] Kraynev A.F. *Mekhanika mashin. Fundamentalnyy slovar* [Mechanics of machines. A fundamental dictionary]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 904 p. (In Russ.).
- [21] 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.).
- [22] Timofeev G.A., ed. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Mechanisms and machines theory]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 566 p. (In Russ.).
- [23] Pozhbelko V.I. *Platformennyy mekhanizm otноситelnogo manipulirovaniya* [Relative manipulation platform]. Patent RU 2758391. Appl. 25.02.2021, publ. 28.10.2021. (In Russ.).
- [24] Pozhbelko V.I. *Mekhanizm plavayushchego sharnirnogo parallelogramma* [Mechanism of floating articulate parallelogram]. Patent RU 2765387. Appl. 19.08.2021, publ. 28.01.2022.
- [25] 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.).
- [26] Pozhbelko V.I., Kuts E.N. A new general methodology for the topological structure analysis of multiloop mechanisms with multiple joints and crossing links. In: MTM&Robotics 2020. *Springer*, 2020, pp. 155–163, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60076-1_14
- [27] 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

Статья поступила в редакцию 06.06.2023

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. Многоконтурная теория образования самоустанавливающихся механизмов в машиностроении и практика построения полного атласа K -цепей двухподвижных механизмов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 38–48, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-38-48

Please cite this article in English as:

Pozhbelko V.I. Multiloop theory of the self-aligning mechanisms formation in machine engineering and practical construction of the complete atlas for the two-degree-of-freedom mechanism K -chains. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 12, pp. 38–48, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-38-48