

УДК 621.01(075.8)

doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-24-43

# 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

**В.И. Пожбелко**

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

## 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

**V.I. Pozhbelko**

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — South Ural State University

Многозвенные механические системы (механизмы и приводы машин) благодаря надежности и простоте конструкции нашли широкое применение в различных областях современного машиностроения. Их используют в роботах, манипуляторах, технологических и строительных машинах, автоматических линиях и др. Предложена единая теория структуры, синтеза и анализа механизмов, машин и строительных конструкций, содержащих геометрические (в виде одно- и многоподвижных кинематических пар), гибкие контактные (в виде трения или ленты) и динамические бесконтактные (инерционные, гравитационные и др.) связи звеньев для построения плоских и пространственных одно- и многоконтурных кинематических цепей машин с заданным числом замкнутых контуров звеньев и приводных двигателей. Установлены области возможного существования многозвенных механических систем с открытыми, замкнутыми и смешанными кинематическими цепями, на основе которых разработаны (на уровне изобретений) разнообразные плоские и пространственные зубчатые и рычажные механизмы для вибрационных приводов, систем переменной структуры с точной внутрицикловой остановкой, тягового рычажного привода многоосных тепловозов, пространственного смесителя с несколькими месильными емкостями, трибометра, позволяющего точно определять предельную тяговую способность гибкого ремня фрикционной ременной передачи, и безредукторных устройств, обеспечивающих горизонтальное перемещение подвешенного груза с заданной малой скоростью.

**Ключевые слова:** механическая система, рычажные и зубчатые механизмы, кинематическая цепь, многовершинные звенья, кинематическая пара, гибкие и динамические связи

Multibody mechanical systems (mechanisms and machine drives) are widely used in different fields of modern engineering due to their reliability and simple design. They can be found in robots, manipulators, technological and construction equipment, automatic lines, etc. This paper presents a unified theory of structure, synthesis and analysis of mechanisms and machines with geometrical (single and multiple kinematic pairs), flexible contact (friction or belt) and dynamic contactless (inertial, gravitational, etc.) connections. The theory can be used to construct planar and spatial single- and multi-loop kinematic chains of machines with a given number of closed loops and driving motors. Areas of possible existence of multibody mechanical systems with open, closed and mixed kinematic chain are determined. Based on these findings, various planar and spatial gear and linkage patentable mechanisms are developed that can be used in vibrational drives, variable structure systems requiring precise stoppage during the cycle, lever actuators of multi-axle locomotives, spatial mixers with several mixing tanks, tribometers for measuring the limiting pulling capacity of flexible belts of belt-and-pulley drives, and direct-drive devices for horizontal motion of a suspended load with a low set velocity.

**Keywords:** mechanical system, linkage and gear mechanisms, kinematic chain, multiple links, kinematic pair, flexible and dynamic connections

Благодаря надежности и простоте конструкции многозвенные механические системы (МС) в виде механизмов и приводов машин нашли широкое применение в различных областях современного машиностроения. Их используют в роботах, манипуляторах, технологических и строительных машинах, автоматических линиях и др.

Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (КЦ) для создания на их основе разнообразных механизмов (например, с заданным общим числом звеньев  $\tilde{n}$  и требуемым числом степеней свободы  $F$ ) является первым и самым проблемным (вследствие большой многовариантности структурных решений) этапом концептуального креативного проектирования сложных машин для разных областей машиностроения. Этой теме, над которой более 150 лет работают отечественные и зарубежные ученые-механики (начиная с П.Л. Чебышева, М. Грюблера и Л.В. Ассура), посвящено много трудов и учебников по теории механизмов и машин (ТММ) [1–56].

Цель работы — разработка единой теории строения сложных многоконтурных МС, позволяющей охватить все их возможное (реализуемое) структурное многообразие и осуществить их направленный системный анализ и оптимальный структурный синтез в виде разнообразных механизмов и многозвенных устройств, выполняемых на уровне изобретений и реализуемых в разных областях современного машиностроения для совершенствования техники различного назначения.

В данной работе предложена единая теория структуры, синтеза и анализа механизмов, ма-

шин и строительных конструкций, содержащих геометрические связи (представляющие собой одно- и многоподвижные кинематические пары (КП)), гибкие контактные связи (в виде трения или ленты) и динамические бесконтактные (инерционные, гравитационные и др.) связи звеньев для построения плоских и пространственных одно- и многоконтурных КЦ машин с заданным числом замкнутых контуров звеньев и приводных двигателей.

Установлены области возможного существования многозвенных МС с открытыми, замкнутыми и смешанными КЦ, на основе которых разработаны (на уровне изобретений) разнообразные плоские и пространственные зубчатые и рычажные механизмы для вибрационных приводов, систем переменной структуры с точной внутрицикловой остановкой, тягового рычажного привода многоосных тепловозов, пространственного смесителя с несколькими месильными емкостями, трибометра (позволяющего точно определять предельную тяговую способность гибкого ремня фрикционной ременной передачи) безредукторных устройств (обеспечивающих горизонтальное перемещение подвешенного груза с заданной малой скоростью), а также пространственного платформенного манипулятора [57–65].

**Реализуемый диапазон строения возможных структур.** Предлагаемая теория, предназначенная для направленного синтеза и анализа различных устройств многозвенных МС (механизмов, ферм, групп Ассура, биологических и трибологических структур), представляет собой

возможное строение (структуру), общие топологические свойства, закономерности образования и области существования разнообразных кинематических структур:

- плоских и пространственных систем на основе открытых, замкнутых и смешанных КЦ, а также нового типа структур — самоуправляемых биокинематических цепей [8];

- одно- ( $K = 1$ ) и многоконтурных ( $K \geq 2$ ) систем;

- одно- ( $F = 1$ ) и многоподвижных ( $F \geq 1$ ) механизмов;

- систем соединенных между собой звеньев, существующих и работающих в пространстве с числом степеней свободы  $h$  (в полном возможном диапазоне  $1 \leq h \leq 6$ , где  $h$  — параметр движения (motion parameter));

- статически определимых, т. е. без избыточных связей (по критерию их числа  $r_c = 0$ ) или замкнутых структур с избыточными связями ( $r_c \geq 1$ );

- с одно- ( $H = 1$ ) и многоподвижными ( $1 \leq H \leq 5$ ) низшими и высшими КП;

- представляющих собой однородные структуры, где все замкнутые контуры  $K$ -цепи имеют одинаковое число степеней свободы ( $h = \text{const}$ ), т. е.  $h = 1$  — в контурах, замыкаемых гибкими и динамическими связями, и  $h = 2, 3, 4, 5, 6$  — в контурах с КП;

- неоднородных структур условно смешанного типа ( $h_0 = 7$ ), в которых разные замкнутые контуры имеют неодинаковое число степеней свободы ( $h = \text{var}$ );

- с геометрическими связями звеньев в виде одно- (по критерию дополнительной подвижности  $f = 0$ ) и многоподвижных (по критерию  $f \geq 1$ ) КП;

- с гибкими контактными (числом  $g \geq 1$ ) и динамическими бесконтактными (числом  $d \geq 1$ ) связями звеньев (инерционными, магнитными от сил тяжести и упругости, пневматическими и т. д.), применяемых для замыкания силовых контуров передачи движения и привода звеньев механизма;

- базовых структур, разделенных по введенному в ТММ фактору  $V$  на два класса:  $K$ -контурные цепи ( $V = 0$ ), содержащие только однократные соединения (Simple joint — SJ) звеньев, и новые малоизученные  $K$ -контурные цепи ( $V \geq 1$ ), состоящие из разнообразных многократных соединений (Multiple Joints — MJ).

Основные теоретические положения единой теории структуры, синтеза и анализа МС и со-

зданные на ее основе разработки новых многоконтурных рычажных механизмов, представлены на конгрессах (*14<sup>th</sup> IFToMM World Congress*, Taiwan, 2015; *7<sup>th</sup> European Conference on Mechanism Science EuCoMes-2018*, Germany; *15<sup>th</sup> IFToMM World Congress, Poland*, 2019) и опубликованы в журнале *Mechanism and Machine Theory*, № 100, 2016 и в базовом журнале ТММ, Россия [23–26].

**Базовые понятия и общие структурные уравнения.** МС — это система твердых тел/звеньев, взаимосвязанных/взаимодействующих между собой посредством КП (числом  $p$ ), гибких контактных (числом  $g$ ) и динамических бесконтактных (числом  $d$ ) связей при сборке различных  $K$ -контурных КЦ ( $K \geq 0$ ).

Примерами МС в виде кинематически подвижных или статически неподвижных структур служат механизмы, фермы, структурные группы на основе КЦ звеньев: открытых, замкнутых в контуры между собой и смешанных, т. е. полуоткрытых. Многозвенная МС является определимой (статически/кинематически), если число уравнений (кинетостатики/кинематики) равно числу неизвестных (силовых/кинематических) факторов в соединениях ее звеньев (в КП).

КП — это подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев, накладывающее ограничения на относительное перемещение (скорость, ускорение) соединяемых звеньев. *Звеном* называют элемент МС, накладывающий ограничения на относительное движение других звеньев КЦ.

*Вершина звена* — сопрягаемый элемент, представляющий собой место на этом звене КЦ, сформированное для подвижного присоединения к нему других звеньев цепи посредством однократных/многократных соединений в виде КП (геометрических связей), а также гибких контактных и динамических бесконтактных связей.

*Ранг звена*  $r$  (предлагаемое новое понятие в ТММ), являющийся основной отличительной характеристикой строения двух сравниваемых между собой на изо- или метаморфность кинематических структур, равен суммарному числу всех вершин  $i$ -вершинных звеньев, присоединяемых к этому звену в данной КЦ ( $r \geq 1$ ). Здесь  $i$  — число вершин на одном звене.

Значения ранга  $r$  для одного и того же звена в неодинаковых (т. е. в структурно различных/неизоморфных) структурах также будут

отличаться друг от друга, что указывает на их разное строение. Примеры ранжирования всех звеньев (т. е. определения их ранга) в открытой или замкнутой КЦ с последующим анализом на изоморфность многоконтурных структур, выполненным на основе предлагаемой простой и надежной двухстрочной идентификационной Р-матрицы, приведены в работах [14, 15].

Первая строка Р-матрицы представляет собой полный ассортимент всех замкнутых контуров в данной К-контурной цепи (с учетом состава и взаиморасположения разных многовершинных звеньев, образующих стороны контура, а также с учетом наличия или отсутствия в нем многократных шарниров). Вторая строка Р-матрицы — полный ассортимент рангов всех звеньев КЦ.

Следует отметить, что при анализе неизоморфности строения сравниваемых К-цепей предлагаемая двухстрочная Р-матрица является единичной для каждой структурной схемы и не требует проведения многовариантной перенумерации всех звеньев цепи  $\tilde{n}$  и их КП (в отличие от десятков тысяч ( $\tilde{n}$ !) традиционных сложных  $\tilde{n} \times \tilde{n}$  матриц смежности, необходимых из-за многовариантных перенумераций всех звеньев  $\tilde{n}$  в каждой К-цепи) при компьютерном синтезе всего возможного многообразия КЦ.

*Уровень сложности КЦ* (предлагаемое новое понятие в ТММ), являющийся основной характеристикой строения цепи любого типа, равен разности между числом связей ( $p + g + d$ ) и числом всех звеньев цепи  $\tilde{n}$ :

$$Y = (p + g + d) - \tilde{n} = -1, 0, 1, 2, 3, 4, \dots, Y_{\max}; \quad (1)$$

$$Y = K - 1,$$

где  $Y_{\max}$  — максимальное значение безразмерного критерия  $Y$ .

Введение такого критерия позволяет разделить цепи на открытые ( $Y = -1, K = 0$ , число одновершинных звеньев  $n_1 \geq 1$ ), замкнутые ( $Y \geq 0, K \geq 1, n_1 = 0$ ) и смешанные ( $Y \geq 0, K \geq 1, n_1 \geq 1$ ), а также предопределяет:

- число взаимно независимых замкнутых контуров  $K = Y + 1$ , возникающих в цепи после ее сборки;

- предельное количество МЖ-шарниров в К-цепи  $V_{\max} = 2Y + n_1 = 2(K - 1) + n_1$ ;

- наиболее сложное звено КЦ с числом вершин  $i \leq Y + 2$ .

*Общее число звеньев* КЦ механизма рассчитывается как сумма  $i$ -вершинных ( $i$ -шарнирных) звеньев с учетом стойки:

$$\tilde{n} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} n_i, \quad i_{\max} = K + F, \quad (2)$$

где  $n_i$  — число  $i$ -вершинных ( $i$ -шарнирных) звеньев ( $i = 2, 3, 4, \dots, i_{\max}$ );  $i_{\max}$  — наибольшее возможное число вершин (шарниров) на одном звене с впервые установленным расчетным пределом.

*Ассортимент звеньев (Link Assortment)*  $\tilde{n}$ -звенной замкнутой КЦ механизма (включая стойку)

$$[LA] = [n_2 n_3 n_4 n_5 n_6 \dots n_{i_{\max}}]. \quad (3)$$

*Ассортимент многократных шарниров* в МЖ-цепи

$$[MJA] = [v_2 v_3 v_4 \dots v_{j_{\max}}], \quad (4)$$

где  $v_j$  — число  $j$ -кратных шарниров,  $j \geq 2$ ;  $v_{j_{\max}}$  — максимальное значение  $v_j$ .

*Ассортимент замкнутых контуров* (включая наружный)

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

где  $\alpha_k$  — число сторон изменяемого замкнутого контура,  $\alpha_k \geq 4$ ;  $\alpha_{k_{\max}}$  — максимальное значение  $\alpha_k$ .

*Общий МЖ-фактор*, представляющий собой приведенное число многократных шарниров в КЦ,

$$V = \sum_{j=2}^{j_{\max}} (j-1)v_j \leq V_{\max} = 2(K-1) + n_1; \quad (6)$$

$$j_{\max} = K + F,$$

где  $j$  — кратность шарнира,  $j = n' - 1$  ( $n'$  — число сходящихся в одной точке звеньев, образующих шарнир);  $j_{\max}$  — максимальное значение  $j$ .

Фактор  $V$  является основной интегральной характеристикой строения К-цепей и разделяет диапазон структур  $0 \leq V \leq V_{\max}$  на два класса механизмов: с многократными шарнирами ( $1 \leq V \leq V_{\max}$ ) и без них ( $V = 0$ ).

Сумма всех сторон замкнутых контуров цепи (включая наружный контур  $L_0$ )

$$S_L = \sum k\alpha_k = 2(F + 3K) - V \Rightarrow S_L = \sum in_i. \quad (7)$$

*Общее число избыточных связей* ( $r_c \geq 0$ ) или лишних подвижностей ( $r_c < 0$ ) в механизме с заданным числом принудительных движений входных звеньев  $N \geq 1$  (для плоских и про-

странственных механизмов, работающих в области движений  $h = 3$ , т. е. с параметром движения  $h = 3$ ),

$$r_c = (N + V + 3) - \sum (i - 3)n_i - f, \quad (8)$$

где  $f$  — суммарная дополнительная подвижность двух- (числом  $p_2$ ), трех- (числом  $p_3$ ), четырех- (числом  $p_4$ ) и пятиподвижных (числом  $p_5$ ) КП.

Расчетное число взаимно структурно-независимых замкнутых контуров (различающихся хотя бы одним звеном или одной КП) в КЦ многозвенного механизма (при  $g + d = 0$ )

$$K = 1 + \frac{1}{2} \left[ V + \sum_{i=1}^{i_{\max}} (i - 2)n_i \right] = L - 1, \quad (9)$$

где  $L$  — общее число замкнутых контуров, включая наружный контур.

Универсальный безразмерный критерий  $AVC = 0$  определяет возможность сборки КЦ (открытой, замкнутой, смешанной) из заданных наборов звеньев  $[LA]$  и их подвижных соединений  $[MJA]$  согласно уравнению проверки правильности структуры

$$AVC = 2(K - 1) - V - \sum_{i=1}^{i_{\max}} (i - 2)n_i = 0. \quad (10)$$

Краткий и полный структурные коды строения замкнутой цепи SJ- и MJ-механизмов определяются соответствующими выражениями

$$Code[LA]/V = [n_2 n_3 n_4 \dots n_{i_{\max}}]/V; \quad (11)$$

$$Code^*[LA]/[MJA] = [n_2 n_3 n_4 \dots n_{i_{\max}}]/[v_2 v_3 v_4 \dots v_{j_{\max}}]. \quad (12)$$

Определитель целевой функции структурного синтеза статически определимых МС

$$D = (\tilde{n} - 1) - \sum_{h=1}^{h=6} (h - 1)K_h - N + f = 0, \quad (13)$$

где  $K_h$  — количество независимых замкнутых контуров в составе КЦ, существующих в пределах заданного  $h$ -подвижного пространства возможных движений.

Определитель  $D = 0$  обеспечивает выполнение целевой функции структурного синтеза оптимальных (без избыточных связей и лишних подвижностей) структур. Наоборот, определитель  $D \neq 0$  указывает на наличие в строении механизма (или фермы) избыточных связей ( $D \geq 1$ ) или неуправляемых лишних подвижностей ( $D < 0$ ) при выполнении этого

механизма с заданным числом принудительных движений  $N \geq 1$  входных/ведущих звеньев.

**Области существования и общие закономерности строения открытых, замкнутых и смешанных КЦ.** На основе проведенного анализа возможного строения открытых ( $K = 0, n_1 \geq 1$ ), замкнутых ( $K \geq 0, n_1 = 0$ ) и смешанных ( $K \geq 1, n_1 \geq 1$ ) КЦ [5, 14] можно установить существование общей для цепей разного типа взаимосвязи между основными структурными параметрами КЦ ( $\tilde{n}, p, i$ ), названной главной геометрической зависимостью многозвенных КЦ,

$$(p + g + d) - \tilde{n} = (i - 2) + t \Rightarrow Y = (i - 2) + t; \quad (14)$$

$$K = Y + 1 = (i - 1) + t,$$

где  $i \geq i_m$ ,  $i_m$  — связность цепи, равная наибольшему числу связей, принадлежащих одному звену в данной КЦ;  $t$  — безразмерный параметр, задающий строение цепи ( $t \geq 0$  — замкнутые КЦ,  $t < 0$  — открытые КЦ).

Используя график с областями существования разных SJ- и MJ-цепей (рис. 1, а, б), построенный по главной геометрической зависимости (14), можно установить следующие закономерности образования таких КЦ в зависимости от расположения их ячеек в координатах « $Y-i$ »:

- число независимых замкнутых контуров и связность КЦ однозначно предопределены уровнем ее сложности  $Y$ :

$$K = Y + 1 = (p + g + d) - n;$$

$$K = (i - 1) + t; \quad (15)$$

$$i \leq Y + 2; \quad i_{\max} = K + 1;$$

- между разделительной I и вертикальной II прямыми (включая эти прямые) расположены замкнутые КЦ, используемые для создания механизмов (МС с подвижностью  $W \geq 1$ ) и ферм ( $W = 0$ ), в которых связность КЦ  $i \leq Y + 2$ ,  $i \leq K + 1$ ;

- между разделительной I и горизонтальной III прямыми размещены открытые КЦ без замкнутых контуров;

- цепи, содержащие только простые шарниры, расположены на разделительной прямой I ( $t = 0$ ) и имеют наибольшую для данного уровня  $Y$  величину ( $i_{\max} = Y + 2 = K + 1$ );

- перемещение на графике по горизонтали влево от разделительной прямой I (область  $t > 0$ ) приводит к увеличению в КЦ числа многократных шарниров до максимума (на пря-

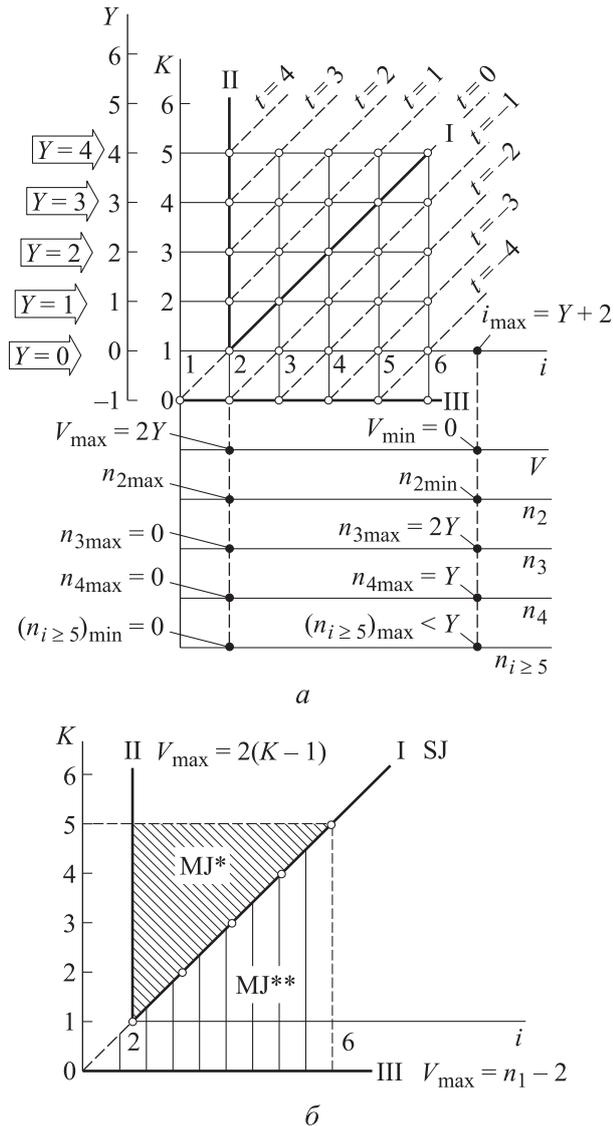


Рис. 1. Области существования и закономерности строения кинематических цепей заданного уровня сложности  $Y = K - 1$ : а — расположение замкнутых КЦ (между прямыми I и II), открытых и смешанных КЦ (между прямыми I и III) в диапазоне  $n_{i\min} \dots n_{i\max}$ ; б — расположение КЦ только с простыми шарнирами (SJ), замкнутых MJ-цепей (MJ\*), открытых и смешанных MJ-цепей (MJ\*\*)

мой II)  $V_{\max} = 2Y = 2(K - 1)$ , а перемещение вправо от разделительной прямой I (область  $t < 0$ ) — к росту в цепи числа свободных концов звеньев до  $k = |t|$ .

Следует отметить, что для рассматриваемого уровня сложности КЦ (см. рис. 1) число ячеек указывает конкретное число решений задачи структурного синтеза. Например, на нулевом уровне ( $Y = 0$ ) эта задача имеет только одно решение  $i = 2$ , т. е. цепь должна состоять только из двусвязных звеньев и быть одноконтурной ( $K = Y + 1 = 1$ ).

Предлагаемая на основе графика главной геометрической зависимости КЦ (см. рис. 1, а) стратегия направленного структурного синтеза МС заключается в последовательном заполнении для данного уровня сложности проектируемой системы  $Y$  (по горизонтали) всех ячеек  $(Y, i)$  конкретными цепями из различных по сложности многопарных звеньев и совмещенных шарниров (от минимального числа звеньев  $n_{i\min} = n_2$ ,  $V_{\max} = 2Y$  на прямой II до максимального  $n_{i\max} = n_{Y+2}$ ,  $V_{\min} = 0$  на прямой I) для построения из них безызыбыточных механизмов.

Приведенный на рис. 1 график с областями возможного существования кинематических структур обоих классов (с SJ- и MJ-шарнирами) впервые в ТММ позволяет численно (по числу ячеек их синтеза, обозначенных точками  $\circ$ ) определить соотношение между числами возможных SJ-структур  $N_{SJ}$  ( $V = 0$ ) и MJ-структур в замкнутых цепях  $N_{MJ}^*$  ( $V \geq 1$ ).

На рис. 1, б выделены области существования SJ- ( $V = 0$ ) и MJ-цепей ( $V \geq 1$ ) и установлены следующие четкие границы возможного структурного синтеза всех  $K$ -контурных цепей через заполнение ячеек  $(K, i)$  для их образования в диапазоне  $0 \leq K \leq 5$ .

Разделительная прямая I сужает диапазон существования всех возможных безызыбыточных структур ( $V = 0$ ) и содержит только пять ячеек ( $N_{SJ} = 5$ ) для их синтеза. Треугольная область MJ\* (см. рис. 1, б) существования всех возможных МС в виде замкнутых MJ-цепей является более широкой и содержит 10 ячеек ( $N_{MJ}^* = 10$ ) для их синтеза, а треугольная область MJ\*\* существования смешанных и открытых MJ-цепей — 15 ячеек ( $N_{MJ}^{**} = 15$ ).

Применение MJ-шарниров, т. е. увеличение количества ячеек  $(K, i)$ , для их синтеза позволяет расширить диапазон создаваемых структур:

- для замкнутых КЦ в 3 раза:

$$k^* = (N_{SJ} + N_{MJ}^*)/N_{SJ} = (5 + 10)/5 = 3;$$

- для смешанных и открытых КЦ в 4 раза:

$$k^{**} = (N_{SJ} + N_{MJ}^{**})/N_{SJ} = (5 + 15)/5 = 4;$$

- для КЦ всех типов в 6 раз:

$$k_{\Sigma} = (N_{SJ} + N_{MJ}^* + N_{MJ}^{**})/N_{SJ} = (5 + 10 + 15)/5 = 6.$$

Следует отметить, что в традиционно синтезируемых КЦ механизмов с простыми шарнирами можно задействовать только ячейки на разделительной прямой I (см. рис. 1), а основное количество возможных КЦ с MJ-шарни-

рами (т. е. весь большой массив схем рычажных механизмов, реализующих ячейки между прямыми I и II (замкнутые МЖ-цепи), а также между прямыми I и III (смешанные и открытые МЖ-цепи) остаются неиспользованными в машиностроении.

**Классификация замкнутых контуров и типов семейств МС.** Предложенные выше на основе общей структурной теории [1–10] универсальные аналитические зависимости отражают особенности возможного строения открытых ( $K = 0$ ) и замкнутых ( $K \geq 1$ ) статически определяемых МС разного уровня сложности ( $Y = K - 1 \geq 1$ ): неоднородных ( $h = var$ ) и однородных ( $h = 1...6 = const$ ), одно- и многоподвижных, плоских и пространственных механизмов и ферм.

Выполненная формализация структуры и методика направленного структурного синтеза и анализа строения многозвенных МС заключается в их топологическом представлении в виде заданной совокупности  $K$ -замкнутых контуров, составленных из строго определенных расчетных наборов (ассортиментов) взаимосвязанных одно- и многошарнирных звеньев ( $n_1, n_2, n_3, n_4, \dots, n_{K+W}$ ), замыкаемых между собой посредством одно- и многократных шарниров и различных геометрических, гибких и динамических связей.

Для расширения области структурного синтеза и анализа в качестве первоочередной оценочной количественной характеристики строения замкнутых контуров многозвенных МС предлагается принять безразмерное целое число  $h$ , изменяющееся в интервале

$$h \geq (H + 1) - (g + d) = 1...6 \quad (16)$$

и равное количеству элементарных (вращательных, поступательных) перемещений звеньев, требуемых для полного замыкания в процессе сборки открытого контура в его последней КП.

Слагаемые выражения (12) учитывают возможную подвижность КП (геометрических связей)  $H = 1...5$ . Условие  $(g + d) = 1$  задают в случае замыкания контура гибкими ( $g \neq 0$ ) или динамическими связями ( $d \neq 0$ ). При отсутствии указанных связей ( $g = 0, d = 0$ ) в этом контуре (где звенья взаимодействуют только через КП) в выражение (12) подставляют  $(g + d) = 0$ . Для всей МС ( $K \geq 1$ ) сумма  $(g + d)$  будет равна числу контуров, замыкаемых гибкими и динамическими связями ( $0 \leq (g + d) \leq K$ ).

С физической точки зрения величина  $h$  ( $1 \leq h \leq 6$ ) — это число степеней свободы того пространства, в пределах которого могут происходить перемещения звеньев МС (т. е. пространства движений, где либо существует и работает данный механизм, либо возникают деформации звеньев фермы).

По величине  $h$  замкнутые контуры предлагается разделить на шесть классов: 1 —  $h = 1$ ; 2 —  $h = 2$ ; 3 —  $h = 3$ ; 4 —  $h = 4$ ; 5 —  $h = 5$ ; 6 —  $h = 6$ , а однородные МС типа I (содержащие замкнутые контуры одного класса) — соответственно на шесть семейств (номер семейства равен величине  $h$ ). Неоднородные МС типа II (содержащие замкнутые контуры разного класса) объединены в седьмое семейство, условно обозначенное  $h_0 = 7$ .

Практическая реализация указанных  $h$ -семейств позволяет охватить все возможные типы структурного строения многозвенных механизмов. Указанные семейства структур (СС) могут быть реализованы в различных МС, в том числе:

- СС первого класса ( $h = 1$ ) — в адаптивных механизмах с контурами, замыкаемыми только гибкими или динамическими связями;
  - СС второго класса ( $h = 2$ ) — в плоских клиновых механизмах, содержащих только поступательные пары;
  - СС третьего класса ( $h = 3$ ) — в плоских рычажных механизмах с параллельными осями вращения, в пространственных рычажных механизмах (типа механизма Беннета) с точно рассчитанным разным наклоном осей вращения или в пространственных клиновых и сферических механизмах Гука;
  - СС четвертого класса ( $h = 4$ ) — в пространственных рычажных механизмах с частично непересекающимися осями вращения соединяемых звеньев замкнутого контура;
  - СС пятого класса ( $h = 5$ ) — в пространственных рычажных механизмах (типа механизма Брикарда) со взаимно перпендикулярными осями вращения всех звеньев;
  - СС шестого класса ( $h = 6$ ) — в пространственных рычажных механизмах со всеми непересекающимися в одной точке и непараллельными осями вращения соединяемых в замкнутый контур двухшарнирных звеньев цепи.
- Смешанное семейство структур ( $h_0 = 7$ ) представляет собой разнообразные механизмы, содержащие совокупность замкнутых контуров разного класса ( $h = var$ ), например, плоского

рычажного механизма или пространственного сферического механизма ( $h = 3$ ) с плоским клиновым механизмом ( $h = 2$ ) или с пространственным шарнирным механизмом Брикарда ( $h = 5$ ).

Следует отметить, что подвижность ( $F \geq 1$ ) более сложных для понимания пространственных и плоских механизмов манипуляторов и других технологических машин (например, приводов для смесителей), представляющих собой однородные структуры (с контурами одного класса ( $h = \text{const}$ ), но с непараллельными осями) или неоднородные системы ( $h = \text{var}$ ) нельзя рассчитать по известным формулам подвижности  $W$  (Чебышева — Кутсбаха, Сомова — Малышева и Добровольского). В связи с этим возникает необходимость разработки более универсальных (и в то же время простых и надежных) структурных формул расчета подвижности ( $F \geq 1$ ).

**Универсальная формула подвижности МС.** Предложенная в работах [23, 24] универсальная структурная формула (уравнение подвижности  $F$ -DOF) имеет вид

$$F = (\tilde{n} - 1) - \sum_{h=1}^{h=6} (h-1)K_h + f + r_c$$

или

$$F = \sum_{H=1}^{H=5} H p_H - \sum_{h=1}^{h=6} h K_h + r_c, \quad (17)$$

где  $K_h$  — количество независимых замкнутых контуров в составе КЦ, существующих в пределах заданного  $h$ -подвижного пространства возможных движений;  $p_H$  — количество  $H$ -подвижных КП.

Выражения (17) после подстановки в них соотношений (2) и (9) применительно к синтезу статически определимых механизмов ( $r_c = 0$ ) преобразуются в следующие (общие для каждого из  $h$ -семейств механизмов) структурные формулы  $F$ -DOF:

$$F_{h=1} = \left( \sum_{i=1}^i n_i \right) + (f - V - 1); \quad (18)$$

$$F_{h=2} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^i (4-i)n_i \right] + (f - V - 2); \quad (19)$$

$$F_{h=3} = \left[ \sum_{i=1}^i (3-i)n_i \right] + (f - V - 3); \quad (20)$$

$$F_{h=4} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^i (8-3i)n_i \right] + (f - V - 4); \quad (21)$$

$$F_{h=5} = \left[ \sum_{i=1}^i (5-2i)n_i \right] + (f - V - 5); \quad (22)$$

$$F_{h=6} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^i (12-5i)n_i \right] + (f - V - 6). \quad (23)$$

Здесь суммарная дополнительная подвижность (возникающая вследствие замены неподвижных пар на многоподвижные) определяется выражением

$$f = p_2 + 2p_3 + 3p_4 + 4p_5. \quad (24)$$

Для самых распространенных плоских и пространственных механизмов со всеми замкнутыми контурами 3-го класса ( $h = 3$ ) структурная формула  $F$ -DOF принимает еще более простой и удобный вид для их синтеза и анализа:

$$F_{h=3} = (2n_1 + n_2 + f) - (n_4 + 2n_5 + 3n_6 + 4n_7 + 5n_8 + \dots) - V - 3. \quad (25)$$

По сравнению с известными классическими формулами Чебышева, Грюблера, Кутсбаха, Малышева и Добровольского [56] предложенные структурные формулы при  $F \geq 1$  являются более информативными и эффективными для структурного синтеза SJ- и MJ-механизмов, так как точнее отражают структурные особенности КЦ.

Это достигается благодаря тому, что структурные формулы  $F$ -DOF:

- включают в свой состав MJ-фактор в его полном диапазоне ( $0 \leq V \leq 2(K-1) + n_1$ );
- содержат искомым расчетный ассортимент всего возможного множества звеньев  $[LA] = [n_1 \ n_2 \ n_3 \ \dots]$  для построения из них полного многообразия SJ- и MJ-механизмов;
- могут быть использованы для составления полных (универсальных) таблиц всех возможных структурных кодов правильного строения разных  $F$ -DOF одно- и многоподвижных механизмов с заданным числом замкнутых контуров  $K$ .

Следует отметить, что, несмотря на широкую область применения в современном машиностроении рычажных многоконтурных механизмов с MJ-шарнирами [6] и на необходимость (для их синтеза и анализа) отображения их строения и подвижности ( $F \geq 1$ ), в мировой

литературе по ТММ известна единственная работа [56] с попыткой расширить структурную формулу  $F$ -DOF путем учета в ней всего многообразия МЖ-шарниров. Причем эта попытка закончилась неудачей из-за большой сложности и трудоемкости синтеза и анализа по этой расширенной формуле  $F$ -DOF.

**Универсальная структурная математическая модель МС.** Универсальная структурная математическая модель (USM Model), составленная на основе обобщения структурных уравнений (1)–(25), реализует топологию всех возможных МС и представляет собой совместную систему простых алгебраических уравнений их возможного строения и подвижности

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{i_{\max}} n_i = F + \sum_{h=1}^{h=6} (h-1)K_h + 1 - (f + r_c); \\ \sum_{i=1}^{i_{\max}} in_i = 2 \left( F + \sum_{h=1}^{h=6} hK_h - f - r_c \right) - V; \\ \sum_{j=2}^{j_{\max}} (j-1)v_j = V, \quad 0 \leq V \leq 2(K-1) + n_1; \\ n_0 + K^* = K + 1; \\ n_2 = (F + V + h) - (f + r_c); \\ n_{i \geq 3} = \frac{2(K-1) - V}{i-2}; \\ i_{\max} = \begin{cases} K + F & (F \leq K), \\ 2K & (F \geq K); \end{cases} \\ j_{\max} = \begin{cases} K + F & (F \leq K-1), \\ 2K-1 & (F \geq K-1); \end{cases} \\ H_{\max} = h-1; \quad V_{\max} = 2(K-1) + n_1; \\ (n_0)_{\max} = K + 1; \\ K^*_{\max} = K-1, \end{array} \right. \quad (26)$$

где  $n_0$  — число вершин/шарниров стойки механизма, равное количеству присоединяемых к стойке звеньев КЦ;  $K^*$  — количество замкнутых контуров КЦ, в состав которых не входит выбранная стойка (звено присоединения);  $H_{\max}$ ,  $(n_0)_{\max}$  и  $K^*_{\max}$  — максимальные значения параметров  $H$ ,  $n_0$  и  $K^*$  соответственно;  $f$  — дополнительная подвижность  $H$ -подвижных КП,

$$f = \sum_{H=1}^{H=5} (H-1)p_H = p_2 + 2p_3 + 3p_4 + 4p_5.$$

Термин «универсальная USM Model» означает, что модель (26) отображает (по мнению разработчика) все особенности строения возможного на практике многообразия МС.

Полный массив рассчитанных на ЭВМ решений модели (26) приведен в работах [23, 50] в виде универсальных структурных таблиц расчетных кодов правильного строения для синтеза ферм с  $F = 0$  и оптимальных механизмов без избыточных связей с  $F = 1, 2$  и  $3$  (как структур с  $r_c = 0, f = 0, h = 3, 1 \leq K \leq 5, 4 \leq \tilde{n} \leq 14$ ).

Анализ этого массива решений выявил, что у МЖ-структур число стандартных кодов для синтеза в 3 раза больше, чем у СЖ-структур рычажных механизмов. Следовательно, применение МЖ-шарниров расширяет в 3 раза (по сравнению с СЖ-структурами) базу кодов для создания новых рычажных механизмов на уровне изобретений.

**Универсальные структурные таблицы расчетных кодов правильного строения замкнутых структур.** На основе полученных на ЭВМ возможных решений универсальной структурной математической модели USM Model, реализующих целевую функцию оптимального синтеза  $D = 0$  (11) и критерия  $r_c = 0$  (7) для отображения всего многообразия плоских и пространственных ( $h = 3, f = 0$ ) механизмов ( $F = 1, F = 2$  и  $F = 3$ ) и статически определимых ферм ( $F = 0$ ) впервые в ТММ построен атлас, содержащий оригинальные универсальные структурные таблицы расчетных стандартных кодов правильного строения [57] для статически определимых ферм (табл. F0), одно- (табл. F1), двух- (табл. F2) и трехподвижных механизмов (табл. F3).

Все таблицы построены в прямоугольной системе координат, где по оси ординат отложены значения задаваемого базового параметра  $0 \leq V \leq 2(K-1)$ , а по оси абсцисс — значения рассчитанного набора (ассортимента [LA]) многовершинных звеньев ( $j \geq 2, 2 \leq i \leq K + F$ ), реализующего все возможные структуры механизмов и ферм без избыточных связей при заданных входных параметрах ( $0 \leq F \leq 3, 1 \leq K \leq 6$ ).

Полный пакет оригинальных универсальных структурных таблиц расчетных стандартных кодов правильного строения F0, F1, F2, F3, разработанный в 1993 г. [16], опубликован в России [23] и за рубежом [50].

Приведенные в качестве примера табл. F1 и F1A могут быть применены в ТММ для ре-

шения следующих научных и практических задач по созданию оптимальных структур ( $D = 0, r_c = 0, f = 0$ ) на основе полного (по мнению разработчика) массива из 89 (табл. F1) и 113 (табл. F1A) возможных кодов оптимального строения рычажных механизмов ( $h = 3, F = 1$ ):

- для точного определения общего числа возможных кодов правильного строения, например, в табл. F1 (для синтеза  $K$ -цепей при  $1 \leq K \leq 5$ ):

– SJ- структур ( $V = 0$ )

$$N_{V=0} = 1(K = 1) + 1(K = 2) + 3(K = 3) + 7(K = 4) + 15(K = 5) = 27;$$

– MJ-структур ( $V \geq 1$ )

$$N_{V \geq 1} = 0(K = 1) + 2(K = 2) + 6(K = 3) + 16(K = 4) + 38(K = 5) = 62;$$

Дополнительно табл. F1A содержит все коды 14-звенных 6-контурных структур ( $N_{V=0} = 30$  и  $N_{V \geq 1} = 83, \Sigma = 30 + 83 = 113$ );

- путем добавления еще одного проектного параметра ( $V = 1, 2, \dots, 8$ ) диапазон синтезируемых рычажных механизмов для создания новых изобретений может быть расширен (по сравнению с диапазоном для известных механизмов с  $V = 0$ ) более чем в 3 раза (согласно  $N_{V=0} + N_{V \geq 1} / N_{V=0} = (27 + 62) / 27 = 3,3$  на основе применения MJ-шарниров ( $j \geq 2$ );

Таблица F1

Универсальная структурная таблица расчетных стандартных кодов [LA]/V правильного строения одноподвижных механизмов при  $K = 1 \dots 5$

F = 1, h = 3, H = 1, r <sub>c</sub> = 0																		h = 3 F = 1 i ≤ K + F r <sub>c</sub> = 0										
	K = 1 (ñ = 4)				K = 2 (ñ = 6)				K = 3 (ñ = 8, N <sub>3</sub> = 9)																			
[LA]/V	0	0	1	2	0	1	2	3	0	0	0	1	1	2	2	3	4											
n <sub>2</sub>	4	4	5	6	4	5	6	5	4	5	6	5	6	6	7	7	8											
n <sub>3</sub>	-	2	1	0	4	2	0	3	4	2	0	3	1	2	0	1	0											
n <sub>4</sub>	-	-	-	-	0	1	2	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0											
K = 4 (ñ = 10, N <sub>4</sub> = 23)																												
[LA]/V	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	5	6							
n <sub>2</sub>	4	5	6	6	7	7	8	5	6	7	7	8	6	7	8	8	7	8	9	8	9	10						
n <sub>3</sub>	6	4	2	3	0	1	0	5	3	1	2	0	4	2	0	1	3	1	0	2	0	1	0					
n <sub>4</sub>	0	1	2	0	3	1	0	0	1	2	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0					
n <sub>5</sub>	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0					
F = 1, h = 3, H = 1																												
K = 5 (ñ = 12, N <sub>5</sub> = 53; V = 0, V = 1)																												
[LA]/V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
n <sub>2</sub>	4	5	6	6	7	7	7	8	8	8	8	9	9	9	10	5	6	7	7	8	8	8	9	10				
n <sub>3</sub>	8	6	4	5	2	3	4	0	1	2	2	0	0	1	0	7	5	3	4	1	2	3	0	1	1	0		
n <sub>4</sub>	0	1	2	0	3	1	0	4	2	0	1	1	2	0	0	0	1	2	0	3	1	0	2	0	1	0		
n <sub>5</sub>	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	0	1		
n <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1		
K = 5 (2 ≤ V ≤ V <sub>max</sub> = 8)																												
[LA]/V	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8
n <sub>2</sub>	6	7	8	8	9	9	9	10	10	7	8	9	9	10	10	8	9	10	10	11	9	10	11	10	11	11	12	
n <sub>3</sub>	6	4	2	3	0	1	2	0	0	5	3	1	2	0	1	4	2	0	1	0	3	1	0	2	0	1	0	
n <sub>4</sub>	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	
n <sub>5</sub>	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
n <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	



т. е. структурной перестройкой исходной цепи за счет выбора одного из 89 правильных кодов.

**Пример 1.** Рассчитанную по компьютерным программам [20] десятизвенную структуру с кодом строения [7120/0] (т. е. с набором звеньев  $n_2 = 7, n_3 = 1, n_4 = 2, n_5 = 0, V = 0$ ) создать нельзя, так как ее нет в табл. F1. Кроме того, невозможность сборки замкнутой цепи из неправильно рассчитанного набора звеньев легко установить математически (рассчитав  $AVC = 1, D = 1, r_c < 0$ ) и определить по уравнению (9) дробное число собираемых из этих звеньев замкнутых контуров:

$$K = 1 + \frac{1}{2}(V + n_3 + 2n_4) = 1 + \frac{1}{2}(0 + 1 + 2 \cdot 2) = 3 \frac{1}{2}.$$

Дробное число указывает на то, что один из четырех контуров собираемой КЦ остается открытым.

Установить пути замены неправильно рассчитанного компьютерного строения 10-звенной цепи (для обеспечения требуемой целевой функции оптимального синтеза  $D = 0$  (13)) можно следующим образом:

- для синтеза SJ-цепей с однократными шарнирами ( $V = 0$ ) выбрать в табл. F1, например, стандартный код правильного строения

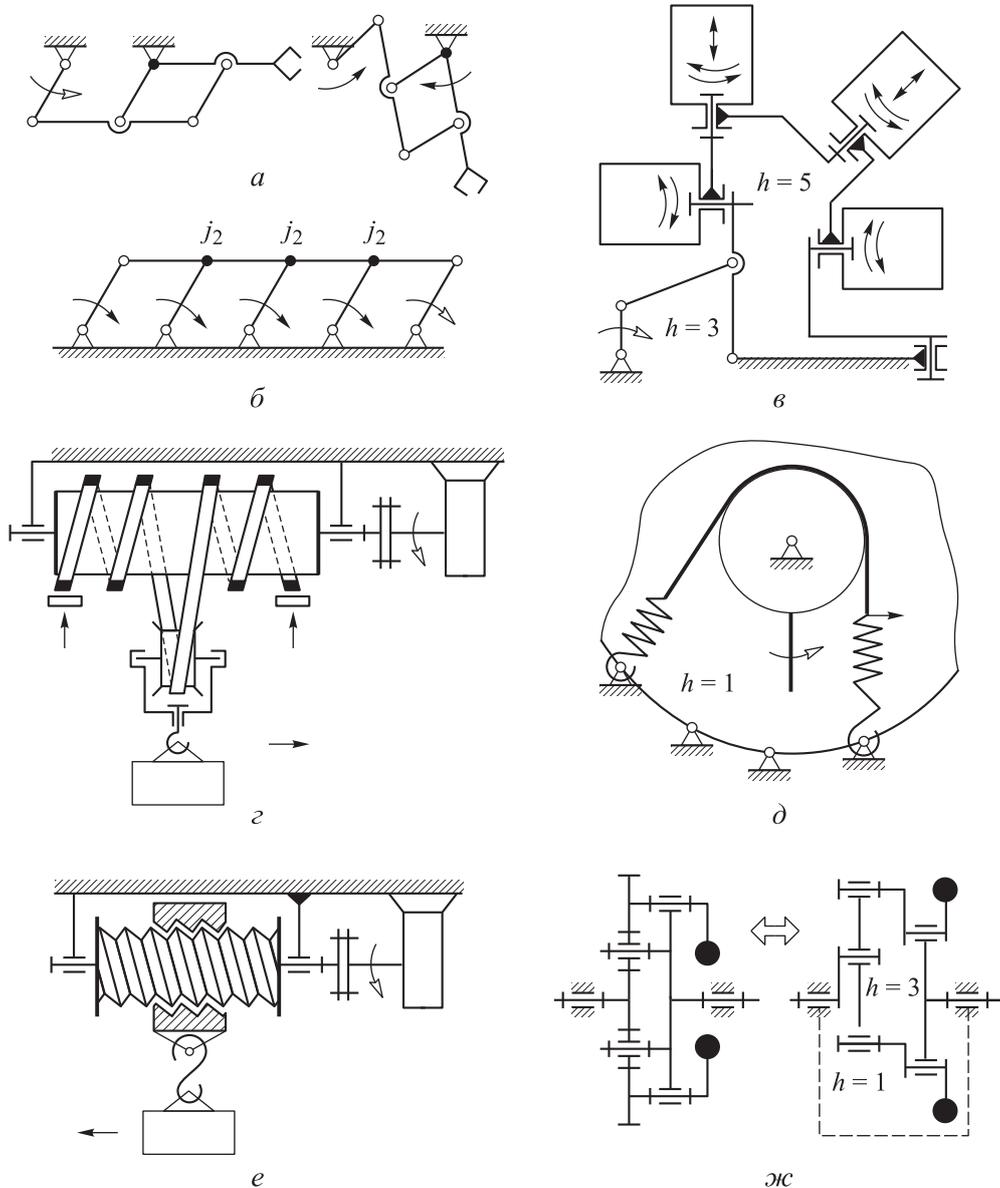


Рис. 2. Примеры синтезированных плоских и пространственных механизмов с геометрическими (а-в), гибкими (г, д) и динамическими (е, ж) связями:  
 а —  $h = 3, V = 1$ ; б —  $h = 3, V = 3$ ; в —  $h = 3, h = 5, V = 0$ ; г-е —  $h = 1$ ; ж —  $h = 1, h = 3$

Code  $[LA]/V = 7030/0$  (из 23 возможных, т. е. собираемых в замкнутую цепь кодов строения), указывающий, что в дефектном коде строения  $[7120/0]$  необходимо убрать одно трехшарнирное звено ( $n_3 = 0$ ) и увеличить число четырехшарнирных звеньев до  $n_4 = 3$ ;

- для синтеза MJ-цепей с многократными шарнирами ( $V \geq 1$ ) в дефектном коде строения  $[7120/0]$  заменить, например, на правильный расчетный код строения  $[7120/1]$ , т. е. применить один двукратный шарнир.

На основе табл. F1 можно эффективно и быстро синтезировать не только рычажные механизмы, но и их зубчатые аналоги в виде планетарных самоустанавливающихся механизмов [23].

Чтобы решить такую необычную для ТММ задачу синтеза механизма с неизвестным числом звеньев  $\tilde{n}$ , предлагается использовать следующий алгоритм:

- определение по табл. F1 единственного (из 89 возможных) кода строения  $[LA]/V = 64200/0$  и создание по нему 12-звенного рычажного механизма с трехповодковой 4-звенной группой Ассура [24];

- построение (путем замены низших пар на высшие) его зубчатого 6-звенного аналога в виде планетарного механизма с тремя равномерно нагруженными сателлитами (согласно данным Л.Н. Решетова, устранение избыточных связей в таких оптимальных структурах планетарных редукторов повышает срок их службы в 3 раза).

На рис. 2 приведены примеры синтезированных на основе предлагаемой единой теории структуры, синтеза и анализа МС механизмов постоянной и переменной структуры, выполненных на уровне изобретений для разных областей техники:

*a* — рычажный механизм с точной продолжительной внутрициклового остановкой [58] (на основе переменной структуры в особых положениях за счет самоуправляемого перехода от параллелограмма к антипараллелограмму и наоборот);

*б* — синхронный рычажный привод нескольких ведущих колес, например, тепловозов [59];

*в* — пространственный турбулентный рычажный смеситель с четырьмя месильными емкостями [60];

*г* — механическая безредукторная лебедка с роторно-винтовым гибким движителем [61]

для горизонтального перемещения по гибкой связи подвешенного груза;

*д* — механизм трибометра для определения предельной силы тяги фрикционной гибкой связи [62] (при задаваемом разном угле ее обхвата ведущего шкива через динамические упругие связи);

*е* — маятниковый рычажный механизм [63] с динамической гравитационной связью (для прямолинейного горизонтального движения подвешенного груза в безредукторном механическом приводе);

*ж* — особый планетарный инерционный импульсный механизм [64] с динамическими инерционными связями от вращающихся неуравновешенных грузовых звеньев.

## Выводы

1. Предлагаемая единая теория структуры, синтеза и анализа МС позволяет установить полную область возможного существования открытых, замкнутых и смешанных КЦ с заданным числом их замкнутых контуров и выполнить в этой области направленный оптимальный структурный синтез и анализ разнообразных новых эффективных механизмов для разных областей машиностроения (на уровне изобретений [58–65]).

2. Полученный конечный массив целочисленных неотрицательных решений универсальной структурной математической модели USM Model (в виде табл. F1/F1A) представляет собой полный набор расчетных стандартных кодов строения всех возможных (для применения в машиностроении)  $K$ -контурных оптимальных структур ( $K = 2, 3, 4, 5, 6$  и  $r_c = 0$ ) для синтеза  $\tilde{n}$ -звенных ( $\tilde{n} = 4, 6, 8, 10, 12$  и  $14$ ) рычажных механизмов, в которых гарантированно отсутствуют:

- вредные избыточные связи (которые согласно монографиям и практике эксплуатации [2, 5] в несколько раз снижают срок их службы);

- лишние степени свободы (приводящие к неуправляемой приводным двигателем подвижности механизма, т. е. к его неработоспособности).

3. Указанные в универсальных структурных таблицах F1 и F1A расчетные коды правильного строения ( $r_c = 0$ ) возможных оптимальных структур ( $89 + 113 = 202$  кода) гарантированно обеспечивают сборку всех замкнутых контуров

при синтезе многозвенных КЦ, так как расчетное строение этих структур реализует необходимый критерий сборки кинематической цепи  $AVC = 0$ .

4. Конструирование многозвенных рычажных механизмов ( $\tilde{n} = 4, \dots, 14$ ) со структурой, код которой отсутствует в табл. F1/F1A, приводит к созданию «дефектных» механизмов, т. е. статически неопределимых систем с избыточными связями (при  $r_c > 0$ ) или с неуправляемой

подвижностью (при  $r_c < 0$ ), представляющих собой неправильные структуры, которые нужно исправлять. Для устранения указанных дефектов в ошибочно спроектированном многозвенном ( $\tilde{n} = 4, \dots, 14$ ) многоконтурном ( $K = 2, 3, \dots, 6$ ) рычажном механизме необходимо и достаточно выполнить его структурную перестройку (при сохранении числа его звеньев и подвижности КП), используя универсальные структурные таблицы F1 и F1A.

## Литература

- [1] Ассур Л.В. *Исследование плоских стержневых механизмов с точки зрения их структуры и классификации*. Москва, Изд-во АН СССР, 1952. 529 с.
- [2] Кожевников С.Н. *Основания структурного синтеза механизмов*. Киев, Наукова думка, 1979. 232 с.
- [3] Баранов Г.Г. Классификация, строение, кинематика и кинетостатика плоских механизмов с парами первого рода. *Труды семинара по теории машин и механизмов*, Москва, ИМАШ, 1952, т. 2, № 46, с. 15–39.
- [4] Артоболовский И.И. *Механизмы в современной технике. В 7 т. Т 1. Элементы механизмов. Простейшие рычажные и шарнирно-рычажные механизмы*. Москва, URSS, 2019. 500 с.
- [5] Решетов Л.Н. *Самоустанавливающиеся механизмы. Справочник*. Москва, Машиностроение, 1979. 334 с.
- [6] Крайнев А.Ф. *Механика (искусство построения) машин. Фундаментальный словарь*. Москва, Машиностроение, 2000. 904 с.
- [7] Пожбелко В.И. Единая теория и результаты моделирования механических, трибомеханических и биомеханических систем. *Тр. XXIII Российской школы по проблемам науки и технологий*, Миасс, 24–26 июня 2003, Москва, УрОРАН, 2003, с. 375–392.
- [8] Пожбелко В.И. *Инерционно-импульсные приводы машин с динамическими связями*. Москва, Машиностроение, 1989. 136 с.
- [9] Вульфсон И.И. *Динамика цикловых машин*. Санкт-Петербург, Политехника, 2013. 425 с.
- [10] Евграфов А.Н., Коловский М.З., Петров Г.Н. *Теория механизмов и машин*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2015. 206 с.
- [11] Тимофеев Г.А. *Теория механизмов и механика машин*. Москва, Высшее образование, 2009. 352 с.
- [12] Пожбелко В.И., Лившиц В.А. *Теория механизмов и машин в вопросах и ответах*. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2004. 439 с.
- [13] Смелягин А.И. *Структура машин, механизмов и конструкций*. Москва, ИНФРА-М, 2019. 387 с.
- [14] Умнов Н.В., Сильвестров Э.Е. Использование методов гомотопии при синтезе механизмов. *Сб. докл. междунар. конф. по теории механизмов и машин*, Краснодар, Кубанский ГТУ, 2006, с. 47–48.
- [15] Абдраимов С., Джуматаев М.С. *Шарнирно-рычажные механизмы переменной структуры*. Бишкек, Илим, 1993. 177 с.
- [16] Пожбелко В.И. *Теория структуры механических систем. Методы решения задач синтеза механизмов*. Челябинск, ЧГТУ, 1993, с. 19–56.
- [17] Марковец А.В., Полотебнов В.О. Синтез механизмов транспортирования материалов с прямолинейным участком траектории движения зубчатой рейки. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, 2018, т. 38, № 1, с. 117–121.
- [18] Сухих Р.Д. Структурный синтез механизмов по заданному числу звеньев. *Расчет, проектирование и конструирование железнодорожных машин: сб. науч. тр.*, Санкт-Петербург, ПГУПС, 2003, ч. 3, с. 3–31.
- [19] Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2004, т. 2, № 2, с. 3–17.

- [20] Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. *Система проектирования плоских рычажных механизмов*. Москва, Машиностроение, 1988. 232 с.
- [21] Пейсах Э.Е. Атлас структурных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов. *Теория механизмов и машин*, 2006, т. 4, № 1(7), с. 3–17.
- [22] Романцев А.А. К вопросу создания структурных схем плоских шарнирных групп звеньев. *Теория механизмов и машин*, 2014, т. 12, № 1(23), с. 81–90.
- [23] Пожбелко В.И. Единая теория структуры, структурный синтез и анализ статически определимых механических систем на основе новой формулы подвижности. *Теория механизмов и машин*, 2013, т. 11, № 2(22), с. 15–37.
- [24] 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(24), с. 66–80.
- [25] Пожбелко В.И. Метод решения задачи выявления изоморфизма или метаформизма при структурном синтезе сложных многоконтурных механических систем. *Теория механизмов и машин*, 2015, т. 13, № 1(25), с. 23–40, doi: 10.5862/TMM.25.3
- [26] Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Разработка метода структурного синтеза многоконтурных рычажных механизмов с многократными шарнирами на основе базисных групп. *Теория механизмов и машин*, 2018, т. 16, № 4(40), с. 136–149, doi: 10.5862/TMM.40.1
- [27] Kolovsky M., Evgrafov A., Semenov Yu., Slousch A. *Advanced Theory of Mechanisms and Machines*. Berlin, Springer, 2000. 396 p.
- [28] Peisakh E. E. An algorithmic description of the structural synthesis of planar Assur groups. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2007, vol. 36, no. 6, pp. 505–514, doi: 10.3103/S1052618807060015
- [29] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. *Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanism and Machine Science*, Switzerland, Springer, 2019, vol. 73, pp. 559–568, doi: 10.1007/978-3-030-20131-9\_56
- [30] Uicker J.J., Pennock G.R. *Theory of Mechanisms*. New York, Oxford Univ. Press, 2003. 928 p.
- [31] Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration and hierarchical classification of planar simple-jointed kinematic chains: application to 12- and 14-bar single degree-of-freedom chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, pp. 1030–1050, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.015
- [32] Ceccarelli M. *Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulations*. Netherlands, Springer, 2004. 312 p.
- [33] Sunkari R.P., Schmidt L.C. Structural synthesis of planar kinematic chains by adapting a McKay-type algorithm. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, vol. 41 (9), pp. 1021–1030, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.11.007
- [34] Servatius B., Shai O., Whiteley W. Combinatorial Characterization of the Assur Graphs from Engineering. *European Journal of Combinatorics*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 1091–1104, doi: 10.1016/j.ejc.2009.11.019
- [35] Müller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: 10.1017/S0263574718000619
- [36] Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration of planar simple-jointed kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, no. 9, pp. 1030–1050, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.015
- [37] Wei Y.E., Fang Y.F., Guo S. Reconfigurable parallel mechanisms with planar five-bar metamorphic linkages. *Science China. Technological Science*, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 210–218.
- [38] Kong X., Gosselin C.M. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007. 268 p.
- [39] Gogu G. *Structural synthesis of parallel robots (Solid mechanics applications)*. Netherlands, Springer, 2008. 706 p.
- [40] Ding H., Hou F., Kecskemethy A., Huang Z. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, vol. 46, no. 11, pp. 1588–1600, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012

- [41] Li Q., Huang Z. Type synthesis of parallel mechanism using Lie group. *IEEE Transactions of Robotics and Automation*, 2004, no. 2, vol. 20, pp. 173–180, doi: 10.1109/TRA.2004.824650
- [42] Tsai L.W. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. New York, Wiley InterScience, 1999. 520 p.
- [43] Balchanowski J. General method of structural synthesis of parallel mechanisms. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 256–268, doi: 10.1016/j.acme.2015.11.002
- [44] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, no. 11, vol. 36, pp. 1627–1640, doi: 10.1017/S0263574718000619
- [45] Li C., Guo H., Tang D., Yan H., Liu R., Deng Z. A 3-R(SRS)RP Multi-Loop Mechanism for Space Manipulation: Design, Kinematics, Singularity, and Workspace. *Mechanisms Robotics*, 2020, vol. 12, no. 1 pp. 1–17, doi: 10.1115/1.4044911
- [46] Liu J. Representations & isomorphism identification of planar kinematic chains with multiple joints based on the converted adjacent matrix. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, vol. 48, pp. 15–21, doi: 10.3901/JME.2012.05.015
- [47] Ding H., Huang Z. Isomorphism identification of graphs: Especially for the graphs of kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, vol. 44, no. 1, pp. 122–139, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.02.008
- [48] Chu J., Zou Y. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, vol. 228, pp. 2178–2192, doi: 10.1177/0954406213516306
- [49] Ding H., Yang W., Huang P., Kecskemethy A. Automatic structural synthesis of planar multiple joint kinematic chains. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2013, vol. 135, pp. 091007-1, doi: 10.1115/1.4024733
- [50] Pozhbelko V. A unified structure theory of mechanical systems with simple and multiple joints: Multiloop structural synthesis, DOF-analysis and isomorphic identification. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, October 25-30, 2015, doi: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS3.003
- [51] Ermoshina E., Pozhbelko V., Kuts D. Generation of non-fractionated planar closed kinematic chains with all the possible set multiple joint assortment up to MAX total multiple joint factor. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, October 25–30, 2015, doi: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS3.004
- [52] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open, closed loop and mixed mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001
- [53] Pozhbelko V., Ermoshina E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints for 1-DOF up to 5- loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, vol. 90, no. 8, pp. 108–127, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.006
- [54] Ermoshina E., Pozhbelko V. Structural Synthesis, Mobility Analysis and Creation of Complete Atlas of Multiloop Planar Multiple-Jointed Kinematic Chains on Base All Possible Sets of Color Multiple Joints for Industrial Applications. *New Trends in Mechanism and Machine Science. Theory and Industrial Applications. Mechanism and Machine Science*, Switzerland, Springer, 2017, vol. 43, pp. 375–382, doi: 10.1007/978-3-319-44156-6\_38
- [55] Pozhbelko V., Kuts E. Structural synthesis of planar 10-link 1-DOF kinematic chains with up to pentagonal links with all possible multiple joint assortments for mechanism design. *New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanism and Machine Science*, Switzerland, Springer, 2018, vol. 57, pp. 27–35, doi: 10.1007/978-3-319-79111-1\_3
- [56] Gogu G. Mobility of mechanisms: a critical review. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, pp. 1068–1097, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.014
- [57] Пожбелко В.И. VIP-тест на интеллект (с универсальными структурными таблицами кодов строения). Патент РФ № 2013100510, бюл. № 20, 2014.
- [58] Пожбелко В.И. Рычажный механизм. Патент РФ № 2246056, бюл. № 4, 2005.
- [59] Пожбелко В.И. Рычажная передача с многократными VIP-шарнирами. Патент РФ № 2543135, бюл. № 23, 2014.

- [60] Пожбелко В.И. *Пространственный турбулентный рычажный смеситель*. Патент РФ № 2554584, бюл. № 18, 2015.
- [61] Пожбелко В.И. *VIP-лебедка для горизонтального перемещения подвешенного груза (с роторно-винтовым гибким двигателем)*. Патент РФ № 2478558, бюл. № 10, 2013.
- [62] Пожбелко В.И. *Трибометр для определения предельных характеристик трения гибких тел*. Патент РФ № 2486493, бюл. № 18, 2013.
- [63] Пожбелко В.И. *Маятниковый VIP-механизм для горизонтального перемещения подвешенного груза*. Патент РФ № 2605701, бюл. № 36, 2016.
- [64] Пожбелко В.И. *Особый планетарный инерционный импульсный механизм*. А.с. № 627280 СССР, бюл. № 10, 1986.
- [65] Пожбелко В.И. *Пространственный платформенный VIP-манипулятор*. Патент РФ № 2722165, бюл. № 15, 2020.

## References

- [1] Assur L.V. *Issledovaniye ploskikh sterzhnevyykh mekhanizmov s tochki zreniya ikh struktury i klassifikatsii* [Investigation of flat rod mechanisms in terms of their structure and classification]. Moscow, AN SSSR publ., 1952. 529 p.
- [2] Kozhevnikov S.N. *Osnovaniya strukturnogo sinteza mekhanizmov* [The Foundation of structural synthesis of mechanisms]. Kiyev, Naukova dumka publ., 1979. 232 p.
- [3] Baranov G.G. Classification, structure, kinematics and kinetostatics of plane mechanisms with pairs of the first kind. *Trudy seminarov po teorii mashin i mekhanizmov* [Proceedings of the seminar on the theory of machines and mechanisms]. Moscow, IMASH publ., 1952, no. 46, vol. 2, pp. 15–39.
- [4] Artobolevskiy I.I. *Mekhanizmy v sovremennoy tekhnike. V 7 t. 1. Elementy mekhanizmov. Prosteyshiyechyazhnyye i sharnirno-rychazhnyye mekhanizmy* [Mechanisms in modern technology. Vol. 1. Elements of mechanisms. The simplest lever and toggle mechanisms]. Moscow, URSS publ., 2019. 500 p.
- [5] Reshetov L.N. *Samoustnavlivayushchiyesya mekhanizmy. Spravochnik* [Self-aligning mechanisms]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1979. 334 p.
- [6] Kravtsov A.F. *Mekhanika (iskusstvo postroyeniya) mashin. Fundamental'nyy slovar'* [Mechanics (the art of building) machines. Fundamental dictionary]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2000. 904 p.
- [7] Pozhbelko V.I. Unified theory and results of modeling of mechanical, tribomechanical and biomechanical systems. *Tr. XXIII Rossiyskoy shkoly po problemam nauki i tekhnologii* [Proceedings of the XXIII Russian school of science and technology]. Miass, 2003, pp. 375–392.
- [8] Abdraimov S., Dzhumatayev M.S. *Sharnirno-rychazhnyye mekhanizmy peremennoy struktury* [Toggle mechanisms of variable structure]. Bishkek, Ilim publ., 1993. 177 p.
- [9] Vul'fon I.I. *Dinamika tsiklovyykh mashin* [Dynamics of cyclical machines]. Sankt-Petersburg, Politekhnik publ., 2013. 425 p.
- [10] Evgrafov A.N., Kolovskiy M.Z., Petrov G.N. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Mechanics of machines]. Sankt-Petersburg, Politekhnikeskii universitet publ., 2015. 206 p.
- [11] Timofeyev G.A. *Teoriya mekhanizmov i mekhanika mashin* [Mechanics of machines]. Moscow, Vyssheye obrazovaniye publ., 2009. 352 p.
- [12] Pozhbelko V.I., Livshits V.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin v voprosakh i otvetakh* [Theory of mechanisms and machines in questions and answers]. Chelyabinsk, YUUrGU publ., 2004. 439 p.
- [13] Smelyagin A.I. *Struktura mashin, mekhanizmov i konstruktsiy* [Structure of machines, mechanisms and structures]. Moscow, INFRA-M publ., 2019. 387 p.
- [14] Umnov N.V., Sil'vestrov E.E. Using homotopy methods in the synthesis of mechanisms. *Sb. dokl. mezhdunar. konf. po teorii mekhanizmov i mashin* [Collection of reports of the international conference on the theory of mechanisms and machines]. Krasnodar, Kubanskiy GTU publ., 2006, pp. 47–48.
- [15] Abdraimov S., Dzhumatayev M.S. *Sharnirno-rychazhnyye mekhanizmy peremennoy struktury* [Joint-lever mechanisms of variable structure]. Bishkek, Ilim publ., 1993. 177 p.

- [16] Pozhbelko V.I. *Teoriya struktury mekhanicheskikh sistem. Metody resheniya zadach sinteza mekhanizmov* [Theory of the structure of mechanical systems. Methods for solving the problems of synthesis of mechanisms]. Chelyabinsk, CHGTU publ., 1993, pp. 19–56.
- [17] Markovets A.V., Polotebnov V.O. Synthesis of mechanisms of material handling mechanism with a toothed bar straight line section of the movement. *The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 117–121 (in Russ.).
- [18] Sukhikh R.D. Structural synthesis of mechanisms for a given number of links. *Raschet, proyektirovaniye i konstruirovaniye zheleznodorozhnykh mashin. Sb. nauch. tr.* [Calculation, design and construction of railway machines. Collection of scientific papers]. Sankt-Petersburg, PGUPS publ., 2003, pt. 3, pp. 3–31.
- [19] Dvornikov L.T. Experience in structural synthesis of mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2004, vol. 2, no. 2, pp. 3–17 (in Russ.).
- [20] Peysakh E.E., Nesterov V.A. *Sistema proyektirovaniya ploskikh rychazhnykh mekhanizmov* [System design flat lever mechanisms]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1988. 232 p.
- [21] Peysakh E.E. Atlas of structural diagrams of eight-link flat articulated mechanisms. *Theory of mechanisms and machines*, 2006, vol. 4, no. 1(7), pp. 3–17 (in Russ.).
- [22] Romantsev A.A. On the issue of creating structural diagrams of flat articulated groups of links. *Theory of mechanisms and machines*, 2014, vol. 12, no. 1(23), pp. 81–90 (in Russ.).
- [23] Pozhbelko V.I. Unified theory of structure, structural synthesis and analysis of statically determinable mechanical systems based on a new mobility formula. *Theory of mechanisms and machines*, 2013, vol. 11, no. 2(22), pp. 15–37 (in Russ.).
- [24] Pozhbelko V.I. A universal method for the topological synthesis of multi-loop structures and an atlas of kinematic chains of eight-link mechanisms and their invariants. *Theory of mechanisms and machines*, 2014, vol. 12, no. 2(24), pp. 66–80 (in Russ.).
- [25] Pozhbelko V.I. A method for solving the problem of identifying isomorphism or metaformism in the structural synthesis of complex multi-circuit mechanical systems. *Theory of mechanisms and machines*, 2015, vol. 13, no. 1(25), pp. 23–40 (in Russ.), doi: 10.5862/TMM.25.3
- [26] Pozhbelko V.I., Kuts E.N. Structural synthesis of multiloop linkages with multiple joints. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2018, vol. 16, no. 4(40), pp. 136–149 (in Russ.), doi: 10.5862/TMM.40.1
- [27] Kolovsky M., Evgrafov A., Semenov Yu., Slousch A. *Advanced Theory of Mechanisms and Machines*. Berlin, Springer, 2000. 396 p.
- [28] Peisakh E. E. An algorithmic description of the structural synthesis of planar Assur groups. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2007, vol. 36, no. 6, pp. 505–514, doi: 10.3103/S1052618807060015
- [29] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. *Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanism and Machine Science*, Switzerland, Springer, 2019, vol. 73, pp. 559–568, doi: 10.1007/978-3-030-20131-9\_56
- [30] Uicker J.J., Pennock G.R. *Theory of Mechanisms*. New York, Oxford Univ. Press, 2003. 928 p.
- [31] Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration and hierarchical classification of planar simple-jointed kinematic chains: application to 12- and 14-bar single degree-of-freedom chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, pp. 1030–1050, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.015
- [32] Ceccarelli M. *Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulations*. Netherlands, Springer, 2004. 312 p.
- [33] Sunkari R.P., Schmidt L.C. Structural synthesis of planar kinematic chains by adapting a McKay-type algorithm. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, vol. 41 (9), pp. 1021–1030, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.11.007
- [34] Servatius B., Shai O., Whiteley W. Combinatorial Characterization of the Assur Graphs from Engineering. *European Journal of Combinatorics*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 1091–1104, doi: 10.1016/j.ejc.2009.11.019
- [35] Müller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: 10.1017/S0263574718000619

- [36] Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration of planar simple-jointed kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, no. 9, pp. 1030–1050, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.015
- [37] Wei Y.E., Fang Y.F., Guo S. Reconfigurable parallel mechanisms with planar five-bar metamorphic linkages. *Science China. Technological Science*, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 210–218.
- [38] Kong X., Gosselin C.M. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007. 268 p.
- [39] Gogu G. *Structural synthesis of parallel robots (Solid mechanics applications)*. Netherlands, Springer, 2008. 706 p.
- [40] Ding H., Hou F., Kecskemethy A., Huang Z. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, vol. 46, no. 11, pp. 1588–1600, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012
- [41] Li Q., Huang Z. Type synthesis of parallel mechanism using Lie group. *IEEE Transactions of Robotics and Automation*, 2004, no. 2, vol. 20, pp. 173–180, doi: 10.1109/TRA.2004.824650
- [42] Tsai L.W. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. New York, Wiley InterScience, 1999. 520 p.
- [43] Balchanowski J. General method of structural synthesis of parallel mechanisms. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 256–268, doi: 10.1016/j.acme.2015.11.002
- [44] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, no. 11, vol. 36, pp. 1627–1640, doi: 10.1017/S0263574718000619
- [45] Li C., Guo H., Tang D., Yan H., Liu R., Deng Z. A 3-R(SRS)RP Multi-Loop Mechanism for Space Manipulation: Design, Kinematics, Singularity, and Workspace. *Mechanisms Robotics*, 2020, vol. 12, no. 1 pp. 1–17, doi: 10.1115/1.4044911
- [46] Liu J. Representations & isomorphism identification of planar kinematic chains with multiple joints based on the converted adjacent matrix. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, vol. 48, pp. 15–21, doi: 10.3901/JME.2012.05.015
- [47] Ding H., Huang Z. Isomorphism identification of graphs: Especially for the graphs of kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, vol. 44, no. 1, pp. 122–139, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.02.008
- [48] Chu J., Zou Y. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, vol. 228, pp. 2178–2192, doi: 10.1177/0954406213516306
- [49] Ding H., Yang W., Huang P., Kecskemethy A. Automatic structural synthesis of planar multiple joint kinematic chains. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2013, vol. 135, pp. 091007-1, doi: 10.1115/1.4024733
- [50] Pozhbelko V. A unified structure theory of mechanical systems with simple and multiple joints: Multiloop structural synthesis, DOF-analysis and isomorphic identification. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, 2015, doi: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS3.003
- [51] Ermoshina E., Pozhbelko V., Kuts D. Generation of non-fractionated planar closed kinematic chains with all the possible set multiple joint assortment up to MAX total multiple joint factor. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, October 25–30, 2015, doi: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS3.004
- [52] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open, closed loop and mixed mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001
- [53] Pozhbelko V., Ermoshina E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints for 1-DOF up to 5- loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, vol. 90, no. 8, pp. 108–127, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.006
- [54] Ermoshina E., Pozhbelko V. Structural Synthesis, Mobility Analysis and Creation of Complete Atlas of Multiloop Planar Multiple-Jointed Kinematic Chains on Base All Possible Sets of Color Multiple Joints for Industrial Applications. *New Trends in Mechanism and*

- Machine Science. Theory and Industrial Applications. Mechanism and Machine Science*, Switzerland, Springer, 2017, vol. 43, pp. 375–382, doi: 10.1007/978-3-319-44156-6\_38
- [55] Pozhbelko V., Kuts E. Structural synthesis of planar 10-link 1-DOF kinematic chains with up to pentagonal links with all possible multiple joint assortments for mechanism design. *New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanism and Machine Science*, Switzerland, Springer, 2018, vol. 57, pp. 27–35, doi: 10.1007/978-3-319-79111-1\_3
- [56] Gogu G. Mobility of mechanisms: a critical review. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, pp. 1068–1097, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.12.014
- [57] Pozhbelko V.I. *VIP-test na intellekt (s universal'nymi strukturnymi tablitsami kodov stroeniya)* [VIP intelligence test (with universal structural tables of building codes)]. Patent RF no. 2013100510, 2014.
- [58] Pozhbelko V.I. *Rychazhnyy mekhanizm* [Lever mechanism] Patent RF no. 2246056, 2005.
- [59] Pozhbelko V.I. *Rychazhnaya peredacha s mnogokratnymi VIP-sharnirami* [Linkage with multiple VIP hinges]. Patent RF no. 2543135, 2014.
- [60] Pozhbelko V.I. *Prostranstvennyy turbulentnyy rychazhnyy smesitel'* [Spatial turbulent lever mixer]. Patent RF no. 2554584, 2015.
- [61] Pozhbelko V.I. *VIP-lebedka dlya gorizontalnogo peremeshcheniya podveshennogo gruzha (s rotorno-vintovym gibkim dvizhitelem)* [VIP winch for horizontal movement of suspended loads (with rotor-screw flexible propulsion)]. Patent RF no. 2478558, 2013.
- [62] Pozhbelko V.I. *Tribometr dlya opredeleniya predel'nykh kharakteristik treniya gibkikh tel* [Tribometer for determining ultimate friction characteristics of flexible bodies]. Patent RF no. 2486493, 2013.
- [63] Pozhbelko V.I. *Mayatnikovyy VIP-mekhanizm dlya gorizontalnogo peremeshcheniya podveshennogo gruzha* [Pendulum VIP mechanism for horizontal suspension]. Patent RF no. 2605701, 2016.
- [64] Pozhbelko V.I. *Osobyy planetarnyy inertsionnyy impul'snyy mekhanizm* [Special planetary inertial impulse mechanism]. Avt. svid. SSSR no. 627280, 1986.
- [65] Pozhbelko V.I. *Prostranstvennyy platformennyy VIP-manipulyator* [Spatial platform VIP manipulator]. Patent RF no. 2722165, 2020.

Статья поступила в редакцию 17.02.2020

## 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. 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. 24–43, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-24-43

### Please cite this article in English as:

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. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 9, pp. 24–43, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-24-43