

УДК 621.01(075.8)

doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-12-29

Общая теория структурного синтеза нормальных и парадоксальных самоустанавливающихся рычажных механизмов и практика их создания в машиностроении для работы в разных h -пространствах

В.И. Пожбелко

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

An General theory of structural synthesis of normal and paradoxical Self-Aligning lever mechanisms and the practice of their creation in mechanical engineering for operation in different h -spaces

V.I. Pozhbelko

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

Изложена общая теория структурного синтеза самоустанавливающихся рычажных механизмов, состоящих из замкнутых контуров без вредных избыточных связей, работающих в заданном полном пространстве с заданным числом степеней свободы. Эта теория включает в себя аналитические структурные выражения строения механизмов без избыточных связей для их направленного структурного синтеза и анализа с учетом новой тригонометрической целевой функции структурного синтеза, угловых структурных уравнений и расширенной структурной математической модели всех возможных самоустанавливающихся механизмов. Эффективность предлагаемой общей теории структурного синтеза подтверждена примерами структур (на уровне изобретений), построенных на базе цилиндрических шарниров с различным взаиморасположением их осей. Это — вибромеханизм с упругими динамическими связями, пространственно-плоский манипулятор пространственного смесителя, складывающийся шарнирный манипулятор, многоемкостный турбулентный смеситель и пространственный параллелограммный манипулятор без особых положений. Работоспособность всех синтезированных рычажных механизмов, предназначенных для работы в однородном и смешанном пространствах, подтверждена теоретически по новой универсальной структурной формуле расчета подвижности механизма, а также на изготовленных экспериментальных моделях действующих механизмов, выполненных на основе одноподвижных вращательных кинематических пар.

Ключевые слова: оптимальный структурный синтез, самоустанавливающиеся механизмы, избыточные связи, цилиндрические шарниры, механизм Беннета, механизм Брикарда

The paper presents general theory of structural synthesis of the self-aligning lever mechanisms consisting of closed circuits without harmful excess connections and operating in the

given full space with the number of freedom degrees of h ($1 \leq h \leq 6$). This theory includes new analytical structural dependences of the input and output parameters to construct mechanisms missing the redundant connections and designed for directed structural synthesis and analysis, taking into account the new trigonometric objective function of the structural synthesis, angular structural equations and extended structural mathematical model of all possible self-aligning mechanisms. Effectiveness of the structural synthesis proposed general theory was confirmed by examples of structures (at the inventions level) built on the basis of cylindrical hinges with the different possible mutual arrangement of their axes. They include vibration mechanism with the elastic dynamic bonds, space flat manipulator of the spatial mixer, folding articulated manipulator, multi-capacity turbulent mixer and spatial parallelogram manipulator without special uncontrolled and “dead” positions. Operability of all synthesized lever mechanisms designed to operate in the homogeneous and mixed spaces was theoretically confirmed according to a new universal (unified) structural formula for calculating the mechanism mobility, as well as by the prepared experimental models of the operating mechanisms made on the basis of new single-moving rotational kinematic pairs.

Keywords: optimal structural synthesis, self-aligning mechanisms, redundant links, cylindrical hinges, Bennett mechanism, Bricard’s mechanism

Рассматриваемые механизмы представляют собой замкнутые кинематические цепи (КЦ) из рычажных звеньев, соединенных между собой в замкнутые контуры с применением одноподвижных вращательных и поступательных кинематических пар (КП), которые отличает простота изготовления и надежность [1–16].

Такие механизмы имеют особенности строения, синтеза и анализа [17–36].

Поступательные КП — предельный случай конструктивного исполнения вращательных КП с радиусом кривизны, равным бесконечности, поэтому в теории механизмов и машин (ТММ) для упрощения структурного синтеза и анализа исходные КЦ с вращательными и поступательными КП предварительно заменяют на КЦ со всеми вращательными КП, т. е. на механизмы такой же подвижности W со всеми цилиндрическими шарнирами [16, 28, 30, 37].

В ТММ применительно к цилиндрическим шарнирам механизмов впервые введены следующие термины:

- простой шарнир, в котором на одной оси установлено два рычажных звена;

- сложный (двойной, тройной, четвертной и т. д.) шарнир, где на одной оси размещены три рычажных звена и более; предложен в 1870 г. профессором Петербургского технологического института И.А. Вышнеградским [35], а в 1973 г. добавлен в базовый курс современного ТММ профессором С.Н. Кожевниковым [28];

- многократный шарнир (МКШ); в 2015 г. запатентован в компактной конструкции изоб-

ретения [38] и широко использован в научной литературе по механизмам [6, 26, 27, 34].

В разных работах по ТММ введены понятия следующих механизмов:

- нормальных [16], где число входов n равно подвижности механизма W (в КЦ с геометрическими связями в виде КП);

- особых [16], где $n < W$ (для контуров с динамическими связями);

- парадоксальных [21], которые надежно работают [3], но при расчете их подвижность $W = 0$ или $W < 0$, т. е. это как бы фермы; их примерами являются механизмы Беннета [31] и Брикада [36].

Структурный синтез механизмов с низшими КП (подвижностью $H = 1$) представляет наиболее общий подход к синтезу и более сложных механизмов с высшими парами ($H \geq 2$) — рычажных, кулачковых и зубчатых (на основе эквивалентной замены низших пар высшими [30]).

В научной монографии профессора С.Н. Кожевникова [28] на основе теоретических и экспериментальных исследований различных машин впервые поставлена задача оптимального структурного синтеза механизмов, т. е. механизмов без вредных избыточных связей (с числом $q = 0$); в научной монографии профессора Л.Н. Решетова [32] такие механизмы названы самоустанавливающимися и наиболее перспективными для машиностроения (вследствие простоты изготовления и сборки замкнутых контуров, снижения трения и изнашивания КП, повышенного в несколько раз срока службы).

В работах профессора Г.А. Тимофеева [30] предложен оригинальный метод выявления вредных избыточных связей в каждом замкнутом контуре анализируемого сложного механизма ($q \neq 0$) и определения рациональных путей их исключения ($q \Rightarrow 0$) на основе теории графов.

Профессор Н.В. Умнов установил [29], что предложенный профессором Л.В. Ассуром [28] перспективный подход к представлению их строения в виде наложения разных групп Ассура [30] оказался тупиковым для синтеза и построения полного атласа всех возможных схем из-за необходимости перебора установленного на ЭВМ профессором Э.Е. Пейсахом [17] огромного количества (до сотен тысяч) таких возможных групп Ассура.

Многолетние попытки решить проблему структурного синтеза всего возможного многообразия самоустанавливающихся механизмов с применением компьютерных программ [10, 11, 13, 25] привели к возникновению еще более сложной проблемы генерирования и анализа изоморфизма нескольких миллионов структурных схем, из которых 99 % являются повторяющимися (поэтому их надо выявлять и удалять).

Все структурные математические модели для целочисленного структурного синтеза механизмов (от первых уравнений профессора М. Грюблера 1890 г. [28] до современных моделей [5, 6, 27, 33]) содержат в качестве параметров только структурные параметры КЦ механизма (число звеньев, число КП, приведенное число МКШ, число независимых замкнутых контуров). В этих моделях отсутствуют угловые структурные параметры, задающие взаиморасположение осей цилиндрических шарниров рычажных звеньев.

Понятие «динамическая структура механизмов», впервые введенное автором и обобщенное в работах [39–41] для механизмов с инерционными динамическими связями, представляет собой набор частных производных от приведенных моментов инерции отдельных элементов подвижной механической системы. Основы теории строения, анализа и синтеза всех возможных механизмов с разной динамической структурой и заданными динамическими свойствами даны в научной монографии [40] и подтверждены испытаниями опытно-промышленных образцов автоматической бесступенчатой коробки скоростей для тяговых и транспортных машин, а также для виброудар-

ного привода камнеобрабатывающего станка [41].

Механизмы с динамическими связями разного типа, относящиеся к указанному классу особых механизмов, обладают свойством саморегулирования при изменении внешней нагрузки [41]. Это позволяет уменьшить число ведущих звеньев N на число замыкаемых гибкими g и динамическими d связями контуров \tilde{K} и рассчитать его по формуле

$$N = (W - \tilde{K}) < W,$$

которая подтверждена на практике [40] и согласована с рассмотренным далее примером синтеза механизма с числом степеней свободы $h = 1$.

Цель исследования — разработка общей теории структурного синтеза разнообразных самоустанавливающихся механизмов без избыточных связей на основе расширенной (за счет угловых структурных параметров) структурной математической модели с примерами ее применения на практике для создания на уровне изобретений [42–47] новых эффективных механизмов разных машин.

Основные понятия и структурные уравнения.

Согласно единой теории структуры механических систем [6, 26, 27], для структурного синтеза самоустанавливающихся механизмов введены следующие целочисленные соотношения и аналитические зависимости входных и выходных структурных параметров, определяющие строение замкнутых контуров, отсутствие ($q = 0$) или наличие ($q > 0$) избыточных связей в замкнутой КЦ.

Расчетный ассортимент (набор) двух- ($i = 2$) и многошарнирных ($i \geq 3$) звеньев базовой кинематической цепи (БКЦ) для синтеза механизма без избыточных связей

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

где n_i — число шарнирных звеньев БКЦ; K — число независимых (внутренних) замкнутых контуров с числом звеньев i .

Расчетный ассортимент (набор) замкнутых контуров БКЦ

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

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

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

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

где V — приведенное число МКШ.

Приведенное число МКШ с расчетным диапазоном

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

охватывающим как семейства механизмов с простыми шарнирами ($V = 0$), так и со всеми возможными структурами МКШ ($V \geq 1$) [7, 35].

Диапазон задаваемого числа степеней свободы пространства h , в котором должен быть собран и работать проектируемый механизм без избыточных связей

$$1 \leq h \leq 6. \quad (3)$$

Он включает в себя следующие дискретные значения:

$$h = 1; h = 2; h = 3; h = 4; h = 5; h = 6. \quad (4)$$

Число независимых замкнутых контуров $K = \sum K_h$ (где K_h — число замкнутых контуров КЦ в заданном h -пространстве), определяемое набором многошарнирных звеньев и приведенным числом МКШ многозвенного механизма любой сложности, точно рассчитываемое по следующей новой универсальной формуле [27] (независимо от того, в каком h -пространстве работает механизм) [6]:

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

Задаваемые для сборки каждого из замкнутых контуров параметры — число степеней свободы пространства h [27], наибольшая относительная подвижность звеньев в КП H_{\max} , минимальное число звеньев механизма без избыточных связей \tilde{n}_{\min} и наибольшее число шарниров (КП) на одном рычажном звене i_{\max} — взаимосвязаны между собой следующим образом:

$$H_{\max} = h - 1; \tilde{n}_{\min} = h + W; i_{\max} = K + W. \quad (6)$$

Новая универсальная формула для расчета подвижности любых механизмов, работающих в заданном h -пространстве,

$$W = (\tilde{n} - 1) - \sum_{h=1}^{h=6} (h - 1)K_h + f; f = \sum_{H=2}^{H=h-1} (H - 1)p_H, \quad (7)$$

где f — суммарная дополнительная подвижность высших КП; p_H — число КП повышенной подвижности, $H \geq 2$.

Расчетное число соединительных рычажных звеньев n^0 и необходимая суммарная подвижность f_{Σ}^0 их внутренних и внешних КП, образующих структурную группу нулевой подвижности (после замыкания звеньев группы на стойку с образованием в этой группе K^0 независимых контуров), предназначенную в КЦ для замыкания независимого контура без возникновения в нем избыточных связей в заданном h -пространстве (в общем случае $\sum K^0 = K + \tilde{K}$):

$$n^0 = \left[\sum_{h=1}^{h=6} (h - 1)K^0 - \sum_{H=2}^{H=h-1} (H - 1)p_H \right] + \tilde{K}; \quad (8)$$

$$f_{\Sigma}^0 = \sum_{h=1}^{h=6} hK^0,$$

а также для построения разнообразных самоустанавливающихся механизмов на основе указанных в работе [6] разных базовых структурных групп.

Уравнение баланса подвижностей механической системы без избыточных связей

$$\sum_{H=1}^{H=h-1} H p_H = W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h. \quad (9)$$

Согласно уравнению (9), в любом самоустанавливаемом механизме (независимые контуры которого замыкаются КП) сумма его подвижности и суммарного числа подвижностей всех КП (левая часть уравнения) должна быть равна сумме движений, необходимых для замыкания всех независимых контуров КЦ в заданном h -пространстве (правая часть уравнения).

Уравнение топологического баланса синтезируемой механической системы с геометрическими связями (КП)

$$\left\{ \sum_{i=1}^{i_{\max}} i n_i = \sum_{k=3}^{k_{\max}} k \alpha_k \right\} = \left[2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V \right]. \quad (10)$$

Согласно уравнению (10), суммарное число шарниров во всех рычажных звеньях собираемой КЦ ($\sum i n_i$) должно быть равно суммарному числу сторон всех образуемых вместе с L_0 замкнутых контуров ($\sum k \alpha_k$) и для механизмов без избыточных связей и лишних подвижностей также равно задаваемой суммарной константе входных параметров структурного синтеза

$$C_{\Sigma} = 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V. \quad (11)$$

Целевая функция структурного синтеза самоустанавливающихся механизмов без избы-

точных связей во всех независимых замкнутых контурах КЦ, представляющая собой тригонометрическую зависимость $\Phi(q)$, содержит набор слагаемых, которые при дискретных значениях $\sin \Psi_i$ ($\sin \Psi_i = 0$ или $\sin \Psi_i = 1$) обращаются в нуль и указывают требуемые в каждом заданном h -пространстве угловые и/или линейные параметры для сборки в контуры рычажных звеньев.

Целевая функция оптимального структурного синтеза самоустанавливающихся механизмов, содержащих замкнутые контуры во всех возможных h -пространствах [34], имеет вид

$$\Phi(q) = (q_{h=1} + q_{h=2} + q_{h=3} + q_{h=4} + q_{h=5} + q_{h=6}) = 0, \quad (12)$$

где q_h — число избыточных связей, возникающих при замыкании независимого контура в заданном h -пространстве, определяемое дискретными тригонометрическими (угловыми) структурными уравнениями, имеющими следующие нулевые решения (обеспечивающие $q = 0$):

- $q_{h=1} = \sin[1 - (g + d)] = 0 \Rightarrow$ решение $(g + d) = 1$; выполняется в КЦ при замыкании данного контура гибкой или динамической связью [42];

- $q_{h=2} = \sin(1 - l/R) = 0 \Rightarrow$ решение $l = R$; достигается путем выбора длины рычажного звена l , равной радиусу кривизны R траектории его движения;

- $q_{h=3} =$

$$= \Phi_1(1 - \cos \Psi_k) \left(\frac{e_k}{\sin \Psi_k} = \frac{a}{\sin \alpha} - \frac{b}{\sin \beta} \right) = 0,$$

где Ψ_k , α и β — угол отклонения оси шарнира от вертикали и его расчетные значения; e_k , a и b — кратчайшее расстояние между скрещивающимися осями цилиндрических шарниров и его расчетные значения; это уравнение имеет три возможных решения задачи достижения $q = 0$:

- $\Psi_k = 0$; при выполнении цилиндрических шарниров независимого контура с параллельными между собой осями вращения звеньев;

- $e_k = 0$, $\Psi_k \neq 0$; при изготовлении всех цилиндрических шарниров с пересекающимися в одной точке осями вращения [44];

- $e_k \neq 0$, $\Psi_k \neq 0$,

$$\left(\frac{a}{\sin \alpha} - \frac{b}{\sin \beta} \right) = 0;$$

примерами реализации в технике этого решения являются механизм Беннета [31] и его аналоги [3];

- $q_{h=4} = (1 - \sin \delta)(1 - 2 \cos \delta)(1 - 2 \sin \delta) = 0 \Rightarrow$ возможны три дискретных решения, реализуемые в пространственных механизмах [46] при угле между пересекающимися осями цилиндрических шарниров $\delta = 90, 60$ и 30° ;

- $q_{h=5} = (1 - \sin \gamma)(1 - 2 \cos \gamma)(1 - 2 \sin \gamma) = 0 \Rightarrow$ возможны три дискретных решения, реализуемые, например, в многоконтурных механизмах [44, 45] с углом между скрещивающимися осями цилиндрических шарниров $\gamma = 90, 60$ и 30° ;

- $q_{h=6} = \sin(6 - W - \tilde{n}) = 0 \Rightarrow$ решение $\tilde{n} = 6 + W$ указывает на необходимость выполнения пространственного рычажного механизма (с углами $\Psi \neq 0$, $\delta \neq 90^\circ$, $\gamma \neq 90^\circ$) с определенным числом звеньев, т. е. минимальное число звеньев таких механизмов $\tilde{n} = 6 + W = 6 + 1 = 7$.

Предлагаемая расширенная структурная математическая модель самоустанавливающихся механизмов (W-Model), составленная на основе обобщения аналитических зависимостей (1)–(12), имеет вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i_{\max}} i n_i &= 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V; \\ \sum_{i=1}^{i_{\max}} (i-2) n_i &= 2(K-1) - V; \\ \sum_{k=4}^{k_{\max}} k \alpha_k &= 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V; \\ \Phi(q) &= \sum_{h=1}^{h=6} q_h = 0; \\ n^0 &= \left[\sum_{h=1}^{h=6} (h-1) K^0 - \sum_{H=2}^{H=h-1} (H-1) p_H \right] + \tilde{K}; \\ f_{\Sigma}^0 &= \sum_{h=1}^{h=6} h K^0. \end{aligned} \quad (13)$$

На основе целочисленных решений целевой функции $\Phi(q) = 0$ (12) получены следующие результаты для направленного структурного синтеза:

- основные типы рычажных звеньев с различным взаиморасположением осей их цилиндрических шарниров (табл. 1), требуемых для работы в заданном h -пространстве без возникновения в контурах избыточных связей;

- дискретные и угловые структурные параметры (Ψ , α , β , δ , γ), необходимые для свободной сборки звеньев замкнутого контура КЦ в заданном h -пространстве без возникновения избыточных связей.

Таблица 1

Основные типы рычажных звеньев для сборки самоустанавливающихся механизмов без избыточных связей в заданном h -пространстве

Таблица 2

Расчетные параметры строения открытых цепей базовых структурных групп ($H = 1$) для образования замкнутых контуров самоустанавливающихся механизмов без избыточных связей

h	n^0	f_{Σ}^0	h	n^0	f_{Σ}^0	h	n^0	f_{Σ}^0	h	n^0	f_{Σ}^0
$K^0 = 1$			$K^0 = 2$			$K^0 = 3$			$K^0 = 4$		
1	1	1	1	2	2	1	3	3	1	4	4
2	1	2	2	2	4	2	3	6	2	4	8
3	2	3	3	4	6	3	6	9	3	8	12
4	3	4	4	6	8	4	9	12	4	12	16
5	4	5	5	8	10	5	12	15	5	16	20
6	5	6	6	10	12	6	15	18	6	20	24

Расчетные параметры строения открытых цепей базовых структурных групп ($H = 1$) для образования замкнутых контуров самоустанавливающихся механизмов без избыточных связей приведены в табл. 2.

Рассмотрим конкретные примеры практического применения модели W-Model (13), целочисленных (5)–(11) и угловых (12) структурных уравнений для создания на уровне изобретений разнообразных самоустанавливающихся механизмов, работающих в h -пространстве.

Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов, работающих в пространстве с числом степеней свободы $h = 1$. Согласно единой теории структуры механических систем [6], замкнутые контуры КЦ, способные работать в пространстве с числом степеней свободы $h = 1$, можно собрать только в случае их замыкания гибкими g или динамическими d связями рычажных звеньев между собой. Критерий применения в КЦ гибких и динамических связей, приводящих к образованию дополнительных

замкнутых контуров числом \tilde{K} , обозначим как $\tilde{K}(g + d) = 1$.

Решение этой задачи структурного синтеза выполним на основе установленных ранее решений целевой функции (12), обеспечивающих $q = 0$ для числа степеней свободы $h = 1$,

$$\Phi(q) = \{q_{h-1} = \sin[1 - (g + d)]\} = 0 \Rightarrow \tilde{K} = 1$$

и образования замкнутых контуров КЦ путем присоединения к стойке и ведущему звену базовой структурной группы [6], содержащей одношарнирное рычажное звено с присоединенной к нему динамической упругой связью (см. табл. 1 и 2).

Получены следующие расчетные параметры этой базовой структурной группы:

$$n^0 = [(h - 1)K^0 + (g + d)] = (1 - 1) \cdot 1 + 1 = 1;$$

$$f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 1 \cdot 1 = 1.$$

Схема синтезированного двухконтурного ($K = \tilde{K} = 2$) четырехзвенного ($\tilde{n} = 4$) рычажного механизма виброресепаратора, в котором оба

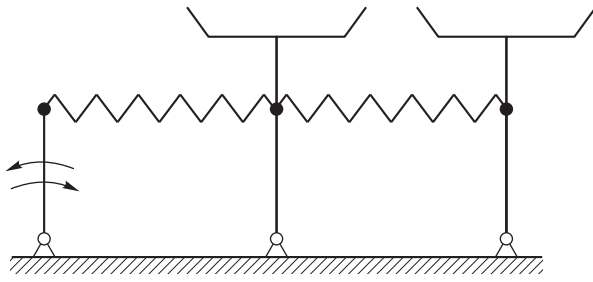


Рис. 1. Схема двухконтурного четырехзвенного рычажного механизма вибрационного сепаратора с динамическими связями

контура замкнуты динамическими упругими связями, приведена на рис. 1.

Согласно новой универсальной формуле (7), такой механизм имеет увеличенную расчетную подвижность

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K = (\tilde{n} - 1) = 4 - 1 = 3.$$

Приводом такого механизма служит один вращательный двигатель, обеспечивающий при одном входном звене управляемое движение нескольких динамически связанных рабочих органов и их автоматическую полную остановку при перегрузке без отключения двигателя.

Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов, работающих в пространстве с числом степеней свободы $h = 2$. Рассмотрим задачу создания замкнутых контуров рычажных механизмов со всеми одноподвижными КП без избыточных связей для работы в пространстве с числом степеней свободы $h = 2$.

Решение этой задачи, как и предыдущей, выполним на основе установленных ранее решений целевой функции (12), обеспечивающих $q = 0$.

С учетом принятых входных параметров синтеза механизма

$$h = 2; W = 1; K = 3; V = 0; H = 1; i_{\max} = K + W = 4$$

модель W-Model (13) принимает вид

$$2n_2 + 3n_3 + 4n_4 = 2(W + hK) \Rightarrow 14;$$

$$n_3 + 2n_4 = 2(K - 1) \Rightarrow 4;$$

$$\Phi(q) = q_{h=2} = \sin(1 - l/R) = 0 \Rightarrow l/R = 1;$$

$$n^0 = (h - 1)K^0 = (2 - 1) \cdot 1 = 1;$$

$$f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 2 \cdot 1 = 2.$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\begin{aligned} & \bullet n_2 = 3; n_3 = 0; n_4 = 2; \tilde{n} = n_2 + n_4 = 5 \Rightarrow \\ & \Rightarrow [LA]/V = [n_2 n_3 n_4]/V = [302]/0; \end{aligned}$$

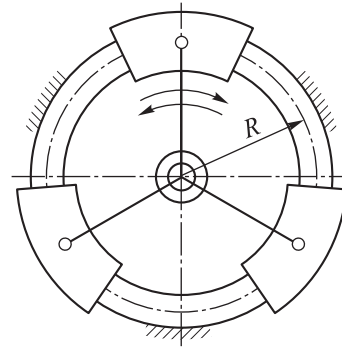


Рис. 2. Схема трехконтурного пятизвенного шарнирного механизма поворотной платформы

$$\bullet \sin(1 - l/R) = 0 \Rightarrow (l = R).$$

Схема синтезированного на основе полученных решений трехконтурного пятизвенного шарнирного механизма поворотной платформы приведена на рис. 2. Созданный механизм содержит три радиально изогнутых ползуна, установленных на круговой направляющей радиусом R и шарнирно соединенных с крестовиной длиной ребер l , центр которой при сборке КП этого механизма должен совпадать с центром круговой направляющей (для выполнения необходимого условия $q = 0$ за счет $l = R$).

Расчетная подвижность трехконтурного пятизвенного шарнирного механизма поворотной платформы

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K = (5 - 1) - (2 - 1) \cdot 3 = 1$$

совпадает с заданной, что подтверждает его работоспособность.

Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов, работающих в пространстве с числом степеней свободы $h = 3$. Рассмотрим задачу создания замкнутых контуров рычажных механизмов со всеми одноподвижными КП без избыточных связей для работы в пространстве с числом степеней свободы $h = 3$.

Как и в предыдущем примере, решение этой задачи выполним на основе установленных ранее многовариантных целочисленных решений целевой функции синтеза (12) в виде разных угловых структурных параметров, обеспечивающих $q = 0$.

Пример 1. С учетом принятых входных параметров структурного синтеза

$$h = 3; W = 2; K = K_1 + K_2 = 2; V = 0;$$

$$H = 1; i_{\max} = K + W = 4$$

модель W-Model (13) принимает вид

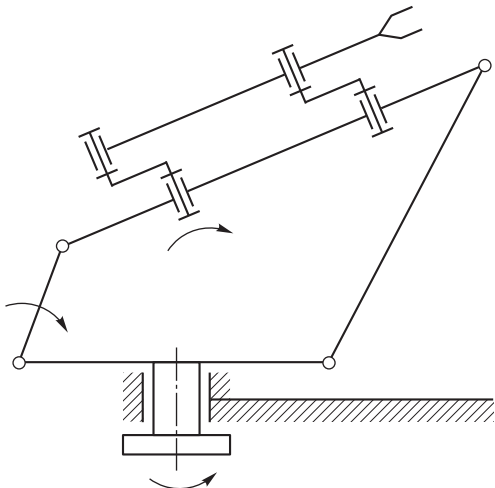


Рис. 3. Схема пространственно-плоского G-робота

$$2n_2 + 3n_3 + 4n_4 = 2(W + hK) \Rightarrow 16;$$

$$n_3 + 2n_4 = 2(K - 1) \Rightarrow 2;$$

$$4\alpha_4 + 5\alpha_5 + 6\alpha_6 + 7\alpha_7 + 8\alpha_8 = 2(W + hK) \Rightarrow 16;$$

$$\Phi(q) = q_{h=3} = \Phi_1(1 - \cos \Psi_k) = 0 \Rightarrow \Psi_k = 0;$$

$$n^0 = (h - 1)K^0 = (3 - 1) \cdot 1 = 2;$$

$$f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 3 \cdot 1 = 3.$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения, используемые для построения обоих контуров с параллельными осями шарниров:

- $n_2 = 6; n_3 = 0; n_4 = 1; \tilde{n} = n_2 + n_4 = 7 \Rightarrow [LA]/V = [n_2 n_3 n_4]/V = [601]/0;$
- $\alpha_4 = 2; \alpha_5 = 0; \alpha_6 = 0; \alpha_7 = 0; \alpha_8 = 1 \Rightarrow [L_{\alpha}] = [4 - 4 - 8];$
- $\Psi_k = 0; n^0 = 2; f_{\Sigma}^0 = 3.$

Схема синтезированного на основе найденных решений пространственно-плоского G-робота, выполненного на уровне изобретений [43], приведена на рис. 3.

Расчетная подвижность такого механизма

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K = (7 - 1) - (3 - 1) \cdot 2 = 2$$

совпадает с заданной, что совместно с результатами исследования экспериментальной модели подтверждает его работоспособность.

Пример 2. С учетом входных параметров структурного синтеза

$$h = 3; W = 1; K = K_1 + K_2 = 2; V = 0;$$

$$H = 1; i_{\max} = K + W = 3$$

модель W-Model (13) принимает вид

$$2n_2 + 3n_3 = 2(W + h_1 + h_2) \Rightarrow 12;$$

$$n_3 = 2(K - 1) - V \Rightarrow 2;$$

$$4\alpha_4 + 5\alpha_5 + 6\alpha_6 = 2(W + hK) \Rightarrow 14;$$

$$\Phi(q) = q_{h=3} + q_{h=2} = \Phi_1(1 - \cos \Psi_k) +$$

$$+ \sin(1 - l/R) = 0;$$

$$n^0 = (h - 1)K^0 = (3 - 1) \cdot 1 = 2;$$

$$f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 3 \cdot 1 = 3.$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $n_2 = 4; n_3 = 2; n_4 = 1; \tilde{n} = n_2 + n_3 = 6 \Rightarrow [LA]/V = [n_2 n_3]/V = [42]/0;$
- $\alpha_4 = 2; \alpha_5 = 0; \alpha_6 = 1 \Rightarrow [L_{\alpha}] = [4 - 4 - 6];$
- $K_1 \Rightarrow \Psi_k = 0; K_2 \Rightarrow e_k = 0.$

Указанные решения использованы для построения плоского первого контура K_1 с параллельными осями шарниров (по решению $\Psi_k = 0$) и с приводом от вращательного двигателя, соединенного в КЦ со вторым контуром K_2 , выполненным пространственным с пересечением осей всех его шарниров в одной точке M (по решению $e_k = 0$) и с установкой в него выходного рабочего органа.

Схема синтезированного на основе полученных решений комбинированного (плоско-сферического) пространственного смесителя, выполненного на уровне изобретений [44], приведена на рис. 4. Механизм отличается простотой конструкции, обусловленная применением простых цилиндрических шарниров с приводом от одного вращательного двигателя.

Расчетная подвижность комбинированного пространственного смесителя

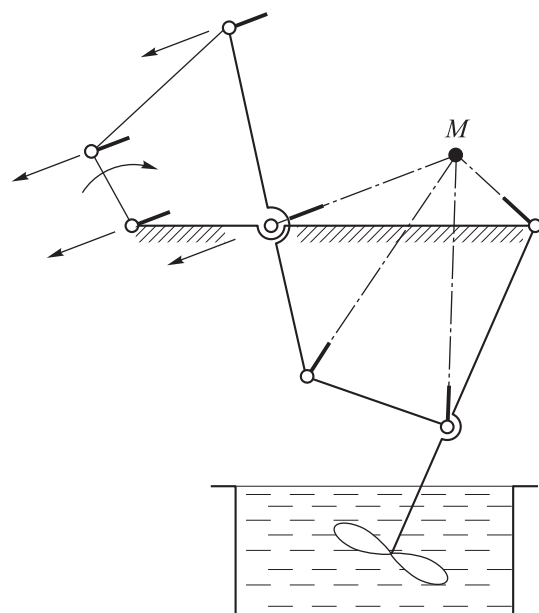


Рис. 4. Схема комбинированного пространственного смесителя

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K = (6 - 1) - (3 - 1) \cdot 2 = 1$$

совпадает с заданной, что подтверждает его работоспособность.

Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов, работающих в пространстве с числом степеней свободы $h = 4$. Рассмотрим задачу создания замкнутых контуров рычажных механизмов со всеми одноподвижными КП без избыточных связей для работы в пространстве с числом степеней свободы $h = 4$.

Решение этой задачи, как и предыдущей, выполним на основе установленных ранее решений целевой функции (12), обеспечивающих $q = 0$.

С учетом входных параметров структурного синтеза

$$h = 4; W = 1; K = K_1 + K_2 = 2; V = 0;$$

$$H = 1; i_{\max} = K + W = 3$$

модель W-Model (13) принимает вид

$$2n_2 + 3n_3 = 2(W + hK) \Rightarrow 18;$$

$$n_3 = 2(K - 1) \Rightarrow 2;$$

$$4\alpha_4 + 5\alpha_5 + 6\alpha_6 = 2(W + hK) \Rightarrow 18;$$

$$\Phi(q) = q_{h=4} = (1 - \sin \delta) = 0 \Rightarrow \delta = 90^\circ;$$

$$n^0 = (h - 1)K^0 = (4 - 1) \cdot 2 = 6;$$

$$f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 4 \cdot 2 = 8.$$

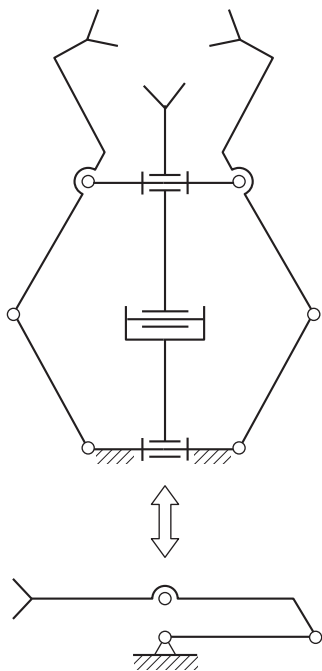


Рис. 5. Схема складывающегося шарнирного манипулятора

Эта модель имеет следующие целочисленные решения, используемые для построения обоих контуров, замыкаемых шарнирами с осями, пересекающимися под углом $\delta = 90^\circ$:

$$\bullet n_2 = 6; n_3 = 2; \tilde{n} = n_2 + n_3 = 8 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow [LA]/V = [n_2 n_3]/V = [62]/0;$$

$$\bullet \alpha_4 = 0; \alpha_5 = 0; \alpha_6 = 3 \Rightarrow [L\alpha] = [6 - 6 - 6];$$

$$\bullet \delta = 90^\circ; n^0 = 6; f_{\Sigma}^0 = 8.$$

Схема синтезированного на основе полученных решений складывающегося шарнирного манипулятора, выполненного на уровне изобретений [46], приведена на рис. 5. Его можно использовать в качестве пространственного схвата манипулятора или линейного транслятора, обеспечивающего смещение выходной платформы параллельно плоскости зафиксированной стойки за счет преобразования движения вращательных пар в линейное перемещение.

Расчетная подвижность синтезированного механизма

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K = (8 - 1) - (4 - 1) \cdot 2 = 1$$

совпадает с заданной, что подтверждает его работоспособность.

Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов, работающих в пространстве с числом степеней свободы $h = 5$. Рассмотрим задачу создания замкнутых контуров рычажных механизмов со всеми одноподвижными КП без избыточных связей для работы в пространстве с числом степеней свободы $h = 5$.

Решение этой задачи, как и предыдущей, выполним на основе установленных ранее решений целевой функции (12), обеспечивающих $q = 0$.

С учетом входных параметров структурного синтеза

$$h = 5; W = 1; K = K_1 + K_2 = 2; V = 0;$$

$$H = 1; i_{\max} = K + W = 3$$

расширенная структурная математическая модель W-Model принимает вид

$$2n_2 + 3n_3 = 2(W + hK) \Rightarrow 22;$$

$$n_3 = 2(K - 1) \Rightarrow 2;$$

$$4\alpha_4 + 5\alpha_5 + 6\alpha_6 + 7\alpha_7 + 8\alpha_8 + 9\alpha_9 + 10\alpha_{10} = 2(W + hK) \Rightarrow 22;$$

$$\Phi(q) = q_{h=5} = (1 - \sin \gamma) = 0 \Rightarrow \gamma = 90^\circ;$$

$$n^0 = (h - 1)K^0 = (5 - 1) \cdot 1 = 4;$$

$$f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 5 \cdot 1 = 5.$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения, используемые для построения обоих контуров с замыканием шарниров с углом скрещивания их осей $\gamma = 90^\circ$:

- $n_2 = 8; n_3 = 2; \tilde{n} = n_2 + n_3 = 10 \Rightarrow$
- $\Rightarrow [LA]/V = [n_2 n_3]/V = [82]/0;$
- $\alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_7 = \alpha_8 = \alpha_8 = 0; \alpha_6 = 2; \alpha_{10} = 1 \Rightarrow$
- $\Rightarrow [L_\alpha] = [6 - 6 - 10];$
- $\gamma = 90^\circ; n^0 = 4, f_\Sigma^0 = 5.$

На основе полученных решений синтезирован пространственный четырехемкостный вибросмеситель с приводом от одного вращательного двигателя (рис. 6), выполненный на уровне изобретений [44].

Многоконтурный десятизвенный шарнирный механизм на рис. 6 имеет следующие отличительные особенности:

- в каждом из замкнутых контуров три оси пересекаются ($e_k = 0$), а три другие оси шарниров параллельны между собой ($\Psi_k = 0$), т. е. это новая комбинация осей;
- при сборке все звенья расположены в одной плоскости, а при работе — в пространстве.

Расчетная подвижность четырехемкостного вибросмесителя

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K = (10 - 1) - (5 - 1) \cdot 2 = 1$$

подтверждена его работоспособной моделью и ее V-вариантами [45].

Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов, работающих в пространстве с числом степеней свободы $h = 6$. Рассмотрим задачу создания замкнутых контуров рычаж-

ных механизмов со всеми одноподвижными КП без избыточных связей для работы в пространстве с числом степеней свободы $h = 6$.

Решение этой задачи, как и предыдущей, выполним на основе установленных ранее решений целевой функции (12), обеспечивающих $q = 0$.

С учетом входных параметров структурного синтеза

$$h = 6; W = 1; K = 1; V = 0; H = 1; i_{\max} = K + W = 2$$

модель W-Model (13) принимает вид

$$2n_2 = 2(W + hK) \Rightarrow 14;$$

$$n_3 = 2(K - 1) \Rightarrow 0;$$

$$4\alpha_4 + 5\alpha_5 + 6\alpha_6 + 7\alpha_7 = 2(W + hK) \Rightarrow 14;$$

$$\Phi(q) = q_{h=6} = \sin(6 + W - \tilde{n}) = 0 \Rightarrow \tilde{n} = 6 + W \Rightarrow 7;$$

$$n^0 = (h - 1)K^0 = (6 - 1) \cdot 1 = 5;$$

$$f_\Sigma^0 = hK^0 = 6 \cdot 1 = 6.$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $n_2 = 7; n_3 = 0; \tilde{n} = n_2 = 7 \Rightarrow$
- $\Rightarrow [LA]/V = [n_2]/V = [7]/[0];$
- $\alpha_4 = 0; \alpha_5 = 0; \alpha_6 = 0; \alpha_7 = 2 \Rightarrow$
- $\Rightarrow [L_\alpha] = [7 - 7];$
- $\tilde{n} = 6 + W \Rightarrow 7;$
- $n^0 = 5; f_\Sigma^0 = 6.$

С учетом найденных решений для синтеза безызыточного одноконтурного рычажного механизма его КП должна быть семизвенной, а к его стойке и ведущему звену надо присоединить базовую структурную группу нулевой по-

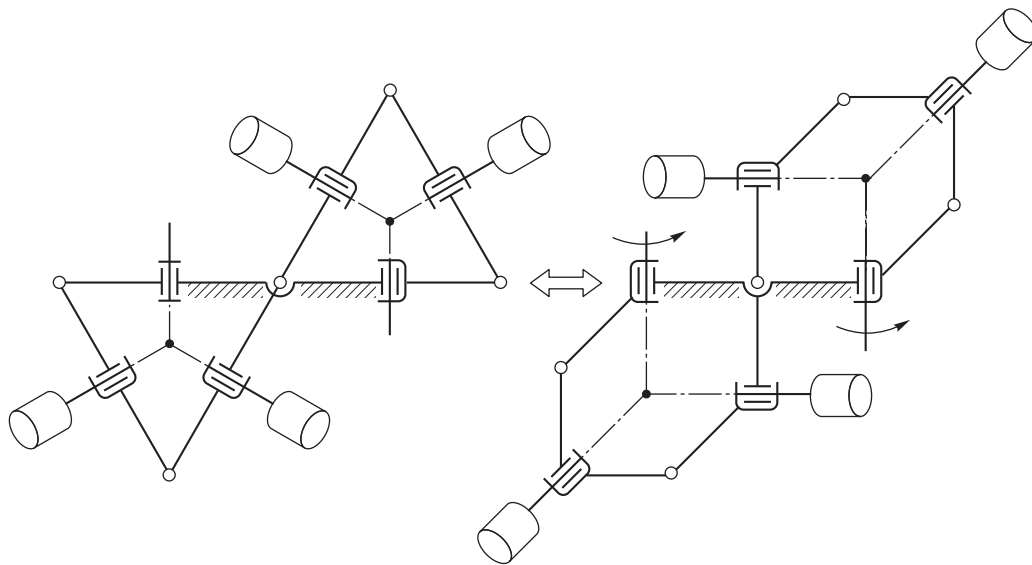


Рис. 6. Схема пространственного четырехемкостного вибросмесителя

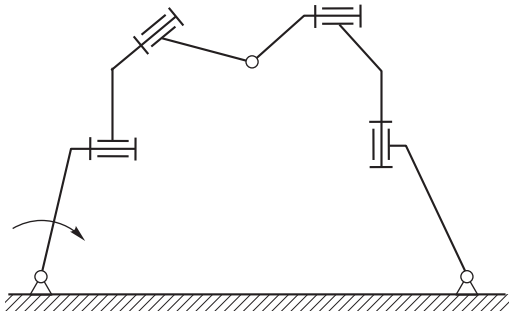


Рис. 7. Схема простейшего пространственного самоустанавливающегося механизма

движности из пяти звеньев ($n^0 = 5$) и шести одноподвижных КП ($f_{\Sigma}^0 = 6$), оси шарниров должны быть непараллельны между собой (и исключать все указанные в целевой функции (12) структурные решения, приводящие к другим степеням подвижности).

Схема синтезированного на основе указанных решений простейшего пространственного самоустанавливающегося механизма приведена на рис. 7. Она позволяет утверждать, что механизм с параметрами $h = 6$, $W = 1$, $K = 1$, $H = 1$, $V = 0$, $q = 0$ должен быть семизвенным.

Структурный синтез многоконтурных неоднородных рычажных механизмов в пространствах с разным числом степеней свободы ($h = \text{var}$). Рассмотрим задачу структурного синтеза многоконтурных самоустанавливающихся механизмов ($K \geq 2$), разные замкнутые контуры КП которых должны быть собраны и работать в пространствах с разным числом степеней свободы, например, $h_1 = 3$ и $h_2 = 2$.

Решение этой задачи, как и предыдущей, выполним на основе установленных ранее решений целевой функции (12), обеспечивающих $q = 0$.

С учетом принятых входных параметров структурного синтеза

$$h = \text{var}; K = 2(h_1 = 3, h_2 = 2); W = 1;$$

$$H = 1; V = 0; i_{\max} = K + W = 3$$

модель W -Model (13) принимает вид

$$2n_2 + 3n_3 = 2(W + h_1 + h_2) \Rightarrow 12;$$

$$n_3 = 2(K - 1) - V \Rightarrow 2;$$

$$4\alpha_4 + 5\alpha_5 = 2(W + h_1 + h_2) \Rightarrow 12;$$

$$\Phi(q) = q_{h=3} + q_{h=2} = \sum \frac{e_k}{\sin \Psi_k} + \sin(1 - l/R)0;$$

$$h_1[n^0 = (h_1 - 1)K^0 = (3 - 1) \cdot 1 = 2;$$

$$f_{\Sigma}^0 = h_1 K^0 = 3 \cdot 1 = 3];$$

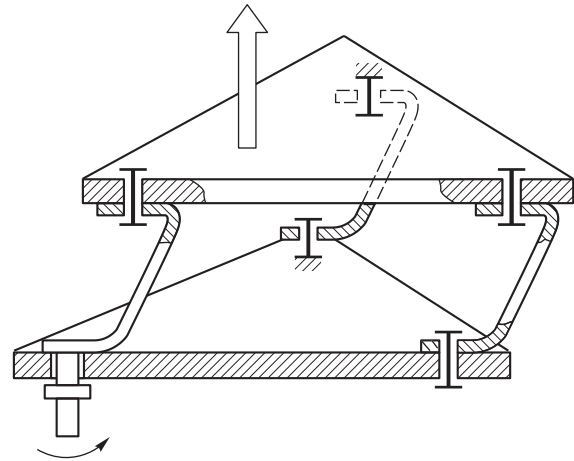


Рис. 8. Схема пространственного параллелограммного манипулятора без особых положений

$$h_2[n^0 = (h_2 - 1)K^0 = (2 - 1) \cdot 1 = 1;$$

$$f_{\Sigma}^0 = h_2 K^0 = 2 \cdot 1 = 2].$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

$$\bullet n_2 = 3; n_3 = 2; \tilde{n} = 3 + 2 = 5 \Rightarrow$$

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

$$\bullet \alpha_4 = 3; \alpha_5 = 0 \Rightarrow [L_{\alpha}] = [4 - 4 - 4];$$

$$\bullet \Phi_1(1 - \cos \Psi_k) = 0 \Rightarrow \Psi_k = 0 \text{ для контура } K_1 (h_1 = 3);$$

$$\bullet \sin(1 - l/R) = 0 \Rightarrow (l = R) \text{ для контура } K_2 (h_2 = 2).$$

Результаты структурного синтеза, полученные на основании указанных целочисленных решений, приведены на рис. 8 в виде выполненного на уровне изобретений [47] двухконтурного пятизвенного пространственного параллелограммного манипулятора без особых положений.

Расчетная подвижность такого манипулятора

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h_1 - 1) - (h_2 - 1) = \\ = (5 - 1) - (3 - 1) - (2 - 1) = 1.$$

Исследования экспериментальной модели этого механизма показали, что подвижность $W = 1$, а также подтвердили полное отсутствие в новом параллелограммном механизме неуправляемых особых положений и изоморфность манипулятора при круговых поступательных перемещениях выходного рабочего органа параллельно оси x и стойке.

Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов с многоподвижными КП. Применяемые в разных областях машиностроения

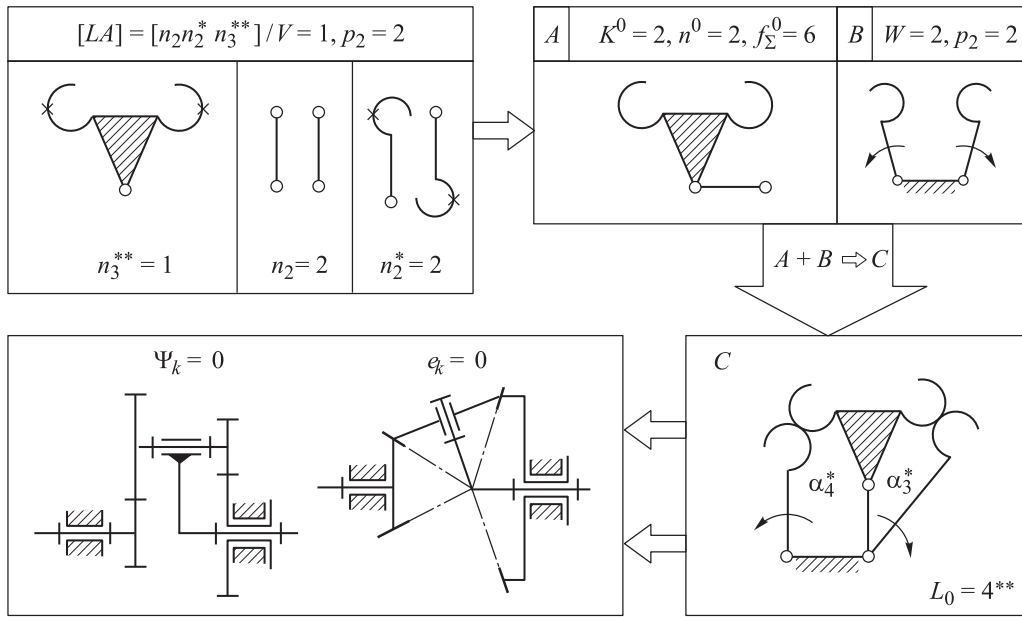


Рис. 9. Схемы самоустанавливающихся дифференциальных зубчатых механизмов с параллельными или пересекающимися осями шарниров

[31] разнообразные рычажные механизмы (кроме одноподвижных КП с $H = 1$) могут содержать и многоподвижные КП ($H \geq 2$), например, цилиндрические и сферические [48], для образования пространственных платформенных манипуляторов, а также зубчатых (планетарных, дифференциальных) и кулачковых механизмов [30] как с простыми шарнирами, так и с многократными.

Рассмотрим задачу создания замкнутых контуров механизмов, собираемых с применением высших КП ($H \geq 2$) без возникновения в них избыточных связей в заданном пространстве с числом степеней свободы $h = 3$ при выполнении целевой функции (12).

С учетом принятых входных параметров структурного синтеза

$$h = 3; W = 2; K = 2; V = 1; 1 \leq H \leq 2; \\ i_{\max} = K + W = 4; p_2 = 2; f = p_2 = 2$$

(где p_2 — число двухподвижных КП) модель W-Model (13) принимает вид

$$2n_2 + 3n_3 + 4n_4 = 2(W + hK - f) - V \Rightarrow 11; \\ n_3 + 2n_4 = 2(K - 1) - V \Rightarrow 1; \\ 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + 4\alpha_4 + 5\alpha_5 = \\ = 2(W + hK - f) - V \Rightarrow 11;$$

$$\Phi(q) = \left[q_{h=3} = \Phi_1 \left(1 - \cos \Psi_k \right) \left(\frac{e_k}{\sin \Psi_k} \right) \right] = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \Psi_k = 0 \text{ или } e_k = 0;$$

$$n^0 = (h - 1)K^0 - f = (3 - 1) \cdot 2 - 2 = 2;$$

$$f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 3 \cdot 2 = 6.$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $n_2 = 4; n_3 = 1; \tilde{n} = n_2 + n_3 = 5 \Rightarrow$
- $\Rightarrow [LA]/V, p_2 = [n_2 n_2^* n_3^{**}]/V = 1, p_2 = 2;$
- $\alpha_2 = 0; \alpha_3 = 1; \alpha_4 = 2; \alpha_5 = 0 \Rightarrow$
- $\Rightarrow [L_{\alpha}] = [3^* - 4^* - 4^{**}];$
- $\Psi_k = 0$ или $e_k = 0;$
- $n^0 = 2; f_{\Sigma}^0 = 6.$

На основе этих решений по показанному на рис. 9 алгоритму структурного синтеза синтезированы две схемы самоустанавливающихся зубчатых механизмов с параллельными ($\Psi_k = 0$) или пересекающимися ($e_k = 0$) осями шарниров.

Расчетная подвижность обоих зубчатых механизмов

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K + p_2 = \\ = (5 - 1) - (3 - 1) \cdot 2 + 2 = 2$$

совпадает с заданной, что подтверждает их работоспособность.

Выводы

1. Введение понятия угловых структурных параметров рычажных звеньев, определяющих взаиморасположение параллельных, пересекающихся и скрещивающихся осей их шарниров, позволяет:

• найти полный ряд конечных значений их тригонометрических функций

$$\Phi(\sin \Psi, \cos \Psi) = 0; 0, 5; 1, 0,$$

достигаемых при $\Psi = 0, 30, 60$ и 90° и пригодных для структурного синтеза самоустанавливающихся механизмов;

• построить расширенную структурную математическую модель и на конкретных примерах показать эффективность ее применения для создания на уровне изобретений [42–47] разнообразных самоустанавливающихся рычажных механизмов при работе в полном диапазоне разных h -пространств;

• подтвердить работоспособность синтезированных самоустанавливающихся рычажных механизмов с параллельными, пересекающимися и скрещивающимися осями цилиндрических шарниров проверочным расчетом подвижности по предложенной универсальной структурной формуле;

• с учетом теоретических результатов направленного структурного синтеза разнообразных рычажных механизмов с заданной целевой функцией $\Phi(q) = 0$, подтвержденных практическими результатами в виде новых изобретений [42–47] и их экспериментальными исследованиями на действующих моделях, предлагается исключить из ТММ ошибочное понятие «парадоксальный механизм» (введенное потому, что для вполне работоспособного механизма кому-то не удалось правильно рассчитать его действительную подвижность $W \geq 1$).

2. Предлагаемая новая универсальная структурная формула для определения подвижности может быть применена для структурного синтеза и анализа любых самоустанавливающихся механизмов во всем возможном диапазоне чисел степени свободы h . Эта формула позволяет:

• выделить в качестве основных характеристик строения следующие структурные параметры для создания механизмов без избыточных связей:

– общее число звеньев кинематической цепи ($\tilde{n} \geq 3$);

– число образуемых этими звеньями независимых замкнутых контуров при сборке в заданном h -пространстве;

– приведенное число МКШ для сборки всей K -цепи;

– суммарную дополнительную подвижность f высших КП в полном диапазоне ($0 \leq f \leq h - 2$);

• установить необходимую аналитическую взаимосвязь между параметром подвижности h (числом независимых движений, требуемых для сборки замкнутого контура без избыточных связей), относительной подвижностью H замыкающих данный контур КП и относительной подвижностью W звеньев K -контурной \tilde{n} -звенной КЦ;

• получить из универсального выражения для подвижности W общую формулу для КЦ любого типа

$$\tilde{n} = [(W + 1) + \sum (h - 1)K_h] - f,$$

позволяющую при структурном синтезе точно рассчитать необходимое число звеньев цепи, в которой все замкнутые контуры синтезируемого механизма собраны без избыточных связей.

3. Приведенные практические результаты направленного структурного синтеза показали возможность эффективного применения предлагаемой общей теории и расширенной структурной математической модели для создания на уровне изобретений разнообразных самоустанавливающихся рычажных, зубчатых и кулачковых механизмов.

Литература

- [1] Артоболевский И.И. *Механизмы в современной технике*. Москва, ЛЕНАНД, 2019. 500 с.
- [2] Глазунов В.А., ред. *Новые механизмы в современной робототехнике*. Москва, Техносфера, 2018. 316 с.
- [3] Мудров А.Г., Мудрова А.А., Сахапов Р.Л. *Пространственные аппараты с мешалкой и смесители*. Москва, КноРус, 2021. 190 с.
- [4] Марковец К.И., Полотебнов В.О. Синтез механизмов транспортирования материалов с прямолинейным участком траектории движения зубчатой рейки. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, 2018, т. 39, № 1, с. 117–121.
- [5] 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. 85–87.

- [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. 24–43, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-24-43>
- [7] Куц Е.Н. Структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложным двухшарнирным звеном. *Современное машиностроение. Наука и образование. Мат. 8-й Межд. науч.-практ. конф.* Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2019, с. 201–214.
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms using the universal structural table with all possible link assortments. IFToMM WC-2019, *Springer*, 2019, vol. 73, pp. 1517–1526, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [9] Sun W., Kong J., Sun L. et al. A joint–joint matrix representation of planar kinematic chains with multiple joints and isomorphism identification. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [10] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm of planar simple joint kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [11] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47 no. 1, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>
- [12] Chen L.M. Digital and discrete geometry. *Springer*, 2014. 322 p.
- [13] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2012. 857 p.
- [14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000619>
- [15] 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] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1030–1050, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_56
- [17] Peisakh E.E. An algorithmic description of the structural synthesis of planar Assur group. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2007, vol. 36, no. 6, pp. 505–514, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618807060015>
- [18] Vicker J.J., Pennock G.R., Shingley J.E. *Theory of mechanisms*. Oxford University Press, 2017. 950 p.
- [19] Ceccarelli M. Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. *Springer*, 2004. 312 p.
- [20] Kong X., Gosselin C.M. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 268 p.
- [21] Gogu G. Structural synthesis of parallel robots. Part 1: Methodology. *Springer*, 2008. 706 p.
- [22] Tsai L.W. *Robot Analysis. The mechanics of serial and parallel manipulators*. Wiley, 1999. 520 p.
- [23] Aefattani R., Luck C.A. A lamina-emergent frustum using a bistable collapsible compliant mechanism. *J. Mech. Des.*, 2018, vol. 140, no. 12, art. 125001, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037621>
- [24] Peisakh E.E. Technique of automated structural synthesis of planar jointed mechanisms. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2009, vol. 38, no. 1, pp. 62–70, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618809010129>
- [25] Ding H., Hou F., Kecskemethy A. et al. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mech. Mach. Theory*, 2011, vol. 46, no. 11, pp. 1588–1600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012>
- [26] 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
- [27] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open, closed loop and mixed mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>

- [28] Кожевников С.Н. *Основания структурного синтеза механизмов*. Киев, Наукова Думка, 1979. 232 с.
- [29] Умнов Н.В., Сильвестров Э.Е. Использование методов гомотопии при синтезе механизмов. *Ст. док. межд. конф. по теории механизмов и машин*. Краснодар, Кубанский ГТУ, 2006, с. 47–48.
- [30] Тимофеев Г.А., ред. *Теория механизмов и машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 566 с.
- [31] Крайнев А.Ф. *Механика машин*. Москва, Машиностроение, 2001. 904 с.
- [32] Решетов Л.Н. *Самоустанавливающиеся механизмы*. Москва, Машиностроение, 1991. 288 с.
- [33] 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
- [34] Пожбелко В.И. Универсальный алгоритм синтеза структурных схем сложных одноподвижных и многоподвижных рычажных механизмов. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2022, № 11, с. 91–100.
- [35] Вышнеградский И.А. *Публичные популярные лекции о машинах. О теории механизмов без формул*. Москва, Либриком, 2015. 448 с.
- [36] Racila L., Dahah M. Bricard mechanism used a translator. *12th IFToMM World Congress*. Besanson, 2007, pp. 337–341.
- [37] Пожбелко В.И. *Двухподвижная разъемная вращательная кинематическая пара*. Патент РФ 2755441. Заявл. 16.03.2021, опубл. 16.09.2021.
- [38] Пожбелко В.И. *Многokrатный компактный шарнир передачи*. Патент РФ 2543135. Заявл. 14.02.2013, опубл. 27.02.2015.
- [39] Пожбелко В.И. Динамическая структура механизмов. *Мат. второй межд. конф. Механизмы переменной структуры и вибрационные машины*. Бишкек, ИМАШ НАН КР, 1995, с. 69–73.
- [40] Пожбелко В.И. *Инерционно-импульсные приводы машин с динамическими связями*. Москва, Машиностроение, 1989. 132 с.
- [41] Пожбелко В.И. *Теория и методы создания инерционно-импульсных систем с заданными свойствами*. Дисс. ... д-ра техн. наук. Казань, КГУ, 1989. 220 с.
- [42] Пожбелко В.И. *Шарнирный виброударный механизм*. Патент РФ 2783900. Заявл. 27.07.2022, опубл. 21.11.2022.
- [43] Пожбелко В.И. *Пространственный G-робот*. Патент РФ 2758392. Заявл. 28.10.2021, опубл. 16.03.2022.
- [44] Пожбелко В.И. *Шарнирный механизм изменяемой структуры*. Патент РФ 2765386. Заявл. 28.01.2022, опубл. 12.05.2021.
- [45] Пожбелко В.И. *Пространственный манипулятор*. Патент РФ 2758377. Заявл. 24.02.2021, опубл. 28.10.2021.
- [46] Пожбелко В.И. *Шарнирный механизм*. Патент РФ 2753064. Заявл. 24.02.2021, опубл. 11.08.2021.
- [47] Пожбелко В.И. *Пространственный параллелограммный механизм манипулятора*. Патент РФ 2784764. Заявл. 07.04.2022, опубл. 29.11.2022.
- [48] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A. et al. *Advanced theory of mechanisms and machines*. Springer, 2000. 394 p.

References

- [1] Artobolevskiy I.I. *Mekhanizmy v sovremennoy tekhnike* [Mechanisms in modern technics]. Moscow, LENAND Publ., 2019. 500 p. (In Russ.).
- [2] Glazunov V.A., ed. *Novye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018. 316 p. (In Russ.).
- [3] Mudrov A.G., Mudrova A.A., Sakhapov R.L. *Prostranstvennyye apparaty s meshalkoy i smesiteli* [Spatial apparatus with agitators and mixers]. Moscow, KnoRus Publ., 2021. 190 p. (In Russ.).

- [4] Markovets K.I., Polotebnov V.O. Synthesis of mechanisms of material handling mechanism with a toothed bar straight line section of the movement. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti* [The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry], 2018, vol. 39, no. 1, pp. 117–121. (In Russ.).
- [5] 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. 85–87. (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. 24–43, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-24-43> (in Russ.).
- [7] Kuts E.N. [Modern mechanical engineering: science and education structural synthesis of multiloop linkage mechanisms with multiple joints and the most complex binary link]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Mat. 8-oy Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Modern Mechanical Engineering: Science and Education. Proc. 8th Sci.-Pract. Conf.]. Sankt-Petersburg, Politekh-Press Publ., 2019, pp. 201–214. (In Russ.).
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms using the universal structural table with all possible link assortments. IFToMM WC-2019, *Springer*, 2019, vol. 73, pp. 1517–1526, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [9] Sun W., Kong J., Sun L. et al. A joint–joint matrix representation of planar kinematic chains with multiple joints and isomorphism identification. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [10] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm of planar simple joint kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [11] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47 no. 1, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>
- [12] Chen L.M. Digital and discrete geometry. *Springer*, 2014. 322 p.
- [13] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2012. 857 p.
- [14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000619>
- [15] 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] Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1030–1050, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_56
- [17] Peisakh E.E. An algorithmic description of the structural synthesis of planar Assur group. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2007, vol. 36, no. 6, pp. 505–514, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618807060015>
- [18] Vicker J.J., Pennock G.R., Shingley J.E. *Theory of mechanisms*. Oxford University Press, 2017. 950 p.
- [19] Ceccarelli M. Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. *Springer*, 2004. 312 p.
- [20] Kong X., Gosselin C.M. Type synthesis of parallel mechanisms. *Springer*, 2007. 268 p.
- [21] Gogu G. Structural synthesis of parallel robots. Part 1: Methodology. *Springer*, 2008. 706 p.
- [22] Tsai L.W. *Robot Analysis. The mechanics of serial and parallel manipulators*. Wiley, 1999. 520 p.
- [23] Aefattani R., Luck C.A. A lamina-emergent frustum using a bistable collapsible compliant mechanism. *J. Mech. Des.*, 2018, vol. 140, no. 12, art. 125001, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037621>
- [24] Peisakh E.E. Technique of automated structural synthesis of planar jointed mechanisms. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2009, vol. 38, no. 1, pp. 62–70, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618809010129>
- [25] Ding H., Hou F., Kecskemethy A. et al. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. *Mech.*

- Mach. Theory*, 2011, vol. 46, no. 11, pp. 1588–1600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.012>
- [26] 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
- [27] Pozhbelko V. A unified structure theory of multibody open, closed loop and mixed mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [28] Kozhevnikov S.N. *Osnovaniya strukturnogo sinteza mekhanizmov* [Fundamentals of structural synthesis of mechanisms.]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).
- [29] Umnov N.V., Silvestrov E.E. [Using homotopy methods for mechanism synthesis.]. *St. dok. mezhd. konf. po teorii mekhanizmov i mashin* [Proc. Int. Conf. on Mechanisms and Machine Theory]. Krasnodar, Kubanskiy GTU Publ., 2006, pp. 47–48. (In Russ.).
- [30] Timofeev G.A., ed. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Mechanisms and machines theory]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 566 p. (In Russ.).
- [31] Kraynev A.F. *Mekhanika mashin* [Machine mechanics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 904 p. (In Russ.).
- [32] Reshetov L.N. *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy* [Self-aligning mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 288 p. (In Russ.).
- [33] 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.).
- [34] 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.).
- [35] Vyshnegradskiy I.A. *Publichnye populyarnye leksii o mashinakh. O teorii mekhanizmov bez formul* [Public popular lectures on machines. On mechanisms theory without formulas]. Moscow, Librikom Publ., 2015. 448 p. (In Russ.).
- [36] Racila L., Dahah M. Bricard mechanism used a translator. *12th IFToMM World Congress*. Besanson, 2007, pp. 337–341.
- [37] Pozhbelko V.I. *Dvukhpodvizhnaya razemnaya vrashchatelnaya kinematicheskaya para* [Two-degrees-of-freedom rotational kinematic pair]. Patent RU 2755441. Appl. 16.03.2021, publ. 16.09.2021. (In Russ.).
- [38] Pozhbelko V.I. *Mnogokratnyy kompaktnyy sharnir peredachi* [Multiple articulated joint of gear]. Patent RU 2543135. Appl. 14.02.2013, publ. 27.02.2015. (In Russ.).
- [39] Pozhbelko V.I. [Dynamic structure of mechanisms]. *Mat. vtoroy mezhd. konf. Mekhanizmy peremennoy struktury i vibratsionnye mashiny* [Proc. Second Int. Conf. on Mechanisms of Variable Structure and Vibrating Machines]. Bishkek, IMASH NAN KR, 1995, pp. 69–73. (In Russ.).
- [40] Pozhbelko V.I. *Inertsionno-impulsnoe privody mashin s dinamiceskimi svyazyami* [Inertial-pulse drive of machines with dynamic linkage]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 132 p. (In Russ.).
- [41] Pozhbelko V.I. *Teoriya i metody sozdaniya inertsionno-impulsnykh sistem s zadannymi svoystvami*. Diss. D-ra. tekhn. nauk [Inertial-pulse drive of machines with dynamic coupling. Doc. tech. sci. diss.]. Kazan, KGU Publ., 1989. 220 p. (In Russ.).
- [42] Pozhbelko V.I. *Sharnirnyy vibroudarnyy mekhanizm* [Hinged vibro-impact mechanism]. Patent RU 2783900. Appl. 27.07.2022, publ. 21.11.2022. (In Russ.).
- [43] Pozhbelko V.I. *Prostranstvennyy G-robot* [Spatial G-robot]. Patent RU 2758392. Appl. 28.10.2021, publ. 16.03.2022. (In Russ.).
- [44] Pozhbelko V.I. *Sharnirnyy mekhanizm izmenyaemoy struktury* [Articulated mechanism of variable structure]. Patent RU 2765386. Appl. 28.01.2022, publ. 12.05.2021. (In Russ.).
- [45] Pozhbelko V.I. *Prostranstvennyy manipulyator* [Spatial manipulator]. Patent RU 2758377. Appl. 24.02.2021, publ. 28.10.2021. (In Russ.).
- [46] Pozhbelko V.I. *Sharnirnyy mekhanizm* [Pivot mechanism]. Patent RU 2753064. Appl. 24.02.2021, publ. 11.08.2021. (In Russ.).

- [47] Pozhbelko V.I. *Prostranstvennyy parallelogrammnyy mekhanizm manipulyatora* [Spatial parallelogram mechanism of manipulator]. Patent RU 2784764. Appl. 07.04.2022, publ. 29.11.2022. (In Russ.).
- [48] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A. et al. *Advanced theory of mechanisms and machines*. Springer, 2000. 394 p.

Статья поступила в редакцию 28.03.2023

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

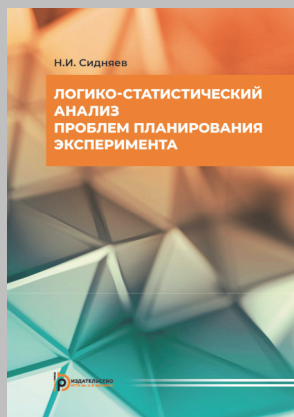
POZHBELKO Vladimir Ivanovich — Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Doctor of Science (Eng.), Professor. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пожбелко В.И. Общая теория структурного синтеза нормальных и парадоксальных самоустанавливающихся рычажных механизмов и практика их создания в машиностроении для работы в разных h -пространствах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 6, с. 12–29, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-12-29

Please cite this article in English as:

Pozhbelko V.I. An general theory of structural synthesis of normal and paradoxical self-aligning lever mechanisms and the practice of their creation in mechanical engineering for operation in different h -spaces. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 6, pp. 12–29, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-12-29



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие Н.И. Сидняева**

«Логико-статистический анализ проблем планирования эксперимента»

Показано, как формируется математическая теория эксперимента с использованием математической статистики. Введено понятие сложной — плохо организованной системы. Рассмотрено несколько типов математических моделей. Изложены основные концепции математической статистики: рандомизация условий проведения эксперимента, стратегия последовательного эксперимента и др. Приведены методы статистического исследования при изучении рассеяния, а также методы планирования эксперимента при оптимальном использовании пространства независимых переменных. Рассмотрена логика развития идей математической статистики.

Для студентов 4–6 курсов инженерных специальностей технических университетов, а также аналитиков и экспериментаторов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

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