

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.01 (075.8)

doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-3-15

Универсальный L_0 -алгоритм структурного синтеза и анализа семейства новых платформенных манипуляторов параллельной структуры

В.И. Пожбелко

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

Universal L_0 -algorithm of structural synthesis and analysis of the family of the new platform parallel-structure manipulators

V.I. Pozhbelko

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

Структурный синтез разнообразных многоконтурных и многозвенных механизмов параллельной структуры является одной из наиболее сложных задач как теории механизмов и машин, так и машиностроения для разных областей робототехники. Рассмотрен направленный структурный синтез и анализ на основе универсального L_0 -алгоритма. Приведены примеры его применения для создания механизмов относительного манипулирования для групповых операций, многоплатформенных манипуляторов, антипараллелограммных и параллелограммных манипуляторов-триподов без особых положений и с увеличенным до 12 числом управляемых степеней свободы. Общим свойством всего семейства созданных на уровне изобретений шарнирных платформенных манипуляторов является раздельная кинематика движений и отсутствие вредных избыточных связей во всех замкнутых контурах плоских и пространственных синтезированных механизмах, работоспособность и эффективность которых подтверждена как экспериментально, так и теоретически по новой универсальной структурной формуле подвижности.

Ключевые слова: структурный синтез, алгоритм синтеза, избыточные связи, платформенные манипуляторы, изобретения, параллельная структура, анализ подвижности

Structural synthesis of various multi-circuit and multi-link mechanisms in a parallel structure appears to be one of the most complicated problems both in the theory of mechanisms and machines, and in the mechanical engineering for various robotics areas. The paper considers directed structural synthesis and analysis based on the universal L_0 -algorithm. Examples of its application are provided to create the relative manipulation mechanisms for group operations, multi-platform manipulators, anti-parallelogram and parallelogram tripod manipulators without special provisions and with the increased number of controlled degrees of freedom up to 12. Common properties of the entire family of articulated platform

manipulators created at the invention level include the separate motion kinematics and the absence of harmful redundant connections in all the closed loops of flat and spatial synthesized mechanisms. Their performance and effectiveness were confirmed both experimentally and theoretically according to the new universal structural mobility formula.

Keywords: structural synthesis, synthesis algorithm, redundant connections, platform manipulators, inventions, parallel structure, mobility analysis

Структурный синтез разнообразных [1–22] плоских и пространственных, многоконтурных и многозвенных механизмов параллельной структуры [20] с заданным числом степеней свободы (подвижностью $W \geq 1$) [23–43] является одной из самых сложных задач как в теории механизмов и машин [18, 30, 43], так и в практике машиностроения для разных областей робототехники [2, 19, 22, 31].

В основополагающей научной монографии профессора С.Н. Кожевникова с обзором разных методов структурного синтеза [28] на основе теоретических и экспериментальных исследований разных машин впервые поставлена задача оптимального структурного синтеза механизмов, т. е. механизмов без вредных избыточных связей (числом $q = 0$).

Такие механизмы в научной монографии Л.Н. Решетова [32] названы самоустанавливающимися и наиболее перспективными для машиностроения благодаря простоте изготовления и сборки замкнутых контуров, снижению трения и износа кинематических пар (КП) во всей замкнутой кинематической цепи (КЦ) механизма.

В других современных научных работах [26, 34, 42], опубликованных в 2019–2023 гг., приведены новые подходы к решению проблемы структурного синтеза сложных самоустанавливающихся механизмов на основе теории графов и метода построения полных атласов всех возможных новых в теории механизмов и машин типов ортогональных структурных схем.

В работах профессора Г.А. Тимофеева [30] предложен оригинальный подход к решению проблемы создания самоустанавливающихся механизмов на основе выявления вредных избыточных связей в каждом из замкнутых контуров анализируемого сложного многоконтурного механизма ($q \neq 0$) и определения рациональных путей их исключения ($q \Rightarrow 0$) на основе рассмотрения матриц подвижностей для каждого из замкнутых контуров КЦ.

Другие подходы к решению задачи структурного синтеза сложных многоконтурных са-

моустанавливающихся механизмов, построенные на основе различных переборов и сочетаний групп Ассура (согласно полному электронному атласу профессора Э.Е. Пейсаха [17], их число составляет сотни тысяч схем) или на базе решений различных структурных математических моделей (от первых уравнений профессора М. Грюблера [28] до более современных моделей [5, 6, 27, 33]), труднее реализовать из-за отсутствия рационального алгоритма синтеза многоконтурных структурных схем без избыточных связей.

Цель статьи — разработка универсального L_0 -алгоритма структурного синтеза и создание на его основе новых платформенных плоских, комбинированных с изменяемой конфигурацией и пространственных самоустанавливающихся платформенных манипуляторов параллельной структуры [36–41], а также обобщенный анализ их работоспособности и достоверной подвижности на основе экспериментальных исследований и предлагаемой для любых возможных механизмов универсальной структурной формулы расчета.

Основные понятия, структурные уравнения и новый принцип образования механизмов.

Согласно единой теории структуры механических систем [6, 26, 27, 42], для структурного синтеза самоустанавливающихся механизмов введены следующие целочисленные соотношения и аналитические зависимости входных и выходных структурных параметров, определяющие строение замкнутых контуров механизма и отсутствие ($q = 0$) или возникновение в замкнутой КЦ ($q > 0$) избыточных связей.

Расчетный ассортимент (набор) много- (с числом шарниров $i \geq 3$) и двухшарнирных ($i = 2$) звеньев базовой КЦ (БКЦ) для синтеза механизма без избыточных связей

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

где n_i — число i -шарнирных звеньев БКЦ; K — число независимых (внутренних) замкнутых контуров \tilde{n} -звенной БКЦ (\tilde{n} — общее число звеньев БКЦ).

Расчетный ассортимент (набор) замкнутых контуров БКЦ

$$\begin{aligned} [L_\alpha] &= [\alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \dots - \alpha_{k_{\max}}] = \\ &= [4 - 5 - 6 - \dots - k_{\max}]; \quad (2) \\ \sum \alpha_k &= K + 1, \end{aligned}$$

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

Приведенное число многократных шарниров V с диапазоном

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

где V_{\max} — максимальное значение приведенного числа V .

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

$$3 \leq L_0 \leq [(W + 2K + 1) - V]. \quad (4)$$

При синтезе механизма этот диапазон позволяет охватить семейства как с простыми шарнирами ($V = 0$), так и с многократными ($V \geq 1$) [7, 26, 27].

Диапазон задаваемого числа степеней свободы пространства h , где должен работать проектируемый механизм без избыточных связей,

$$1 \leq h \leq 6 \quad (5)$$

включает в себя следующие возможные дискретные значения:

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

Число независимых замкнутых контуров $K = \sum K_h$ (где K_h — число замкнутых контуров КЦ в заданном h -пространстве), зависящее от набора мног шарнирных звеньев ($i \geq 3$) и приведенного числа многократных шарниров V , точно рассчитываемое по следующей универсальной формуле [27] (т. е. независимо от того, в каком h -пространстве работает механизм) [6]:

$$K = 1 + \frac{1}{2} [V + n_3 + 2n_4 + 3n_5 + \dots + (i_{\max} - 2)n_{i_{\max}}]. \quad (7)$$

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 следующим образом:

$$\begin{aligned} H_{\max} &= h - 1; \tilde{n}_{\min} = h + W - f; \\ i_{\max} &= K + W. \end{aligned} \quad (8)$$

где f — суммарная дополнительная подвижность низших и высших КП.

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

$$\begin{aligned} W &= (\tilde{n} - 1) - \sum_{h=1}^{h=6} (h - 1)K_h + f; \\ f &= \sum_{H=2}^{H=h-1} (H - 1)p_H, \end{aligned} \quad (9)$$

где p_H — число КП повышенной подвижности ($H \geq 2$);

Целевая функция для оптимального структурного синтеза самоустанавливающегося механизмов, содержащих замкнутые контуры во всех возможных h -пространствах, определяется как

$$\Phi(q) = (q_{h=1} + q_{h=2} + q_{h=3} + q_{h=4} + q_{h=5} + q_{h=6}) = 0, \quad (10)$$

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

Предлагаемая расширенная структурная математическая модель самоустанавливающегося механизмов (V-Model), составленная на основе обобщения аналитических зависимостей (3)–(10), имеет вид

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{i_{\max}} i n_i = 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V; \\ \sum_{i=1}^{i_{\max}} (i - 2) n_i = 2(K - 1) - V; \\ \sum_{k=3}^{k_{\max}} k \alpha_k = 2 \left(W + \sum_{h=2}^{h=6} h K_h - f \right) - V; \\ \Phi(q) = \sum_{h=1}^{h=6} q_h = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Молекулярный принцип образования КЦ механизмов заключается в представлении его структурного синтеза и анализа как «единой молекулы» с L_0 -сторонним внешним замкнутым контуром, внутри которого расположены связанные между собой внутренние независимые замкнутые контуры в количестве K («атомы молекулы»). Стороны последних — рычажные звенья из расчетного набора $[LA]$ — образуют при сборке в пределах L_0 расчетный набор $[L_\alpha]$ всех $(K + 1)$ -х замкнутых контуров без избыточных связей для создания K -цепи синтезируемого механизма.

Универсальный L_0 -алгоритм структурного синтеза — многоэтапный алгоритм синтеза структурных схем [34] — предназначен для построения замкнутых K -контурных КЦ (K -цепей) разнообразных механизмов без избыточных связей ($q=0$) с учетом применения в их замкнутых контурах только одноподвижных КП ($f=0$), а также многоподвижных КП с $f \geq 1$ и многократных шарниров с $V \geq 1$.

Предлагаемый алгоритм включает в себя следующие этапы:

- определение целочисленных решений структурных уравнений V -Model (11) в виде расчетного набора всех звеньев КЦ $[LA]$ по формуле (1) и расчетного набора всех замкнутых контуров КЦ $[L_\alpha]$ по выражению (2);

- построение внешнего замкнутого контура K -цепи (образование «оболочки молекулы») в виде шарнирного многозвенника с числом сторон L_0 из расчетного набора всех замкнутых

контуров КЦ $[L_\alpha] = [4-5-\dots-L_0]$, где наибольший внешний контур L_0 принят базовым для структурного синтеза;

- построение из всех звеньев расчетного набора $[LA]$ внутри внешнего контура L_0 всех независимых внутренних замкнутых контуров с точным соотношением числа их сторон, определяемым расчетным набором $[L_\alpha]$ (как взаимосвязанных «атомов» внутри этой «молекулы»);

- выбор в синтезированной K -цепи стойки, входных и выходных звеньев для образования исполнительного самоустанавливающегося механизма (без избыточных связей во всех $(K+1)$ -х замкнутых контурах).

Структурный синтез плоского двухплатформенного механизма относительного манипулирования. Рассмотрим задачу создания двухплатформенного механизма относительного манипулирования совместно функционирующего

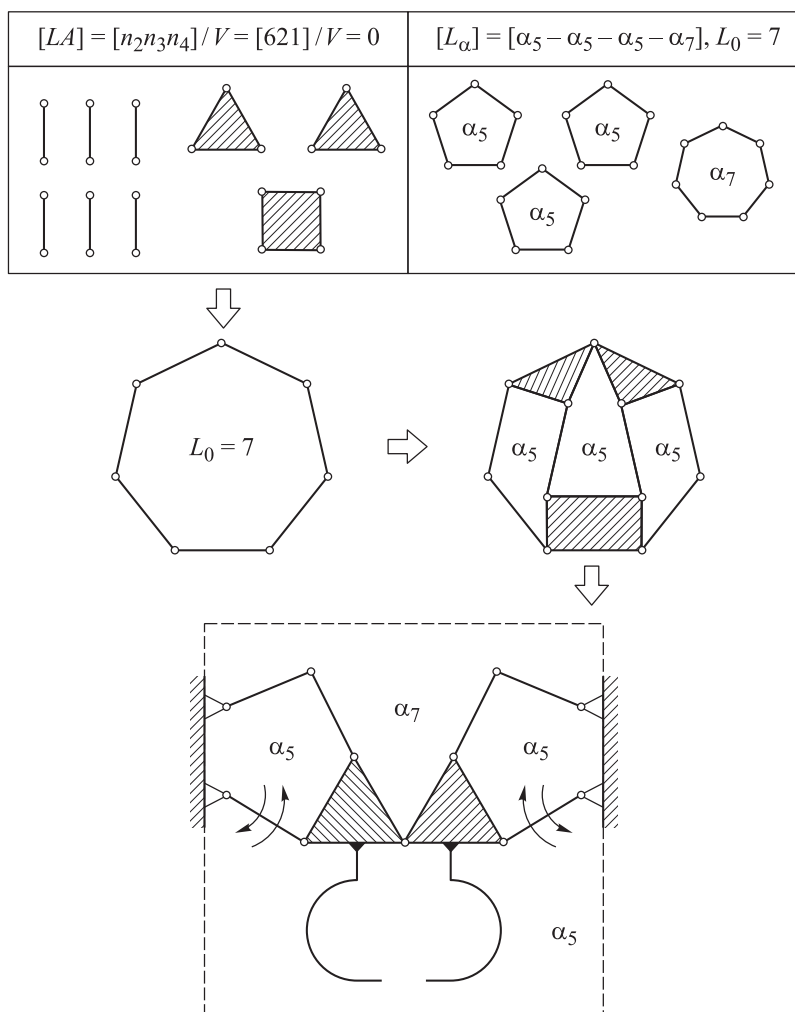


Рис. 1. Схема поэтапного структурного синтеза двухплатформенного механизма относительного манипулирования

щими рабочими органами и ее решение на основе синтеза замкнутой КЦ рычажных звеньев с параллельными осями, образующими замкнутые контуры без избыточных связей с числом степеней свободы пространства $h = 3$.

С учетом заданных входных параметров

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

V-Model (11) принимает вид

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

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $[LA] = [n_2 n_3 n_4] / V = [621] / V = 0 \Rightarrow \tilde{n} = 9$;
- $[L\alpha] = [\alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_7]$.

Схема синтезированного на основе расчетных наборов $[LA]$ и $[L\alpha]$ (согласно универсальному L_0 -алгоритму) двухплатформенного механизма относительного манипулирования, выполненного на уровне изобретений [36], приведена на рис. 1.

Полученная по формуле (9) (расчетная) подвижность

$$W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K + f = (9 - 1) - 3(3 - 1) = 2$$

совпадает с заданной, что подтверждает работоспособность такого механизма, и его можно использовать, например, в качестве привода грейфера.

Результаты экспериментального исследования модели двухплатформенного механизма относительного манипулирования подтвердили простоту конструкции и сборку всех его замкнутых контуров без избыточных связей. Выполнение механизма привода двухчелюстного грейфера с подвижностью $W = 2$ позволяет регулировать захват челюстями материала и траекторию его переноса.

Структурный синтез пространственного манипулятора изменяемой конфигурации для групповых операций. Рассмотрим задачу создания пространственного манипулятора с приводом от одного двигателя ($W = 1$) нескольких согласованно функционирующих рабочих органов (для краткости названного W -манипулятором), выполняемого на основе синтеза самоустанавливающегося рычажного механизма ($q = 0$) со скрещивающимися осями вращательных шарниров ($H = 1$), у которого

все замкнутые контуры собираются и работают в пространстве с числом степеней свободы $h = 5$.

С учетом заданных входных параметров

$$W = 1; h = 5; K = 2; V = 2; H = 1; f = 0$$

V-Model (11) принимает вид

$$\begin{cases} \sum in_i = [2(W + hK) - V] \Rightarrow 20; \\ \sum (i - 2)n_i = 2(K - 1) - V \Rightarrow 0; \\ \sum k\alpha_k = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 20. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $[LA] = [n_2 n_3] / V = [10, 0] / V = 2 \Rightarrow \tilde{n} = 10$;
- $[L\alpha] = [\alpha_6 - \alpha_6 - \alpha_8]$.

Схема синтезированного на основе расчетных наборов $[LA]$ и $[L\alpha]$ (путем сборки из десяти простых двухшарнирных звеньев замкнутой двухконтурной КЦ с применением простых и двух двойных цилиндрических шарниров) и выполненного на уровне изобретений [37] W -манипулятора с тремя разными рабочими органами приведена на рис. 2.

Его расчетная подвижность

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

что подтверждает работоспособность нового манипулятора.

Результаты экспериментального исследования действующей модели показали, что за полный цикл поворота кривошипа в одном из положений (рис. 2, а) структура становится плоской (что облегчает ее сборку и транспортирование), а в других положениях — структура становится пространственной (что увеличивает рабочее пространство манипулятора и его функциональность).

Структурный синтез пространственного параллелограммного платформенного манипулятора без особых положений. Рассмотрим нестандартную задачу создания пространственного параллелограммного манипулятора на основе особого параллелограммного механизма без избыточных связей, в котором нет неуправляемых положений, а его разные замкнутые контуры собираются и работают в двух h -пространствах: $h_1 = 3$ и $h_2 = 2$.

С учетом заданных входных параметров

$$W = 2; K = 4 (K_{h=3} = 2, K_{h=2} = 2); V = 0;$$

$$H = 1; f = 0$$

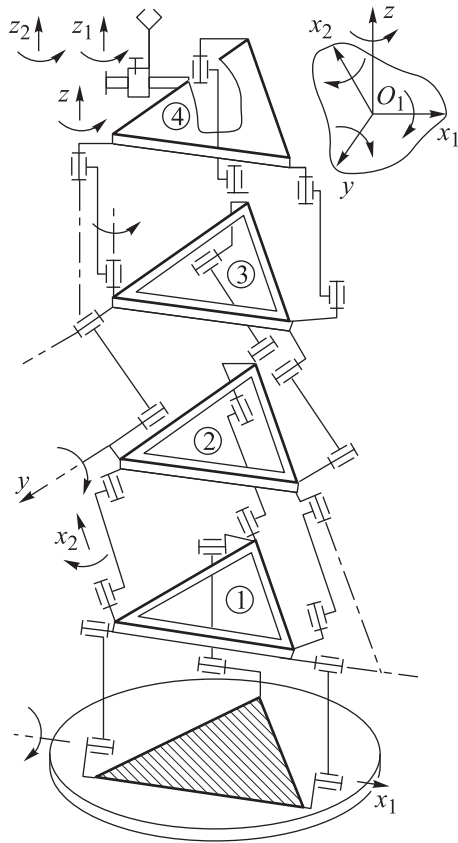


Рис. 4. Схема блочного сферического складывающегося V-манипулятора

Схема синтезированного на основе расчетных наборов $[LA]$ и $[L_\alpha]$ (путем сборки по вертикали между собой четырех унифицированных блочных структурных модулей ① ② ③ и ④) и выполненного на уровне изобретений [39] блочного сферического V-манипулятора приведена на рис. 4.

Его расчетная подвижность

$$W = (\tilde{n} - 1) - \sum (h - 1)K_h = (17 - 1) - 4(3 - 1) - 4(2 - 1) = 4,$$

что подтверждает полную работоспособность такого механизма.

Блочный сферический V-манипулятор имеет раздельную кинематику движений, обладает свойством изоморфности положения выходной платформы во всем рабочем пространстве и способен складываться.

Структурный синтез симметричного платформенного антипараллелограммного манипулятора-трипода. Рассмотрим задачу создания манипулятора-трипода в виде симметричного платформенного антипараллелограммного манипулятора-трипода (для краткости назван-

ного VIP-роботом), выполняемого на основе синтеза самоустанавливающегося механизма ($q = 0$), разные замкнутые контуры КЦ которого собираются и работают в двух h -пространствах: $h_1 = 3$ и $h_2 = 4$.

С учетом заданных входных параметров

$$W = 3; K = 5 (K_{h=3} = 2, K_{h=4} = 3); V = 0; H = 1; f = 0$$

V-Model (11) принимает вид

$$\begin{cases} \sum in_i = 2(W + \sum hK_h) \Rightarrow 42; \\ \sum (i - 2)n_i = [n_3 = 2(K - 1)] \Rightarrow 8; \\ \sum k\alpha_k = 2(W + \sum hK_h) \Rightarrow 42. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $[LA] = [n_2 n_3 n_4 n_5 n_6] / V = [98000] / V = 0 \Rightarrow \tilde{n} = 17;$
- $[L_\alpha] = [\alpha_4 - \alpha_4 - \alpha_4 - \alpha_{10} - \alpha_{10} - \alpha_{10}].$

Схема синтезированного на основе расчетных наборов $[LA]$ и $[L_\alpha]$ и выполненного на уровне изобретений [40] антипараллелограммного VIP-робота, образованного путем сборки по окружности трех унифицированных блочных структурных модулей, приведена на рис. 5.

Его расчетная подвижность

$$W = (\tilde{n} - 1) - \sum (h - 1)K_h = (17 - 1) - 2(3 - 1) - 3(4 - 1) = 3,$$

что подтверждает полную работоспособность такого манипулятора.

Антипараллелограммный VIP-робот выполнен с раздельной кинематикой движений, способен складываться и имеет низкую трудоемкость изготовления и сборки из унифицированных модулей.

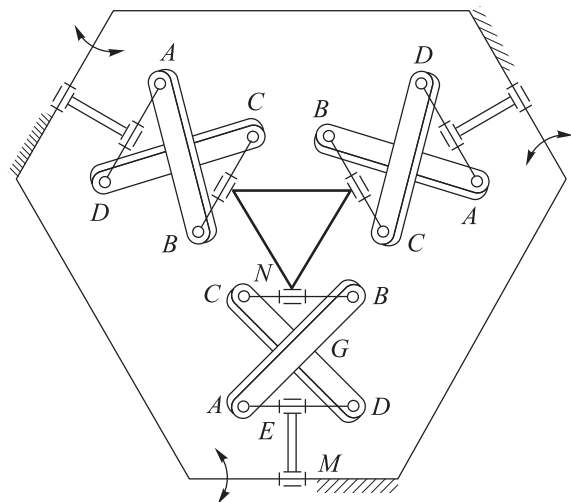


Рис. 5. Схема антипараллелограммного VIP-робота

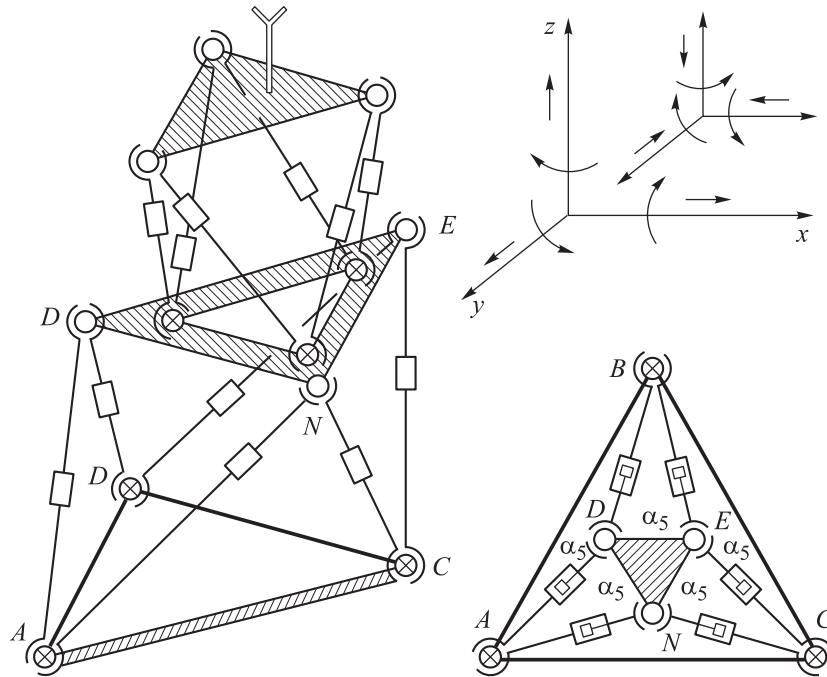


Рис. 6. Схема многократного VIP-манипулятора

Структурный синтез многократного манипулятора-трипода с подвижностью $W = 12$. Рассмотрим задачу создания пространственного платформенного манипулятора с подвижностью $W = 12$ (для краткости названного VIP-манипулятором), выполняемого на основе синтеза многоконтурного ($K = 10$) самоустанавливающегося ($q = 0$) рычажного механизма с двойными сферическими шарнирами ($H > 1$, $f > 1$), все замкнутые контуры которого собираются и работают в однородном h -пространстве с числом степеней свободы $h = 6$.

С учетом заданных входных параметров

$$W = 12; h = 6; K = 10; V = 12; f = 36$$

V-Model (11) принимает вид

$$\begin{cases} \sum in_i = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 60; \\ \sum (i - 2)n_i = 2(K - 1) - V \Rightarrow 6; \\ \sum k\alpha_k = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 60. \end{cases}$$

Эта модель имеет следующие целочисленные решения:

- $[LA] = [n_2 n_3 n_4 n_5 n_6] / V = [24.2001] / V = 0 \Rightarrow \Rightarrow \tilde{n} = 27;$
- $[L\alpha] = [\alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_5 - \alpha_{10}].$

Схема синтезированного на основе расчетных наборов $[LA]$ и $[L\alpha]$ и выполненного на

уровне изобретений [41] многократного VIP-манипулятора, образованного сборкой между собой двух подвижных платформ и основания через двойные трех- (○) и двухподвижные (⊗) сферические шарниры, приведена на рис. 6.

Его расчетная подвижность

$$\begin{aligned} W &= (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K + f = \\ &= (27 - 1) - 10(6 - 1) + 36 = 12, \end{aligned}$$

что подтверждает работоспособность такого механизма.

Выполнение VIP-манипулятора с увеличенной до $W = 12$ подвижностью обеспечивает расширение его рабочего пространства и функциональных возможностей.

Выводы

1. Разработан L_0 -алгоритм, реализующий новый молекулярный принцип образования кинематических K -цепей механических систем и целочисленные решения расширенной структурной математической модели. Его можно эффективно использовать для направленного структурного синтеза разнообразных механизмов без избыточных связей (без трудоемкого и тупикового перебора [29] сотен тысяч разных групп Ассур и их сочетаний [17]).

2. Предложена универсальная структурная формула для расчета подвижности любой меха-

нической системы, не требующая трудоемкого и ошибочного визуального подсчета всего множества КП в многоконтурных и многозвенных механизмах. По сравнению с формулами Грюблера, Чебышева, Кутцбаха, Сомова, Малышева и Дворовольского новая формула является более информативной и может быть применена для структурного синтеза и анализа любых плоских, пространственных и комбинированных механизмов во всем возможном рабочем пространстве, а также для создания новых технических решений [36–41].

3. В качестве отличительных характеристик синтеза различных КП для образования из них разных типов механических систем (механиз-

мов, ферм, молекул и др.) выступают формулы построения K -цепей, определяющие два расчетных набора: всех \tilde{n} звеньев K -цепи вида $[L_A]$ и всех $(K + 1)$ -х замкнутых контуров K -цепи вида $[L_\alpha]$.

4. Чтобы комплексно решать задачи структурного синтеза, анализа, идентификации всех неизоморфных синтезированных структур для построения полных атласов всех возможных K -цепей, введено понятие базового замкнутого контура, за который принят контур с наибольшим числом сторон L_0 из расчетного набора $[L_\alpha]$ как база для структурного синтеза K -цепей по L_0 -алгоритму.

Литература

- [1] Артоболовский И.И. *Механизмы в современной технике*. Москва, ЛЕНАНД, 2019. 500 с.
- [2] Глазунов В.А., ред. *Новые механизмы в современной робототехнике*. Москва, Техносфера, 2018. 316 с.
- [3] Мудров А.Г., Мудрова А.А., Сахапов Р.Л. *Пространственные аппараты с мешалкой и смесители*. Москва, Кнорус, 2021. 190 с.
- [4] Марковец К.И., Полотебнов В.О. Синтез механизмов транспортирования материалов с прямолинейным участком траектории движения зубчатой рейки. *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*, 2018, т. 39, № 1, с. 117–121.
- [5] Смялягин А.И., Приходько А.А. Структурный синтез сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2014, № 5–6, с. 85–88.
- [6] Пожбелко В.И. Единая теория структуры, синтеза и анализа многозвенных механических систем с геометрическими, гибкими и динамическими связями звеньев. Часть 1. Базовые структурные уравнения и универсальные таблицы строения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 9, с. 24–23, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-24-43>
- [7] Куц Е.Н. Структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложным двухшарнирным звеном. *Современное машиностроение. Наука и образование*, 2019, № 8, с. 201–214.
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms. In: IFToMM WC-2019. Springer, 2019, pp. 1517–1526, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [10] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [11] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. et al. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>
- [12] Chen L.M. *Digital and discrete geometry*. Springer, 2014. 322 p.
- [13] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2011. 857 p.
- [14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000619>
- [15] 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. In: 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 mechanisms of robotic manipulations*. 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: EunCoMes-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-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2016, vol. 100, no. 6, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.01.001>
- [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. *Сб. 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. Фундаментальный словарь*. Москва, Машиностроение, 2000. 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] Пожбелко В.И. *Платформенный механизм относительного манипулирования*. Патент РФ 2758391. Заявл. 25.02.2021, опубл. 28.10.2021.
- [37] Пожбелко В.И. *Пространственный манипулятор*. Патент РФ 2758377. Заявл. 24.02.2021, опубл. 28.10.2021.
- [38] Пожбелко В.И. *Пространственный параллелограммный механизм манипулятора*. Патент РФ 2784764. Заявл. 07.04.2022, опубл. 29.11.2022.
- [39] Пожбелко В.И. *Сферический блочный V-манипулятор*. Патент РФ 2730345. Заявл. 23.01.2020, опубл. 21.08.2020.
- [40] Пожбелко В.И. *Платформенный робот*. Патент РФ 2751778. Заявл. 07.07.2020, опубл. 16.07.2021.

- [41] Пожбелко В.И. *Пространственный платформенный VIP-манипулятор*. Патент РФ 2722165. Заявл. 19.11.2019, опублик. 27.05.2020.
- [42] Пожбелко В.И. Универсальный метод структурного синтеза и построения полного атласа многоконтурных ортогональных структур самоустанавливающихся рычажных механизмов в машиностроении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 3, с. 25–40, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-3-55-72>
- [43] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A. et al. Advanced theory of mechanisms and machines. *Springer*, 2000. 396 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 apparatuses with agitators and mixers]. Moscow, Knorus Publ., 2021. 190 p. (In Russ.).
- [4] Markovets K.I., Polotebnov V.O. Synthesis of mechanisms of material handling mechanism with a toothed bar straight line section of the movement. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti* [The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry], 2018, vol. 39, no. 1, pp. 117–121. (In Russ.).
- [5] Smelyagin A.I., Prikhodko A.A. Structural synthesis of reciprocating rotational mixing device complex actuator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [Izvestiya Vuzov. Food Technology], 2014, no. 5–6, pp. 85–88. (In Russ.).
- [6] Pozhbelko V.I. A unified theory of structure, synthesis and analysis of multibody mechanical systems with geometrical, flexible and dynamic connections. Part 1. Basic structural equations and universal structure tables. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 9, pp. 24–23, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-24-43> (in Russ.).
- [7] Kuts E.N. Structural synthesis of multiloop lever mechanisms with multiple hinges and the most complex double hinge link. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2019, no. 8, pp. 201–214. (In Russ.).
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms. In: IFToMM WC-2019. *Springer*, 2019, pp. 1517–1526, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_150
- [9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains. *Adv. Mech. Eng.*, 2018, vol. 10, no. 6, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018778404>
- [10] Zou Y., He P., Pei Y. Automatic topological structural synthesis algorithm. *Adv. Mech. Eng.*, 2016, vol. 8, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016638055>
- [11] Ding H.F., Hou F.M., Kecskemethy A. et al. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 47, pp. 1–15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.011>
- [12] Chen L.M. *Digital and discrete geometry*. Springer, 2014. 322 p.
- [13] Norton R.L. *Design in machinery*. McGraw Hill, 2011. 857 p.
- [14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 11, pp. 1641–1663, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000619>
- [15] 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. In: 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 mechanisms of robotic manipulations. *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: EunCoMes-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-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. *Mech. Mach. Theory*, 2027, 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 in mechanism synthesis]. *Sb. dok. mezhd. konf. po teorii mekhanizmov i mashin* [Proc. Int. Conf. on Mechanisms and Machines Theory]. Krasnodar, Kubanskiy GTU Publ., 2006, pp. 47–48. (In Russ.).
- [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. Fundamentalnyy slovar* [Mechanics of machines. A fundamental dictionary]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 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 lektsii 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] Pozhbelko V.I. *Platformennyy mekhanizm otnositelnogo manipulirovaniya* [Relative manipulation platform]. Patent RU 2758391. Appl. 25.02.2021, publ. 28.10.2021. (In Russ.).
- [37] Pozhbelko V.I. *Prostranstvennyy manipulyator* [Spatial manipulator]. Patent RU 2758377. Appl. 24.02.2021, publ. 28.10.2021. (In Russ.).
- [38] 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.).
- [39] Pozhbelko V.I. *Sfericheskiy blochnyy V-manipulyator* [Spherical V-manipulator]. Patent RU 2730345. Appl. 23.01.2020, publ. 21.08.2020. (In Russ.).
- [40] Pozhbelko V.I. *Platformennyy robot* [Platform robot]. Patent RU 2751778. Appl. 07.07.2020, publ. 16.07.2021. (In Russ.).
- [41] Pozhbelko V.I. *Prostranstvennyy platformennyy VIP-manipulyator* [Spatial platform VIP-manipulator]. Patent RU 2722165. Appl. 19.11.2019, publ. 27.05.2020. (In Russ.).
- [42] Pozhbelko V.I. Universal structural method in synthesis and constructing the complete atlas of the multiloop orthogonal structures of the self-adjusting linkages in mechanical engi-

neering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 3, pp. 25–40, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-3-55-72> (in Russ.).

[43] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A. et al. Advanced theory of mechanisms and machines. *Springer*, 2000. 396 p.

Статья поступила в редакцию 19.04.2023

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: pozhhelkovi@susu.ru).

Information about the author

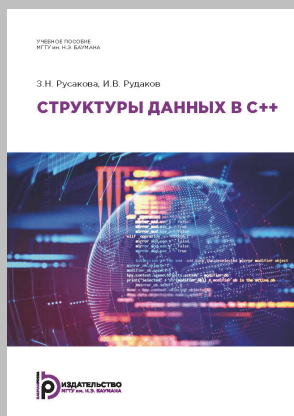
POZHBELKO Vladimir Ivanovich — Honored Worker of Higher School of the Russian Federation; Doctor of Science (Eng.), Professor. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “South Ural State University (National Research University)” (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пожбелко В.И. Универсальный L_0 -алгоритм структурного синтеза и анализа семейства новых платформенных манипуляторов параллельной структуры. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 10, с. 3–15, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-3-15

Please cite this article in English as:

Pozhbello V.I. Universal L_0 -algorithm of structural synthesis and analysis of the family of the new platform parallel-structure manipulators. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 10, pp. 3–15, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-3-15



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

«Структуры данных в C++»

Авторы: З.Н. Русакова, И.В. Рудаков

Рассмотрены методики, идиомы и приемы решения задач обработки динамических структур данных на языке C++. Подробно описаны вычислительные алгоритмы, реализованные с использованием нотации указателей. Приведены краткие теоретические сведения и примеры приложений по изучаемому материалу. Изложена методика выполнения лабораторных работ по рассматриваемым темам, которая используется авторами в процессе проведения практических занятий в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Программная инженерия» и «Информатика и вычислительная техника».

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>