

В.И. Пожбелко

## **НОВЫЙ МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПРИНЦИП ОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОКОНТУРНЫХ МЕХАНИЗМОВ БЕЗ ИЗБЫТОЧНЫХ СВЯЗЕЙ**



Владимир Иванович Пожбелко,  
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)  
Россия, Челябинск. E-mail: [pozhbelkovi@susu.ru](mailto:pozhbelkovi@susu.ru)

### **Аннотация**

В работе поставлена и решена задача разработки нового (названного «молекулярным») принципа и алгоритма образования структуры многоконтурных механизмов без избыточных связей, выполненной с учетом применения как низших, так и высших одноподвижных и многоподвижных кинематических пар. Эффективность предлагаемого подхода к оптимальному структурному синтезу подтверждена практическими примерами создания на уровне изобретений двухплатформенного рычажного механизма относительного манипулирования схвата робота с заданным  $W = 2$ , а также многопоточного планетарного зубчатого механизма с равномерно нагруженными сателлитами и заданным  $W = 1$ , работоспособность которых подтверждена экспериментально и расчетами их подвижности на основе трёх новых универсальных структурных формул.

*Ключевые слова:* структурный синтез, избыточные связи, рычажный механизм, зубчатый механизм, структурные формулы.

### **Введение**

Структурный синтез разнообразных многоконтурных и многозвенных, плоских и пространственных механизмов с низшими и высшими кинематическими парами (КП) и с заданным числом степеней свободы (подвижностью  $W \geq 1$ ) [1-8] является одной из наиболее сложных проблем

в теории создания работоспособных механизмов и машин (ТММ) [9–17]. Эта проблема трудно поддается формализации и поэтому до настоящего времени структурный синтез выполняется на основе интуиции проектировщика и по справочникам, так как до сих пор отсутствует алгоритм направленного оптимального структурного синтеза для образования сложных механизмов без избыточных связей ( $q = 0$ ). Известный подход к построению сложных механизмов [1] через разные наложения открытых цепей (метод гомотопии) требует перебора десятков тысяч указанных в электронном каталоге Э.Е.Пейсаха групп Ассура и поэтому является тупиковым.

Цель работы – разработка нового (названного «молекулярным») принципа и алгоритма образования самоустанавливающихся ( $W \geq 1, q = 0$ ) механизмов, позволяющего выполнить направленный синтез структурных схем с гарантированным отсутствием избыточных связей во всех замкнутых контурах синтезированного механизма. Эффективность данного подхода подтверждена на примерах синтезированных многоконтурных двухплатформенного рычажного механизма параллельной структуры с заданным  $W = 2$  и многопоточного зубчатого планетарного механизма с заданным  $W = 1$ .

### Базовые понятия и структурные уравнения

Согласно «Единой теории структуры механических систем» [6], [8], [12] для направленного синтеза и анализа многоконтурных механизмов с  $q = 0$  могут быть использованы следующие новые целочисленные структурные зависимости (1) – (10).

1. Расчетный ассортимент (набор)  $i$ -шарнирных ( $i$ -парных) звеньев для синтеза  $K$ -контурной  $\tilde{n}$ -звенной кинематической цепи механизма ( $K$  – цепи) вида  $[LA]$ :

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

где  $i_{max} = K + W$ ,  $\lim i = K + W + h, 1 \leq h \leq 6, h$  – число степеней свободы пространства, в котором собираются замкнутые контуры  $K$  – цепи и работает образованный из них механизм с заданным  $W \geq 1, q = 0$ .

2. Расчетный ассортимент (набор) из общего числа  $k$ -сторонних замкнутых контуров в количестве  $(K + 1)$  вида  $[L_\alpha]$ :

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

где  $L_0$  – число сторон наибольшего замкнутого контура с  $k_{max} \leq \tilde{n}$ .

3. Расчетный ассортимент (набор) вида  $[L_K]$ , состоящий из перечня чисел сторон  $k_i$  всех  $K$  независимых замкнутых контуров, входящих в состав  $[L_\alpha]$ :

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

4. Приведённое число ( $V$ ) многократных шарнирных соединений (МКШ) в данной  $K$ -цепи:

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

5. Число независимых замкнутых контуров ( $K$ ) – согласно новой формуле (5) взаимосвязано с  $[LA]$  (1) и  $V$  (4) следующим образом:

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

6. Новые универсальные структурные формулы подвижности ( $W$ ):

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

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

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

где  $f = p_2 + 2p_3 + 3p_4 + 4p_5$  – дополнительная подвижность низших и высших КП ( $H \geq 2$ ) числом  $p_H$  в данной  $K$ -цепи.

7. Целевая функция структурного синтеза:

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

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

8. Расширенная структурная математическая модель вида « $V$  – Model» для синтеза  $K$ -цепей самоустанавливающихся механизмов:

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

9. Молекулярный принцип образования структуры механизмов без избыточных связей – заключается в том, что при синтезе механизмов с  $q = 0$  предлагается в расчетном наборе  $[L_\alpha]$  (2) один из замкнутых контуров

(начиная с контура « $L_0$ » с наибольшим числом сторон) рассматривать, как внешнюю оболочку «единой молекулы», которая для построения искомой  $K$ -цепи заполняется «атомами» в виде всех остальных  $K$  замкнутых контуров из расчетного набора  $[L_\alpha]$  (2), стороны которых образованы всеми рычажными звеньями из расчетного набора  $[LA]$  (1) и соединены между собой кинематическими парами. Таким образом, число «атомов» в структуре «единой молекулы» механизма будет равно задаваемому при синтезе числу  $K$  независимых замкнутых контуров  $K$ -цепи.

10. Универсальный « $L_0$ -алгоритм структурного синтеза».

Предлагаемый « $L_0$ -алгоритм» направленного синтеза является поэтапным и состоит из нахождения целочисленных решений уравнений (10) расширенной структурной математической модели « $V - Model$ » в виде расчетных наборов  $[LA]$  и  $[L_\alpha]$  разного вида (1) и (2) (этап 1); построения внешней оболочки «единой молекулы» (этап 2) и её заполнения «атомами» в виде всех остальных замкнутых контуров из расчетных наборов  $[LA]$  (1) и  $[L_\alpha]$  (2) (этап 3), а также финального выбора стойки и входных звеньев в синтезированной  $K$ -контурной цепи без избыточных связей (этап 4).

### Направленный структурный синтез рычажного многоконтурного механизма параллельной структуры

Рассмотрим практическую задачу создания платформенного механизма относительного манипулирования совместно работающими рабочими органами и её решение на основе предлагаемого «молекулярного принципа образования механизма без избыточных связей» и реализующего его « $L_0$ -алгоритма» структурного синтеза замкнутой КЦ рычажных звеньев с параллельными осями шарниров, образующих изменяемые замкнутые контуры с  $q = 0$  в пространстве  $h = 3$ .

После подстановки задаваемых входных параметров синтеза:

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

расширенная структурная математическая модель « $V - Model$ » (10) примет вид:

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

и имеет следующие целочисленные решения:

- 1)  $[LA] = [n_2 n_3 n_4] / V = [621] / V = 0 \Rightarrow \tilde{n} = n_2 + n_3 + n_4 = 9;$
- 2)  $[L_\alpha] = [\alpha_4 - \alpha_6 - \alpha_6 - \alpha_6].$

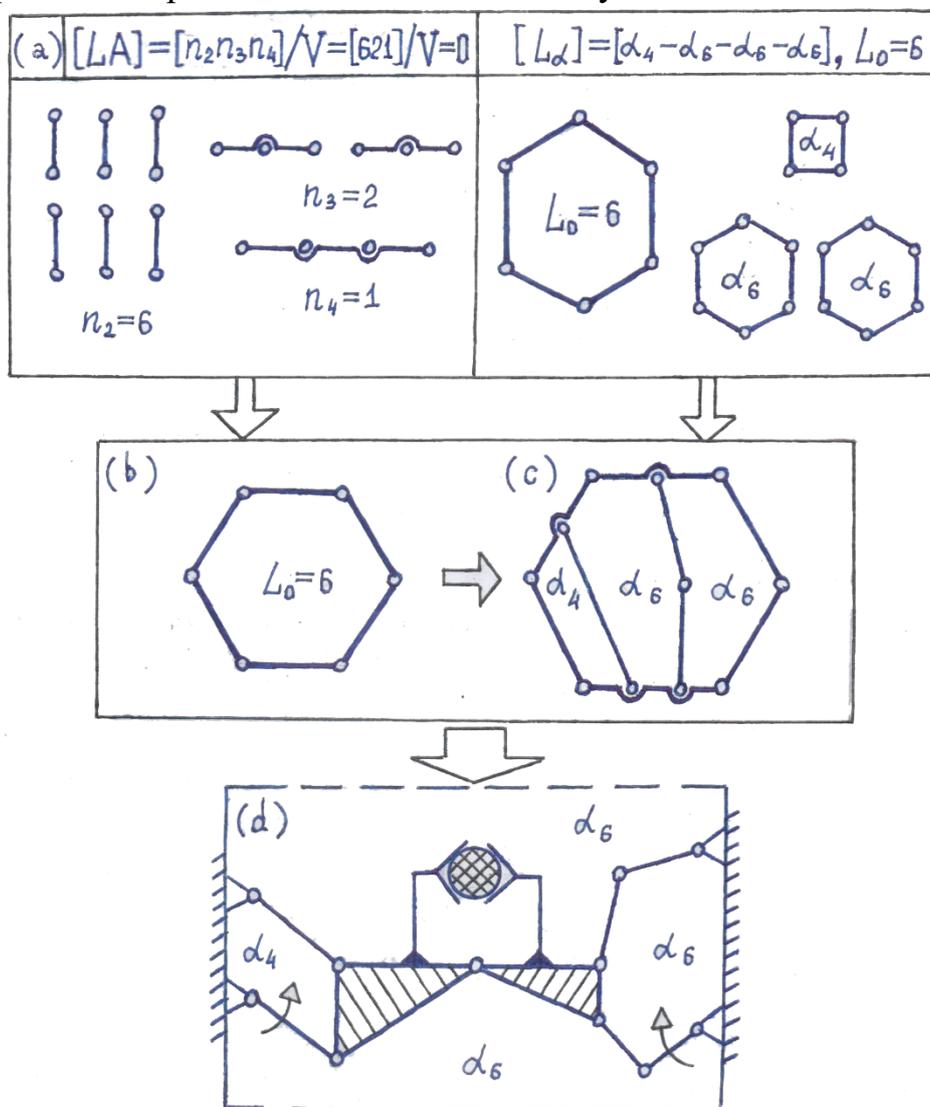
Синтезированный на основе рассчитанных наборов  $[LA]$  и  $[L_\alpha]$  в виде «трехатомной единой молекулы» (согласно представленного выше « $L_0$ -алгоритма» направленного структурного синтеза) и выполненный на уровне изобретения (Патент РФ [17]) двухплатформенный механизм относительного манипулирования представлен на рис.1, а его расчетная подвижность по новым универсальным формулам подвижности (6), (7) и (8) равна:

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

$$б) W = \frac{1}{2}(\sum in_i + V) - hK + f = \frac{1}{2}(2 * 6 + 3 * 2 + 4 * 1) - 3 * 3 = 2;$$

$$в) W = \frac{1}{2}(\sum k\alpha_k + V) - hK + f = \frac{1}{2}(4\alpha_4 + 6\alpha_6) - 3 * K = 2,$$

и экспериментально подтверждена на действующей модели синтезированного рычажного механизма с двумя степенями свободы.



**Рис.1** Поэтапный « $L_0$ -алгоритм» структурного синтеза: (а) расчетные наборы звеньев  $[LA]$  и контуров  $[L_\alpha]$ ; (б) построение внешней оболочки «единой молекулы» ( $L_0 = 6$ ); (с) её заполнение «тремя атомами» (в виде независимых замкнутых контуров  $\alpha_4, \alpha_6$  и  $\alpha_6$ ); (д) образование механизма плавающего схвата робота (Патент РФ [17]).

## Направленный структурный синтез зубчатого многопоточного планетарного механизма

Рассмотрим практическую задачу создания самоустанавливающегося планетарного механизма с  $W = 1, q = 0$  и равномерно нагруженными цилиндрическими сателлитами (зубчатые зацепления которых в плоскости своего вращения ( $h = 3$ ) образуют двухподвижные КП с  $p_2 > 2$ ) и решение этой задачи на основе предлагаемого «молекулярного принципа образования механизмов» и реализующего его « $L_0$ -алгоритма» структурного синтеза.

После подстановки задаваемых входных параметров синтеза:

$$W = 1; h = 3; K = 5; V = 0; p_2 = 6; f = p_2 = 6; q = 0,$$

расширенная структурная математическая модель « $V$ -Model» (10) примет вид:

$$\begin{cases} \sum in_i = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 20; \\ \sum (i - 2)n_i = [2(K - 1) - V] \Rightarrow 8; \\ \sum k\alpha_k = [2(W + hK - f) - V] \Rightarrow 20, \end{cases}$$

и имеет следующие целочисленные решения:

- 1)  $[LA] = [n_2 n_3 n_4] / V = [123] / V = 0 \Rightarrow \tilde{n} = n_2 + n_3 + n_4 = 6;$
- 2)  $[L_\alpha] = [\alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_3 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_4].$

Синтезированный на основе рассчитанных наборов  $[LA]$  и  $[L_\alpha]$  в виде «пятиатомной единой молекулы» (согласно представленного выше « $L_0$ -алгоритма» направленного структурного синтеза) многоконтурный планетарный зубчатый механизм с плавающим водилом – представлен на рис.2, а его расчетная подвижность по новым универсальным структурным формулам подвижности (6), (7) и (8) равна:

- а)  $W = (\tilde{n} - 1) - (h - 1)K + f = (6 - 1) - (3 - 1) * 5 + 6 = 1;$
- б)  $W = \frac{1}{2}(\sum in_i + V) - hK + f = \frac{1}{2}(2 * 1 + 3 * 2 + 4 * 3) - 3 * 5 + 6 = 1;$
- в)  $W = \frac{1}{2}(\sum k\alpha_k + V) - hK + f = \frac{1}{2}(3\alpha_3 + 4\alpha_4) - 3 * K + 6 = 1,$

что подтверждает работоспособность синтезированного планетарного механизма с  $q = 0$ , имеющего повышенное в 4-5 раз передаточное отношение и высокий КПД.

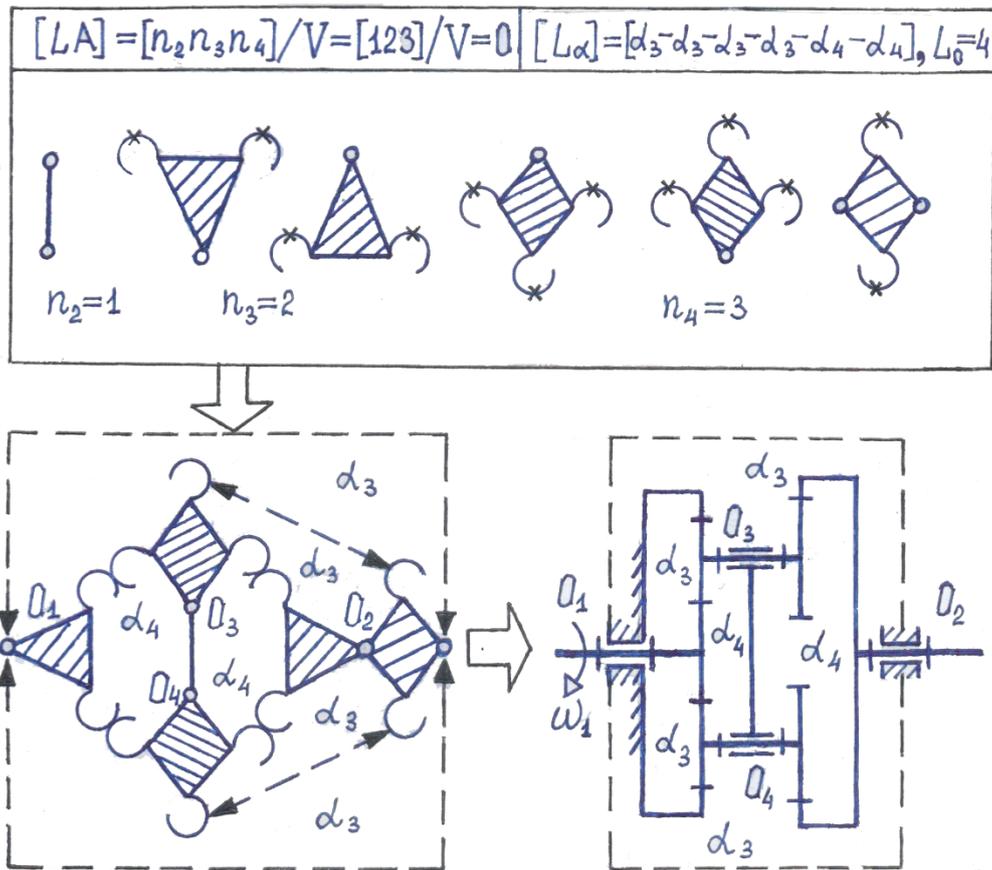


Рис. 2. Поэтапный « $L_0$ -алгоритм» структурного синтеза с  $q = 0$  самоустанавливающегося многопоточного планетарного редуктора

## Выводы

1. Предложенный новый молекулярный принцип образования структуры многоконтурных механизмов без избыточных связей позволяет выполнять направленный структурный синтез плоских и пространственных самоустанавливающихся рычажных, зубчатых (кулачковых) механизмов, содержащих как низшие, так и высшие одноподвижные и многоподвижные кинематические пары (включая многократные соединения звеньев).

Данный подход к выполнению оптимального ( $q = 0$ ) структурного синтеза разных типов механизмов производится по рассмотренному на конкретных примерах в данной работе оригинальному « $L_0$ -алгоритму синтеза», выполняемому без трудоемкого и тупикового перебора всех установленных в электронном каталоге проф. Э.Е.Пейсаха десятков тысяч комбинаторных групп Ассур, а также без идентификации и удаления всех сотен тысяч возникающих при компьютерной комбинаторике [9], [11] структурно-повторяющихся (мусорных) схем (количество которых составляет более 99% от всех генерируемых компьютерной программой!)

2. Предложенные три новые универсальные структурные формулы для определения числа степеней свободы механизма  $W$  (6), (7) и (8) являются

эквивалентными между собой и представляют впервые установленные аналитические зависимости между необходимыми структурными соотношениями, определяющими (требуемые для выполнения  $q = 0$ ) наборы  $[LA]$  и  $[L_\alpha]$  разных видов  $i$ -парных звеньев и чисел сторон всех замкнутых контуров  $K$ -цепи с учетом вводимого понятия «дополнительная подвижность всех КП в данной  $K$ -цепи (6)».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике. - М: ЛЕНАРД, 2019. – 500 с.
- [2] Новые механизмы в современной робототехнике// Под ред. В.А.Глазунова. – М: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 316 с.
- [3] Мудров А.Г., Мудрова А.А., Сахапов Р.Л. Пространственные аппараты с мешалкой и смесители: Монография. – М: РУСАЙНС, 2021. – 190 с.
- [4] Марковец К.И., Полотебнов В.О. Синтез механизмов транспортирования 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 перемешивающего устройства// Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2014. – Т5-6. – С.85-88.
- [6] Пожбелко В.И. Единая теория структуры, синтеза и анализа многозвенных механических систем с геометрическими, гибкими и динамическими связями звеньев//Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – N9(726). – С.24-44.
- [7] Несмеянов И.А. Структурный синтез самоустанавливающихся механизмов с параллельной кинематикой. Вестник Брянского ГТУ, 2019, №4, с.4-13.
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms//Advances in Mechanisms and Machine Science/ IFToMM WC-2019. – Springer, 2019. – Vol.73.pp.1517-1526.
- [9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains//Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10. – pp.1-10.
- [10] Zou.Y, He.P and Pei.Y. Automatic topological structural synthesis algorithm//Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol.8. pp.1-12.
- [11] Ding H.F., Hou F.M. and Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. Mech. Mach. Theory.– 2014.– Vol.47. – pp.1-15.
- [12] Pozhbelko V.I. An unified structure theory of multibody open, closed and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. Mech. Mach. Theory. Vol.100. – 2016. – pp.1-16.

- [13] Kuts E.N., Pozhbelko V.I. A new structural synthesis method of multiloop linkage mechanisms with multiple joints. In: Evgrafov A (eds.) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2023, pp.113-123. Springer, Switzezlang.
- [14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages//Robotica, Vol.36(11) – 2018, – pp.1641-1663.
- [15] Talaba D. Mechanical models and the mobility of robots and mechanisms.//Robotica, Vol.33(4) – 2015. – pp.181-193.
- [16] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. In: Evgrafov A.N. (eds.) Advances in Mechanical Engineering. Lecture notes in Mechanical Engineering, 2017, pp.45-56.
- [17] Пожбелко В.И. Платформенный механизм относительного манипулирования. Патент RU на изобретение №2758391. Бюл. №31, 2021.

V.I.Pozhbelko

## **AN NEW MOLECULAR APPROACH FOR CREATION THE STRUCTURA OF MULTILOOP MECHANISMS WITHOUT REDUNDANT CONSTRAINTS**

South-Ural State University (national research university), Russia

### **Abstract**

The paper presents an new molecular approach to directed structural synthesis of various multiloop mechanisms with lower and higher kinematic pairs without any redundant constraints. Effectiveness of novel structural synthesis method are confirmed by synthesized self-aligning lever and gearing mechanisms for various branch of machinery.

*Key words:* structural synthesis, redundant constraints, lever mechanism, gearing mechanism, mobility equations.

### **REFERENCES**

- [1] Artobolevsky I.I. Mechanisms in modern technology. - M: LENNARD, 2019. - 500 p.
- [2] New mechanisms in modern robotics / Ed. V.A. Glazunov. - M: TECHNOSPHERE, 2018. – 316 p.
- [3] Mudrov A.G., Mudrova A.A., Sakhapov R.L. Spatial Apparatuses with Stirrers and Mixers: Monograph. – M: RUSAYNS, 2021. – 190 p.
- [4] Markovets K.I., Polotebnov V.O. Synthesis of transportation mechanisms with a straight section of the trajectory of the gear rack // Izvestiya vysshikh

- uchebnykh obuchenii. Light industry technology. 2018. Vol. 39(1). – S. 117-121.
- [5] Smelyagin A.I., Prikhodko A.A. Structural synthesis of a complex mixing device // News of higher educational institutions. Food technology. – 2014. – T5-6. – P.85-88.
- [6] Pozhbelko V.I. A unified theory of structure, synthesis and analysis of multi-link mechanical systems with geometric, flexible and dynamic links of links//Izvestia of higher educational institutions. Engineering. – 2020. – N9(726). - P.24-44.
- [7] Nesmeyanov I.A. Structural synthesis of self-aligning mechanisms with parallel kinematics. Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2019, No. 4, pp. 4-13.
- [8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms//Advances in Mechanisms and Machine Science/ IFToMM WC-2019. – Springer, 2019. – Vol.73, pp.1517-1526.
- [9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains//Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10. – pp.1-10.
- [10] Zou.Y, He.P and Pei.Y. Automatic topological structural synthesis algorithm//Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol.8. pp.1-12.
- [11] Ding H.F., Hou F.M. and Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains. Mech. Mach. Theory.–2014.–Vol.47. – pp.1-15.
- [12] Pozhbelko V.I. An unified structure theory of multibody open, closed and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. Mech. Mach. theory. Vol.100. –2016. – pp.1-16.
- [13] Kuts E.N., Pozhbelko V.I. A new structural synthesis method of multiloop linkage mechanisms with multiple joints. In: Evgrafov A (eds.) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2023, pp.113-123. Springer, Switzezlang.
- [14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages//Robotica, Vol.36(11) – 2018, – pp.1641-1663.
- [15] Talaba D. Mechanical models and the mobility of robots and mechanisms//Robotica, Vol.33(4) – 2015. – pp.181-193.
- [16] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. In: Evgrafov A.N. (eds.) Advances in Mechanical Engineering. Lecture notes in Mechanical Engineering, 2017, pp.45-56.
- [17] Pozhbelko V.I. Platform relative manipulation mechanism. Patent RU for the invention No. 2758391. Bull. No. 31, 2021.