

НОВЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПАРАДОКСАЛЬНОГО, НОРМАЛЬНОГО И ТАБЛИЧНОГО СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МНОГОКОНТУРНЫХ РЫЧАЖНЫХ И ПЛАНЕТАРНЫХ САМОУСТАНОВЛИВАЮЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ



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

Аннотация

В работе дано обоснование предлагаемых разнообразных новых методов и алгоритмов оптимального структурного синтеза механизмов без вредных избыточных связей с применением комплекта универсальных структурных уравнений. Эффективность всех новых методов и простота их алгоритмов подтверждена на разнообразных примерах, синтезированных с их применением на уровне изобретений (6-20)-звенных плоских и пространственных одно- и многоподвижных рычажных планетарных механизмов параллельной структуры для привода рабочих органов манипуляторов и других сложных машин.

Ключевые слова: параллельные механизмы, структурный синтез, избыточные связи, замкнутые контуры, универсальные структурные уравнения.

Введение

Разнообразные механизмы всех типов строения (рычажные, зубчатые, кулачковые), в которых все замкнутые контуры кинематической цепи (КЦ) сложной механической системы (МС) ещё на этапе синтеза их n -звенных структурных схем выполнены без вредных избыточных связей – являются наиболее перспективными для современного машиностроения [1-14]. Такие многозвенные механизмы за счёт самоустанавливаемости всех звеньев между собой (как при их сборке, так и при нагружении в процессе эксплуатации) имеют равномерную нагруженность всех звеньев, снижение трения, износа, точности изготовления и в результате – увеличение в 2-3 раза срока службы

[2], [3]. В связи с этим в обобщающей научной монографии С.Н. Кожевникова по синтезу [2] предложено структурные схемы механизмов без избыточных связей (критерий $q=0$) считать оптимальными (наилучшими), а их синтез считать оптимальным.

Целью работы является обоснование предлагаемых новых методов и алгоритмов направленного структурного синтеза многоконтурных самоустанавливающихся МС, выполненное на разнообразных примерах создания на уровне изобретений [15-17] новых рычажных и планетарных механизмов параллельной структуры (РМ) в качестве приводов рабочих органов манипуляторов и других сложных машин.

Новые универсальные структурные уравнения [8], [9] для К-контурных самоустанавливающихся механизмов ($0 \leq K \leq K_{max}$)

1. Число независимых замкнутых контуров в КЦ механизма

$$K = 1 + \frac{1}{2} [V + \sum_{i=1}^{i_{max}} (i - 2)n_i]. \quad (1)$$

2. Приведённое число сложных многократных шарниров (МКШ)

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

3. Универсальные формулы для расчёта необходимого (для $q=0$) числа звеньев n^0 и суммарной подвижности f_{Σ}^0 всех H -подвижных пар расчётной базовой структурной группы (БСГ) с контурами K^0 , образующимися после присоединения всех внешних пар БСГ (А, В, С, ...) к стойке

$$\begin{cases} n^0 = (h - 1)K^0 + \tilde{K} - f; & f_{\Sigma}^0 = hK^0 + \tilde{K} \Rightarrow (p_1 + 2p_2 + 3p_3 + 4p_4 + 5p_5); \\ f = \sum (H - 1)P_H \Rightarrow (p_2 + 2p_3 + 3p_4 + 4p_5), \end{cases} \quad (3)$$

где \tilde{K} – число контуров, замыкаемых динамическими или гибкими связями (случай $h=1$).

4. Универсальная структурная формула подвижности (W_h) механизмов, работающих в любом h -пространстве движений ($h=var, h=const$)

$$W_h = \frac{1}{2} (V + \sum_{i=1}^{i_{max}} i n_i) - \sum_{h=1}^{h=6} h k_h + f. \quad (4)$$

5. Универсальная формула расчета числа избыточных связей в К-цепи

$$q_h = [\sum_{h=1}^{h=6} (h - 1)K_h + W_h + 1] - (\tilde{n} + f). \quad (5)$$

6. Универсальная структурная математическая модель «V-Model» для синтеза всех возможных К-контурных самоустанавливающихся механизмов

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

7. Универсальные структурные формулы подвижности однородных механизмов ($h=const$)

• Случай 1 ($h=1$). $W_{h=1} = \tilde{n} + f - 1 = \sum_{i=1}^{i_{max}} n_i. \quad (7)$

•Случай 2 ($h=2$). $W_{h=2} = \frac{1}{2} [\sum_{i=1}^{i_{max}} (4 - i)n_i] + (f - \frac{V}{2} - 2)$. (8)

•Случай 3 ($h=3$). $W_{h=3} = [\sum_{i=1}^{i_{max}} (3 - i)n_i] + (f - V - 3)$. (9)

•Случай 4 ($h=4$). $W_{h=4} = \frac{1}{2} [\sum_{i=1}^{i_{max}} (8 - 3i)n_i] + f - \frac{3}{2}V - 4$. (10)

•Случай 5 ($h=5$). $W_{h=5} = [\sum_{i=1}^{i_{max}} (5 - 2i)n_i] + (f - 2V - 5)$. (11)

•Случай 6 ($h=6$). $W_{h=6} = \frac{1}{2} [\sum_{i=1}^{i_{max}} (12 - 5i)n_i] + (f - \frac{5}{2}V - 6)$. (12)

Метод многовершинного структурного синтеза механизмов

Алгоритм структурного синтеза многовершинных самоустанавливающихся механизмов ($q=0$) включает построение одного (синтез механизмов вида I) или нескольких, расположенных один внутри другого (синтез механизмов вида II), шарнирных многозвенников с числом вершин/сторон $L_0 \geq 3$ (этап 1) и их соединение между собой через двухшарнирные рычажные звенья (этап 2) для образования замкнутой КЦ многоконтурного механизма с заданными входами.

Применительно к оптимальному синтезу данных механизмов универсальная формула подвижности W (9) примет следующий вид:

1) РМ вида I: $W = (L_0/2) - 3$;

2) РМ вида II: $W = L_0 - 3$.

Процесс и результаты построения по указанному алгоритму многоконтурных механизмов с разными входными параметрами синтеза ($W=1, L_0 = 8$ – для РМ вида I и $W=2, L_0 = 5$ – для РМ вида II) представлены на рис.1 в виде выполненных на уровне изобретений [16] многовершинных шарнирных механизмов, работоспособность которых полностью подтверждена расчетами по всем универсальным структурным уравнениям (4), (5), (9).

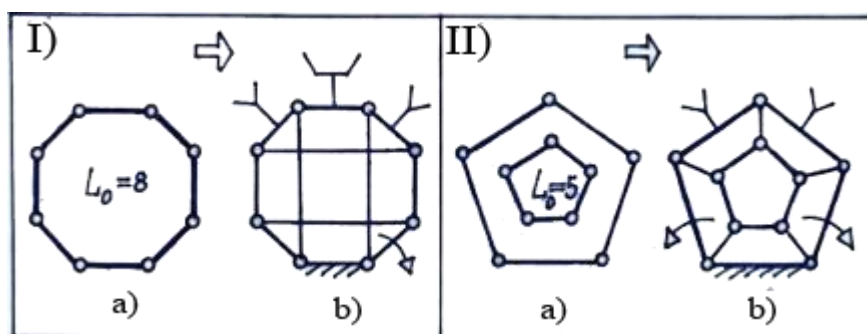


Рис. 1. Процесс структурного синтеза многовершинных шарнирных механизмов

Метод ортогонального синтеза многоконтурных механизмов

Данный метод синтеза заключается в построении структурных схем, в которых все многошарнирные звенья ($i \geq 3$) выполнены [11] с расположением всех шарниров на одной линии при синтезе новых механизмов.

Алгоритм структурного синтеза заключается в сборке между собой всех расчётных по уравнениям универсальной модели «V-Model» (6) многошарнирных звеньев с $i \geq 3$ (этап 1) и присоединённых к ним всех расчётных двухшарнирных звеньев для построения замкнутой К-контурной кинематической цепи механизма с заданными входами (этап 2).

Процесс и результаты построения механизма с входными параметрами синтеза:

$$h=3; W=1; K=4; V=2; f=0; i=3; q=0,$$

представлен на рис.2 в виде синтезированного на уровне изобретений [17] складывающегося манипулятора, образованного из расчётного набора звеньев $[LA]/V=[6400]/2$ [9].

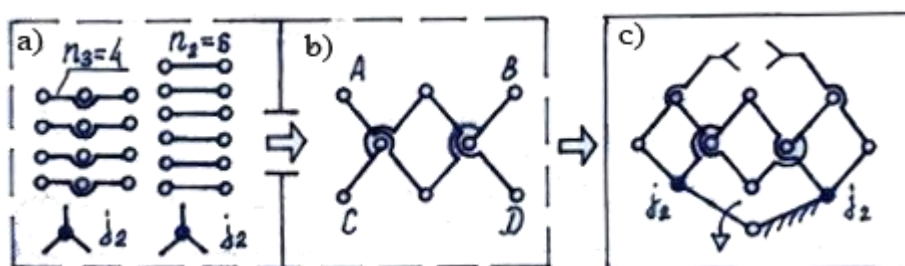


Рис. 2. Процесс структурного синтеза ортогонального механизма манипулятора

Метод синтеза механизмов на основе сборки многократных шарниров

Синтез механизмов с j -кратными МКШ ($j \geq 2$) и $K \geq 2$ производится по алгоритму, включающему расчёт по универсальным структурным уравнениям (4), (5) и (6) требуемого кода строения КЦ механизма $[LA]=[n_2 n_3 n_4 \dots]$ (этап 2) и добавление к этим сборкам МКШ всех остальных звеньев из расчётного кода $[LA]/V$ [9] для построения замкнутой К-контурной цепи механизма с заданными входами (этап 3).

Процесс и результаты построения механизма с входными параметрами синтеза:

$$h=3; W=1; K=4; V=2; f=0; i_{max}=3; q=0,$$

представлен на рис. 3 в виде манипулятора с внутренним входом, а также в работе [14].

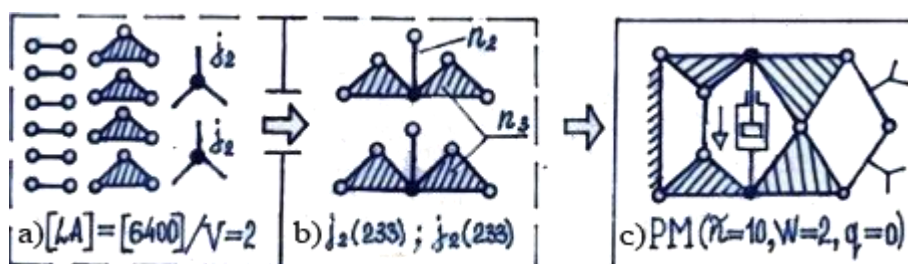


Рис. 3. Процесс структурного синтеза на основе сборки многократных шарниров

Методы парадоксального структурного синтеза механизмов

Парадоксальность предлагаемых новых методов направленного синтеза структурных схем самоустанавливающихся механизмов заключается в том, что K -контурный механизм с $W \geq 1$ образуется из открытой кинематической цепи в виде расчётной базовой структурной группы с $W^*=0$ (БСГ) [9] – вообще без традиционного добавления в КЦ каких-либо входных звеньев. Синтез выполняется с применением универсальных структурных уравнений (1)-(6) и (9) на примерах построенных многоконтурных ($K=2$; $K=4$; $K=5$ и $K=9$) рычажных механизмов, собираемых и работающих в $h=3$ пространстве движений.

Алгоритм направленного структурного синтеза включает расчёт параметров строения БСГ по формуле (3) и построение по ним открытой цепи БСГ с незамкнутыми внешними КП (этап 1) и преобразование этой построенной БСГ в замкнутую цепь следующими 4-мя оригинальными способами (этап 2):

Способ №1 (*A-синтез*) – заключается в замыкании всех внешних пар расчётной БСГ между собой внутри этой структуры.

Способ №2 (*B-синтез*) – заключается в замыкании всех внешних пар одной расчётной БСГ на все внешние пары другой расчётной БСГ.

Способ №3 (*C-синтез*) – является смешанным ($C=A+B$) и заключается в том, что только часть из внешних пар одной расчётной БСГ замыкается внутри этой БСГ, а оставшаяся часть внешних пар этой БСГ замыкается на внешние пары другой расчётной БСГ.

Способ №4 (*D-синтез*) – заключается в том, что одна часть внешних пар замыкается между собой внутри данной БСГ, а остальные внешние пары этой БСГ замыкаются тоже внутри этой БСГ, но через дополнительное звено CD .

Пример 1. Процесс и результаты парадоксального A -синтеза с входными параметрами синтеза:

$$h=3; W=1; K=2; K^0=K+1=3; i_{\max}=3; V=0; f=0; q=0,$$

представлены на рис.4 в виде синтезированного на уровне изобретений [17] Б-звенного РМ.

Пример 2. Процесс и результаты парадоксального B -синтеза с входными параметрами синтеза:

$$h=3; W=1; K=5; K^0 < K; i_{\max}=4; V=0; f=0; q=0,$$

представлены на рис.5 в виде синтезированной ортогональной структурной схемы 12-звенного многоконтурного шарнирного механизма.

Пример 3. Процесс и результаты парадоксального C -синтеза с входными параметрами синтеза:

$$h=3; W=1; K=9; K^0 < K; i_{\max}=3; V=4; f=0; q=0,$$

представлены на рис.6 в виде синтезированного 20-звенного механизма относительного манипулирования.

Пример 4. Процесс и результаты парадоксального D -синтеза со входными параметрами синтеза:

$$h=3; W=2; K=4; K^0=K=4; i_{\max}=3; V=0; f=0; q=0,$$

представлены на рис.7 в виде синтезированного 11-звенного механизма параллельной структуры.

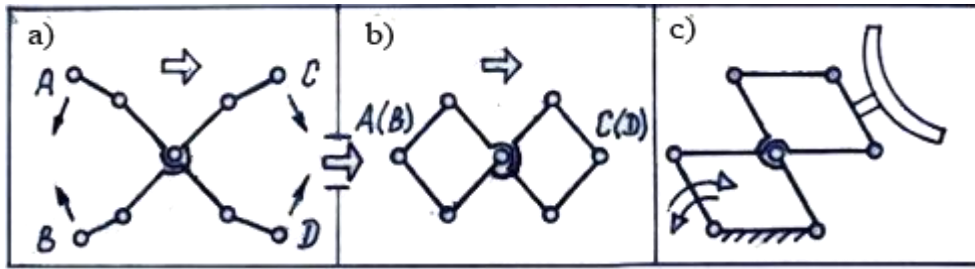


Рис. 4. Процесс парадоксального А-синтеза складывающегося 6-звенного РМ: а) БСГ ($K^0 = 3; n^0 = 6 \Rightarrow n_2^0 = 4, n_3^0 = 2; f_{\Sigma}^0 = 9$); с) РМ ($\tilde{n} = 6 \Rightarrow n_2 = 4, n_3 = 2$)

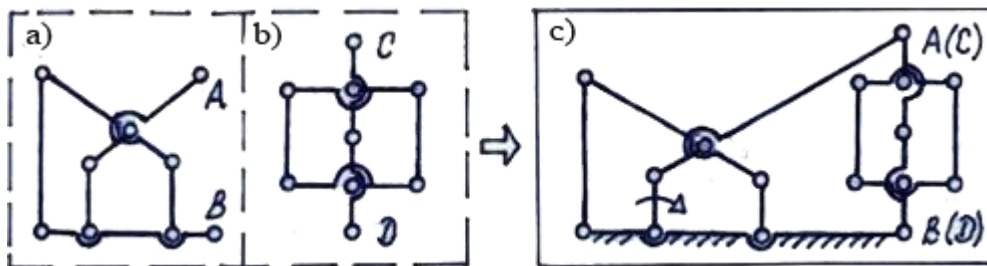


Рис. 5. Процесс парадоксального В-синтеза многоконтурного шарнирного механизма: БСГ №1 ($K^0 = 3; n^0 = 6; f_{\Sigma}^0 = 9; i_{max} = 4$); б) БСГ №2 ($K^0 = 3; n^0 = 6; f_{\Sigma}^0 = 9; i_{max} = 3$); с) РМ ($\tilde{n} = 12 \Rightarrow n_2 = 5, n_3 = 6, n_4 = 1$).

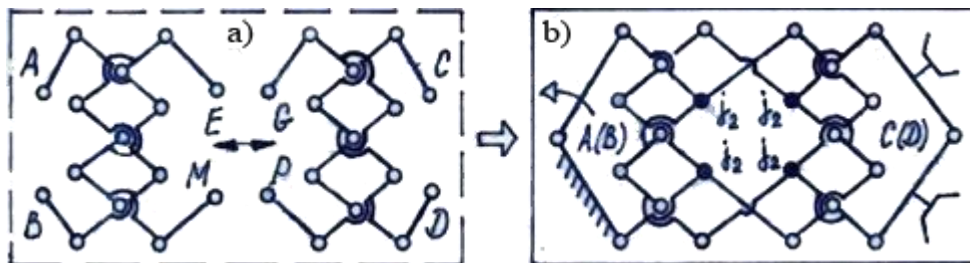


Рис. 6. Процесс парадоксального С-синтеза механизма относительного манипулирования: БСГ №1 и БСГ №2 ($K^0 = 5; n^0 = 10 \Rightarrow n_2^0 = 4; n_3^0 = 6; f_{\Sigma}^0 = 15$); б) РМ ($\tilde{n} = 20 \Rightarrow n_2 = 8; n_3 = 12; V = 4$)

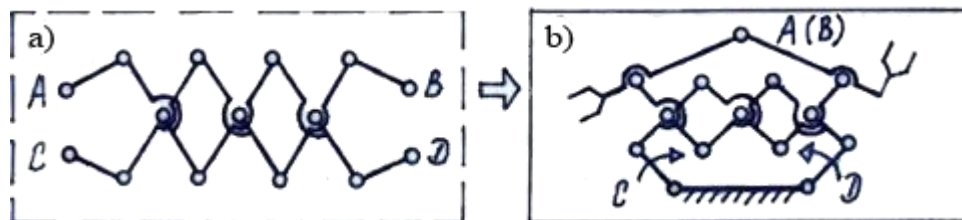


Рис. 7. Процесс парадоксального D-синтеза механизма относительного манипулирования: а) БСГ №1 и БСГ №2 ($K^0 = 5; n^0 = 10 \Rightarrow n_2^0 = 4, n_3^0 = 6; f_{\Sigma}^0 = 15$); б) РМ ($\tilde{n} = 11 \Rightarrow n_2 = 5, n_3 = 6$).

Метод синтеза на основе расчётных базовых структурных групп (БСГ)

Алгоритм структурного синтеза в заданном h -пространстве движений включает расчёт требуемых параметров строения БСГ (отмечены верхним индексом «нуль») по универсальным структурным уравнениям (3) для построения по ним открытой цепи БСГ (этап 1) и преобразование расчётной БСГ в замкнутую КЦ полностью работоспособного (1), (4), (5) К-контурного механизма (этап 2).

Пример 1. Синтез платформенного механизма параллельной структуры в $h=6$ пространстве движений со входными параметрами синтеза:

$$h=6; W=4; K=3; K^0=K=3; j_{\max}=3; V=0; f=9; q=0,$$

выполняется по следующим универсальным структурным уравнениям (3) с подтверждением работоспособности синтезированного механизма по формулам (1), (5) и (12):

$$1) n^0 = (h - 1)K^0 - f = 6 \Rightarrow n^0 + n_2^0 + n_3^0 = 6 \Rightarrow n_2^0 = 4, n_3^0 = 2.$$

$$2) f_{\Sigma}^0 = hK^0 = 18 \Rightarrow p_1 = 0, p_2 = 9.$$

$$3) K = 1 + \frac{1}{2}(n_3 + 2n_4 + \dots) = 1 + \frac{1}{2}(2 + 2 * 1) = 3.$$

$$4) W_{h=6} = \left[\frac{1}{2}(2n_2 - 3n_3 - 8n_4) \right] + (f - h) = [1] + (9 - 6) = 4.$$

$$5) q_{h=6} = [(h - 1)K + W_{h=6} + 1] - (\tilde{n} + f) = [20] - (11 + 9) = 0.$$

Процесс и результаты структурного синтеза представлены на рис.8 в виде выполненного на уровне изобретений [15] пространственного механизма двухплатформенного манипулятора относительного манипулирования с $W=4$.

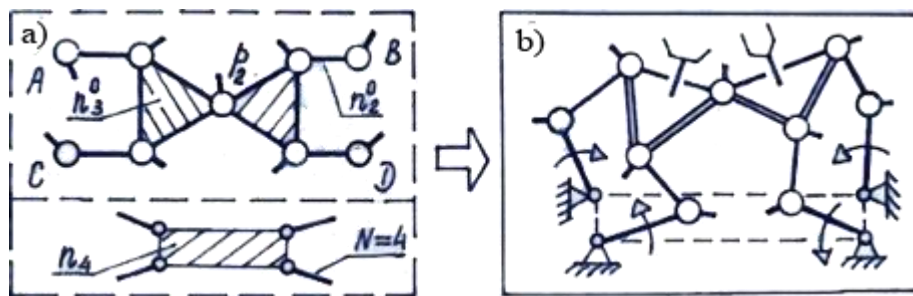


Рис. 8. Процесс структурного синтеза механизма двухплатформенного манипулятора: а) БСГ $n^0 = 6 \Rightarrow n_2^0 = 4, n_3^0 = 2$; $f_{\Sigma}^0 = 18$); б) РМ ($\tilde{n} = 11 \Rightarrow n_2 = 8; n_3 = 2; n_4 = 1$)

Метод синтеза рычажных и многосателлитных планетарных механизмов на основе «Универсальных структурных таблиц»

Указанный в справочнике конструктора [3] метод построения многопоточных (многосателлитных) планетарных передач выравниванием нагрузок между всеми отдельно плавающими зубчатыми сателлитами заключается в установке между заданным числом сателлитов « k » ($2 \leq k \leq k_{\max}$) и введением дополнительного 15-звенного уравнительного рычажного механизма (т.е. более сложного, чем основной планетарный механизм).

Предлагаемый алгоритм оптимального структурного синтеза ($q=0$) многопоточного планетарного механизма (ПМ) со всеми равномерно нагруженными сателлитами ($k=k_0$) впервые позволяет точно решить данную задачу синтеза при неизвестном числе k_0 сателлитов и включает: 1) Выбор из полного пакета «Универсальных структурных таблиц» [9] со всеми 202 возможными ($q=0$) расчётными из (6) кодами строения (4-14)-звенных механизмов с $W=1$, $K \leq 6$, $H=1$ и $0 \leq V \leq 2$ ($K-1$) всех подходящих структур (этап 1).

2) Структурный синтез рычажного механизма-аналога, реализующего выбранный из «Универсальных таблиц» (если таковое решение данной задачи возможно при $q=0$) код строения механизма вида $[LA]=[n_2 \ n_3 \ n_4 \ \dots]/V$, определяющий требуемый набор всех i -шарнирных звеньев и j -кратных одноподвижных соединений (этап 2).

3) Замена рычажного механизма-аналога на планетарный и определение оптимального числа k_0 сателлитов, обеспечивающего наиболее полное структурное решение данной задачи (этап 3).

Выполненный согласно этому алгоритму (с учетом впервые установленного в работе автора [8] необходимого критерия строения: $n_3=2n_4$) показывает, что во всем диапазоне $4 \leq \tilde{n} \leq 14$ существует единственный набор рычажных звеньев [9]:

$$[LA]/V=[n_2 \ n_3 \ n_4 \ n_5 \ n_6]/V=[64 \ 200]/v=0 \Rightarrow n_2=6, \ n_3=4, \ n_4=2,$$

реализованный на рис.9 в виде синтезированного трёхсателлитного механизма с плавающей шестернёй.

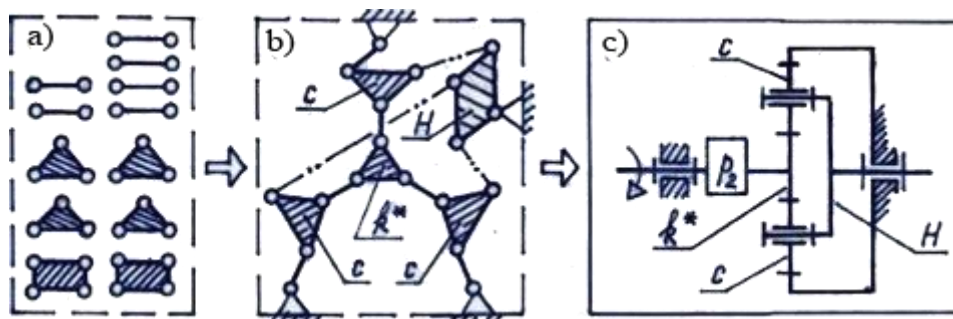


Рис. 9. процесс структурного синтеза многопоточной планетарной передачи:
a) табличный код строения $[LA]/V=[64200]/V=0$; *b)* расчётный рычажный аналог ($\tilde{n} = 12$) преобразованный в синтезированный *c)* планетарный механизм ($\tilde{n} = 6$; $k_0 = 3$; $q = 0$)

Выводы

1. В дополнение к обоим известным (well-known [1], [6]) принципам строения \tilde{n} -звенных механизмов Ассура и Гриблера предлагается новый принцип построения K -контурных самоустанавливающихся механизмов:

«Механизм можно образовать без добавления в цепь входных звеньев – путём замыкания между собой внешних пар открытой кинематической K -цепи

расчётных базовых структурных групп (БСГ) или путём соединения между собой шарнирных многозвенников посредством двухшарнирных рычажных звеньев».

2. Предлагаемые новые методы и алгоритмы оптимального ($q=0$) структурного синтеза, а также универсальные структурные формулы и уравнения позволяют создавать на уровне изобретений (например, [15], [16], [17]) разнообразные К-контурные плоские и пространственные рычажные и зубчатые механизмы для работы во всём полном h -пространстве движений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ассур Л.В. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. – М: Изд-во АМ СССР, 1952, 529с.
- [2] Кожевников С.Н. Основания структурного синтеза механизмов. – Киев: Наукова Думка, 1979, 232с.
- [3] Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы. –М: Машиностроение, 1979, 334с.
- [4] Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. Система проектирования плоских рычажных механизмов. – М: 1988, 232с.
- [5] Смелягин А.И. Структура машин, механизмов и конструкций. – М: Инфра-М, 2019, 387с.
- [6] Grubler M. Getriebelehre. – Berlin: Springer, 1917. – Bd 7. 154S.
- [7] Ding H.F., Hou F.M. and Kecskemethy A. Synthesis of the whole family 1-DOF kinematic chains. Mech. Mach. Theory. – 2014. – Vol.47. – pp. 1-15.
- [8] 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.
- [9] Пожбелко В.И. Единая теория структуры, синтеза и анализа многозвенных механических систем с геометрическими, гибкими и динамическими связями звеньев. Часть 1. // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2020.Т9. (726). –С. 24-44.
- [10] Babichev, D., Evgrafov, A. and Lebedev, S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC-2019. Vol.73. Springer, 2019, pp. 559-568.
- [11] Пожбелко В.И. Универсальный метод структурного синтеза и построения полного атласа многоконтурных ортогональных структур самоустанавливающихся рычажных механизмов в машиностроении. //Известия ВУЗов. Машиностроение. -2023. -№3. –С. 55-73.
- [12] Sun, W., Kong, J., and Sun, L., A novel graphical joint-joint adjacent matrix method for the automatic sketching of kinematic chains with multiple joints. 2020. Mechanism and Machine Theory, No. 150, pp. 1-15.

- [13] Pozhbelko V.I. A new molecular approach for creative design of multiloop linkages and planetary gear mechanisms via novel NTG-graph representation. In: Evgrafov A. (eds.) Advances in Mechanical Engineering. MMSE-2023. LNME: 21-34. Springer. Cham (2024).
- [14] Pozhbelko V.I. Kuts E.N. A new structural synthesis method of multiloop linkage mechanisms with multiple joints. In: Evgrafov A. (eds.) Advances in Mechanical Engineering. MMSE-2022. LNME: 113-123. Springer, Cham (2023)
- [15] Пожбелко В.И. Пространственный манипулятор относительного манипулирования. Патент RU на изобретение №2758374. Бюл. №31, 2021.
- [16] Пожбелко В.И. Шарнирный многовершинный механизм. Патент RU на изобретение №2777123. Бюл. №22, 2022.
- [17] Пожбелко В.И. Складывающийся многократный параллелограммный механизм. Патент RU на изобретение №2810882. Бюл. №1, 2023

V.I.Pozhbelko

AN NEW METHODS AND ALGORITHMS FOR PARADOXICAL, NORMAL AND TABULAR STRUCTURAL SYNTHESIS OF MULTILOOP LINKAGES AND PLANETARY SELF-ALIGNING MECHANISMS

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

Abstract

The paper presents a novel methods and algorithms of optimal structural synthesis (paradoxical, normal and tabular kinds) to design pf multiloop linkages and planetary gear trains without harmful redundant connections in all the closed loops. The ones effectiveness is confirmed by various synthesized plane and spatial multi-body mechanisms and inventions for technics.

Key words: parallel mechanisms, structural synthesis, redundant constraints, closed loops, universal structural equations.

REFERENCES

- [1] Assur L.V. Investigation of flat rod mechanisms with low pairs from the point of view of their structure and classification. Moscow: Publishing House of the USSR, 1952, 529p.
- [2] Kozhevnikov S.N. bases of structural synthesis of mechanisms. – Kiev: Naukova Dumka, 1979, 232 p.
- [3] Reshetov L.N. Self-aligning mechanisms. –Moscow: Mashino-stroenie, 1979, 334 p.
- [4] Peisakh E.E., Nesterov V.A. The design system of flat lever mechanisms. - M: 1988, 232 p.

- [5] Smelyagin A.I. The structure of machines, mechanisms and structures. – Moscow: Infra-M, 2019, 387 p.
- [6] Grubler M. Getriebelehre. – Berlin: Springer, 1917. – Bd 7. 154 p.
- [7] Ding H.F., Hou F.M. and Kecskemethy A. Synthesis of the whole family 1-DOF kinematic chains. Mech. Mach. Theory. – 2014. – Vol.47. – pp. 1-15.
- [8] 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.
- [9] Pozhbelko V.I. Unified theory of structure, synthesis and analysis of multi-link mechanical systems with geometric, flexible and dynamic links. // Izvestiya VUZov. Mechanical engineering. -2020.-T9 (726). –pp. 24-44.
- [10] Babichev, D., Evgrafov, A. and Lebedev, S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC-2019. Vol.73. Springer, 2019, pp. 559-568.
- [11] Pozhbelko V.I. An universal method of structural synthesis and construction of a complete atlas of multi-contour orthogonal structures of self-installing lever mechanisms in mechanical engineering. //Izvestiya VUZov. Mechanical engineering. -2023. -No.3. –pp. 55-73.
- [12] Sun, W., Kong, J., and Sun, L., A novel graphical joint-joint adjacent matrix method for the automatic sketching of kinematic chains with multiple joints. 2020. Mechanism and Machine Theory, No. 150, pp. 1-15.
- [13] Pozhbelko V.I. A new molecular approach for creative design of multiloop linkages and planetary gear mechanisms via novel *NTG*-graph representation. In: Evgrafov A. (eds.) Advances in Mechanical Engineering. MMSE-2023. LNME: 21-34. Springer. Cham (2024).
- [14] Pozhbelko V.I. Kuts E.N. A new structural synthesis method of multiloop linkage mechanisms with multiple joints. In: Evgrafov A. (eds.) Advances in Mechanical Engineering. MMSE-2022. LNME: 113-123. Springer, Cham (2023)
- [15] Pozhbelko V.I. Spatial manipulator of relative manipulation. RU patent for the invention No.2758374. Bull. No.31, 2021.
- [16] Pozhbelko V.I. Hinged multi-vertexes mechanism. RU patent for the invention No.2777123. Bull. No.22, 2022.
- [17] Pozhbelko V.I. A folding multiple parallelogram mechanism. RU patent for the invention No.2810882. Issue No. 1, 2023