

- химии / Под ред. А.А. Евдокимова. – М.: изд. МГТУ МИРЭА, 2014. – 48 с.
7. Топливные элементы: Сборник статей / Под ред. В. Митчелла; пер. с англ. Н.Е. Кванталиани, под ред. А.А. Азовцева. – Ленинград: Судостроение, 1966. – 376 с.
 8. Ч и р к о в Ю.Г. Топливные элементы: с земли на луну // Наука и жизнь. 1981. № 6. С. 77 – 83.
 9. Н е ф е д к и н С.И., Л и п и л и н А.С. Каким быть экологически чистому городскому автомобилю? Перспективы использования ТОТЭ на автомобильном транспорте. – В кн.: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием «Твердоокисные топлив-
ные элементы и энергоустановки на их основе». – Черноголовка, 2010. С. 109 – 110.
 10. Г о л о в а н о в Л.В. Экспериментальный электромобиль HydroGen 1 на базе Opel Zafira // Авторевю. 2000. № 13-14. С. 22, 23.
 11. P e r r y M.L., F u l l e r T.F. A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century // Journal of the Electrochemical Society. 2002. Vol. 149. № 7. P. 59 – 67.

© 2016 г. О.В. Шугаев, Т.П. Воскресенская
Поступила 26 августа 2016 г.

УДК 621.01

Л.Н. Гудимова

Сибирский государственный индустриальный университет

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМЫХ И ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЙ ПОЛНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Началом развития теории структуры можно считать 1869 г. В этом году на II съезде русских естествоиспытателей академиком П.Л. Чебышевым сделан доклад «О параллелограммах» [1], на котором впервые было представлено уравнение, определяющее условие существования плоского шарнирного параллелограммного механизма. Последующие исследования таких ученых, как М.Ф. Грюблер [2], Л.В. Ассур [3], А.П. Малышев [4], В.В. Добровольский [5], И.И. Артоболевский [6], Г.Г. Баранов [7], С.Н. Кожевников [8], Л.Н. Решетов, Ч.Ф. Кетов, Н.И. Колчин [9], У.А. Джолдасбеков, Л.Т. Дворников и др., позволили не только создать современную теорию структуры кинематических цепей, но и поставить ряд задач, решение которых настоятельно требует дальнейшего разрешения. Одной из них является задача полной идентификации кинематических цепей.

Известно, что из различных по сложности звеньев, отличающихся числом их геометрических элементов, входящих между собой в кинематические пары разных классов и с разным количеством контактов, могут создаваться сколь угодно сложные кинематические цепи, которые при выполнении определенных усло-

вий реализуются в виде пригодных для практики механизмов.

Несмотря на то, что понятие «кинематические цепи» используется очень широко и с давних времен, классифицируются они до сих пор лишь по следующим признакам: по видам относительного движения звеньев – плоские и пространственные; по характеру замыкания звеньев – открытые и замкнутые; по сложности – простые и сложные [6, 10]. Такая классификация является не только не полной, но и недостаточной, так как не позволяет осуществлять полную идентификацию кинематических цепей внутри каждого из трех вышеперечисленных классификационных признаков, а также не дает возможности в полной мере проводить их анализ и тем более осуществлять синтез кинематических цепей.

В настоящей работе решается задача обоснования необходимых и достаточных классификационных параметров кинематической цепи. Поставленная задача может быть вполне разработанной лишь в том случае, если сам объект исследования (кинематическая цепь) получит полную идентификацию или полную его распознаваемость. Изучение особенностей и свойств кинематических цепей позволило не

только обосновать те критерии – параметры, по которым кинематические цепи могут отличаться друг от друга, но и установить взаимозависимости между необходимыми (существующими) и достаточными (введенными) параметрами.

Прежде всего, не вызывает сомнений отличие цепей по существующим трем основным параметрам: числу используемых в них звеньев n (простые и сложные), потому, в каких пространствах они могут функционировать (плоские и пространственные). Параметром, отличающим их по этому условию, является параметр Добровольского – Артоболевского – m , относящий цепь к тому или иному семейству – четвертому ($m = 4$), третьему ($m = 3$), второму ($m = 2$), первому ($m = 1$) или нулевому ($m = 0$), а также параметр τ , определяющий самое сложное (базисное) звено по числу добавляемых в цепь кинематических пар (τ – угольник или τ – вершинник) [4].

Проведенные исследования позволяют утверждать, что вне зависимости от существующих параметров n , m и τ цепи принципиально отличаются друг от друга следующими дополнительными (предлагаемыми) параметрами: числами их ветвей γ , числами выходов цепи δ , числами изменяемых замкнутых контуров α и их сложностью α_i . Параметр γ определяет сложность структуры кинематической цепи, так как присоединение звеньев к базисному звену τ приводит к ее ветвлению и определяется формулой $\gamma = \sum p_k - (n - 1)$. Ветви могут заканчиваться либо свободными парами, определяющими число выходов цепи δ , которыми цепь встраивается в другую цепь или соединяется с другими звеньями, включая стойку, либо не иметь свободных пар, т. е. не добавлять в цепь кинематических пар. Замыкание свободных пар между собой дополнительным звеном приводит к образованию в

цепи замкнутого контура α , что уменьшает число свободных выходов, т.е. между этими параметрами устанавливается взаимосвязь вида $\gamma = \delta + \alpha$.

Покажем на рис.1 обобщенную сложную многозвенную кинематическую цепь с виртуальными кинематическими парами, которые в реальных цепях могут быть различных классов и разной контактности с описанием значений введенных параметров. Эта цепь состоит из общего числа звеньев $n = 22$, общего числа пар $\sum p_k = 30$, содержит базисное звено $\tau = 5$, имеет число выходов $\delta = 7$, два изменяемых замкнутых контура ($\alpha = 2$), сложность которых – α_5 (пятиугольный) и α_4 (четырёхугольный).

Установим зависимости между известными n , τ , m и введенными γ , α , δ параметрами. Для этого воспользуемся понятием и формулой, определяющей суммарное число сторон цепи [11]:

$$\lambda_c = \tau + \tau n_{\tau-1} + (\tau-1)n_{\tau-2} + \dots + (i-1)n_i + \dots + 3n_2 + 2n_1.$$

Имея полное основание полагать, что суммарное число сторон цепи определяется количеством кинематических пар в ней, найдем разницу между λ_c и $\sum p_k = \tau + (\tau-1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 3n_2 + 2n_1$:

$$\lambda_c - \sum p_k = \tau + \tau n_{\tau-1} + (\tau-1)n_{\tau-2} + \dots + (i+1)n_i + \dots + 3n_2 + 2n_1 - \tau - (\tau-1)n_{\tau-1} - \dots - in_i - \dots - 2n_2 - n_1 = (n-1), \text{ т.е. } \lambda_c = \sum p_k + (n-1).$$

Полученная формула определяет число сторон цепи без изменяемых замкнутых контуров, в цепях же с изменяемыми замкнутыми контурами число замыкающих звеньев равно числу контуров α , и в таких цепях суммарное число сторон составит $\lambda_{ck} = \lambda_c + \alpha$.

Теперь рассмотрим систему, состоящую из трех уравнений: первое определяет число ветвей (γ), второе – суммарное число сторон (λ_{ck}), третье – подвижность кинематической цепи (W):

$$\begin{cases} \gamma = \sum p_k - (n-1); \\ \lambda_{ck} = \sum p_k + (n-1) + \alpha; \\ W = (6-m)n - \sum (k-m) \sum p_k, \end{cases} \quad (1)$$

где k – класс используемых кинематических пар.

Выразим суммарное число кинематических пар $\sum p_k$ из третьего уравнения системы (1), подставим его во второе и получим суммарное число сторон для открытых кинематических цепей

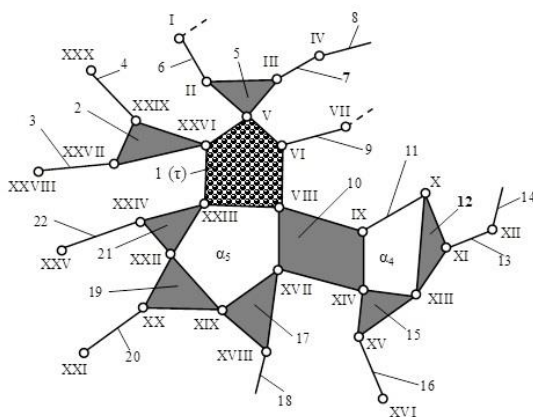


Рис. 1. Обобщенная сложная многозвенная кинематическая цепь с виртуальными кинематическими парами

$$\lambda_{\text{ск}} = \frac{(6-m)n-W}{\sum(k-m)} + (n-1) + \alpha. \quad (2)$$

При подстановке $\sum p_k$ в первое уравнение системы (1) находим число ветвей

$$\gamma = \frac{(6-m)n-W}{\sum(k-m)} - (n-1). \quad (3)$$

Учитывая зависимость между параметрами γ , α , δ , получим число выходов цепи:

$$\delta = \frac{(6-m)n-W}{\sum(k-m)} - (n-1) - \alpha. \quad (4)$$

При решении системы (1) для замкнутых цепей, т.е. не имеющих свободных кинематических, в которых $\delta = 0$, а $\gamma = \alpha$, суммарное число сторон определится формулой

$$\lambda_{\text{ск}} = \frac{2[(6-m)n-W]}{\sum(k-m)}. \quad (5)$$

В силу того, что число ветвей цепи определяется сложностью базисного звена τ , что является важным и для идентификации, и для синтеза структур кинематических цепей, определим максимально возможное его значение, решая следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum p_k = \tau + (\tau-1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1; \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1 + n_0; \\ W = (6-m)n - \sum(k-m)\sum p_k. \end{cases} \quad (6)$$

Для открытых кинематических цепей при условии, что самой простой цепью будет такая, в которой сложные звенья отсутствуют и нет замыкающего звена, т.е. $n_{\tau-1} = \dots = n_i = \dots = n_2 = n_0 = 0$, из первого уравнения системы (6) получим, что $\sum p_k = \tau + n - 1$. При подстановке этого значения в третье уравнение системы (6) находим, что

$$\tau_{\text{max}} = \frac{n[(6-m) - \sum(k-m)] - W}{\sum(k-m)} + 1. \quad (7)$$

Для замкнутых кинематических цепей наличие звена, замыкающего цепь и не добавляющего кинематических пар, обязательно, т.е. $n_0 \neq 0$, тогда решением системы уравнений (6) при условии, что суммарное число кинематических составит $\sum p_k = \tau + n - 1 - n_0$, а минимальное число замыкающих звеньев $n_{0 \min} = 1$, получим

$$\tau_{\text{max}} = \frac{n[(6-m) - \sum(k-m)] - W}{\sum(k-m)} + 2. \quad (8)$$

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что необходимыми и обязательными идентификационными параметрами кинематических цепей должны быть:

– сложность базисного звена τ – определяющая ее вид (7), (8);

– параметр m – отличающий их по семействам;

– число звеньев n , число ветвей γ (3) и число изменяемых замкнутых контуров α (4) – определяющие сложность цепи;

– число выходов δ (4) – характеризующее число свободных кинематических пар;

– сложность замкнутых контуров α_i – определяющих класс, а наличие нескольких различных по сложности изменяемых замкнутых контуров – подкласс цепи.

Покажем, что именно введенные классификационные параметры являются и необходимыми и достаточными для установления отличительных свойств между кинематическими цепями.

В качестве примера рассмотрим два механизма, структуры которых приведены на рис. 2.

По существующей классификации обе кинематические цепи являются механизмами (так как подвижность $W = 3n - 2p_5 = 3 \cdot 7 - 2 \cdot 10 = 1$) относятся к открытым, сложным ($n = 8$), плос-

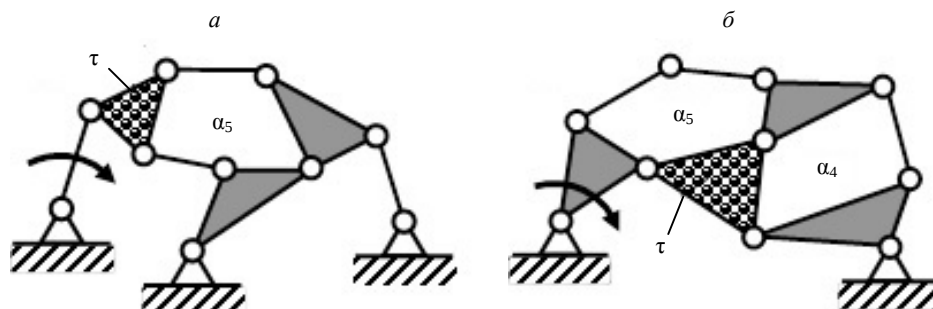


Рис. 2. Сложные открытые плоские механизмы

ким ($m = 3$) кинематическим цепям с базисным трехпарным звеном ($\tau = 3$). Тем не менее структурно они существенно отличаются между собой. И эти отличия можно установить только по введенным дополнительным параметрам.

Так, механизм показанный на рис. 2, *а* имеет три выхода $\delta = 3$, один замкнутый контур $\alpha = 1$ и сложность контура – пятиугольный, а механизм, приведенный на рис. 2, *б*, имеет два выхода $\delta = 2$ и два изменяемых замкнутых контура $\alpha = 2$ различной сложности – пятиугольный и четырехугольный.

Выводы. Введенные дополнительные идентификационные критерии – параметры: число ветвей γ цепи, число выходов цепи δ , число изменяемых замкнутых контуров α и их сложность α_i , позволили в полной мере идентифицировать любую кинематическую цепь, а найденные взаимозависимости между известными и введенными параметрами – разработать универсальный метод синтеза структур [12 – 14], в основу которого были положены принцип построения цепей и универсальная структурная система.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чебышев П.Л. О параллелограммах. Полное собрание сочинений П.Л. Чебышева. Т. IV. Теория механизмов. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – 254 с.
2. Gröbler M. Allgemeine Eigenschaften für Zwangläufigen ebenen kinematischen Ketten // *Civining*. 1883. Vol. 29. pp. 167 – 200.
3. Ассур Л.В. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. Ч. 1. Учение о нормальных многоповодковых цепях и роль их в образовании механизмов // *Известия Петроградского политехнического ин-та*. 1914. Т. XX и Т. XXI.
4. Малышев А.П. Прикладная механика. Анализ и синтез механизмов с точки зрения их структуры // *Известия Томского технологического ин-та*. 1923. Т. 44. Вып. 2. С. 29 – 52.
5. Доровольский В.В., Артоблевский И.И. Основные принципы рациональной классификации механизмов. – В кн.: Структура и классификация механизмов. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1939. С. 5 – 48.
6. Артоблевский И.И. Теория механизмов: Учебник. – М.: Наука, 1965. – 776 с.
7. Баранов Г.Г. Классификация, строение, кинематика и кинетостатика плоских механизмов с парами первого рода. – Тр. Семинара по теории механизмов и машин. – М.: Наука, 1952. Вып. 46, № 2. С. 15 – 39.
8. Кожеников С.Н. Основания структурного синтеза механизмов. – Киев: Наукова думка, 1979. – 232 с.
9. Колчин Н.И. Механика машин. Т1. Л.: изд. ЛПИ, 1971. – 560 с.
10. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов. – Новокузнецк: изд. СибГТМА, 1994. – 102 с.

© 2016 г. Л.Н. Гудимова
Поступила 23 сентября 2016 г.