



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 621.865.8

О.Д. ЕГОРОВ, канд. техн. наук
доцент кафедры «Робототехника и мехатроника»¹
E-mail: egorovod@yandex.ru

М.А. БУЙНОВ
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника»¹
E-mail: mak5273@yandex.ru

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 14.09.2015.

МЕТОД СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЗМОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Предложен новый метод структурного анализа механизмов мехатронных устройств и роботов. Представлены формулы для аналитического определения числа избыточных и метрических связей, лишней подвижностей и лишних звеньев, возникающих в контурах механизмов. Приведены условные графические изображения кинематических пар и степеней подвижности. Показаны примеры структурного анализа механизмов и способы устранения выявленных избыточных связей и лишней подвижностей.

Ключевые слова: механизм, структурный анализ, избыточная связь, лишняя подвижность, метрическая связь, подвижность, степень подвижности

Введение. Робототехнические и мехатронные устройства предназначены для преобразования энергии, материалов и информации с целью замены или облегчения физического и умственного труда человека. Эти устройства построены на принципах синергетической интеграции механических, электротехнических, электронных, информационных и компьютерных элементов [1–6]. Синергетическая интеграция заключается в объединении в целостной системе элементов различной физической природы для достижения одной цели — качественного исполнения требуемого функционального преобразования [7].

Механическими компонентами в робототехнических и мехатронных устройствах являются механизмы — это системы твердых тел, подвижно соединенных между собой различными видами связей, реализующие управляемые двигательные функции, т. е. осуществляющие преобразования управляемого движения одного или нескольких тел системы в требуемые управляемые движения других тел.

Под связями в механизмах понимают ограничения, накладываемые на относительные движения

каждого звена кинематической пары (КП), зависящие от способов соединения звеньев пары [8].

Для приведения механизма в движение необходимо задать одному или нескольким звеньям управляемые обобщенные координаты, т. е. установить в кинематических парах двигателя. Те КП, в которых установлены двигатели, предлагаем называть степенями подвижности (СП). СП может сообщать звену пары одну или несколько обобщенных координат в зависимости от класса КП.

Рассмотрим исполнительный механизм робота (рисунок 1). Для обеспечения перемещения в пространстве тела М, закрепленного в схвате робота, ему необходимо задать три обобщенные координаты: q_1 — вращение звена 1 вокруг своей продольной оси, q_2 — выдвигание звена 1 и q_3 — выдвигание звена 5. Для обеспечения требуемой ориентации тела М в пространстве звену 3 робота необходимо задать три вращательные обобщенные координаты: q_4 , q_5 и q_6 .

Для задания всех обобщенных координат необходимо установить в кинематических парах шесть двигателей: два двигателя в паре A_4 , один двигатель в паре B_5 и три двигателя в паре C_3 . Таким образом,

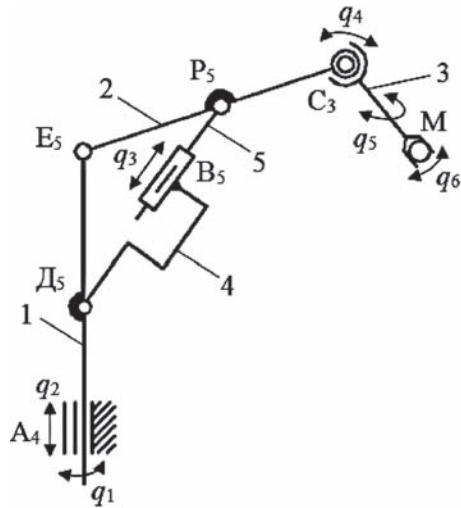


Рисунок 1 — Исполнительный механизм робота

пары A_4 , B_5 и C_3 превращаются в степени подвижности. Пары D_5 , E_5 и P_5 не содержат двигателей, не сообщают управляемые движения звеньям механизма, и поэтому они остаются просто кинематическими парами.

На структурных и кинематических схемах механизмов нужно уметь различать кинематические

пары и степени подвижности. Поэтому предлагаем СП графически изображать иначе, нежели КП, но близкими к ним условными графическими изображениями. В таблице приведены существующие условные графические изображения КП [9] и предлагаемые условные графические изображения СП.

Основой любого механизма является кинематическая цепь (КЦ), т. е. соединение нескольких звеньев между собой при помощи КП. Кинематическую цепь, состоящую из стойки, подвижных звеньев и КП с указанием их вида и взаимного расположения, называют структурной схемой механизма. Ее используют при проведении структурного анализа механизма, который проводят с применением структурных формул.

Структурная формула, по которой определяют число степеней свободы плоского механизма, предложенная П.Л. Чебышевым, имеет вид [9]:

$$W_{\text{п}} = 3n - \sum_{i=4}^5 (i-3)p_i, \quad (1)$$

где $W_{\text{п}}$ — число степеней свободы плоского механизма; n — число подвижных звеньев механизма; i — класс КП; p_i — число КП i -го класса; цифра 4 относится к высшим КП; цифра 5 — к низшим КП.

Таблица — Обозначения кинематических пар и степеней подвижности

Класс и число связей	Наименование соединения	Условное графическое изображение и обозначение	
		кинематической пары	степени подвижности
5	Одноподвижное (вращательное)		
	Одноподвижное (поступательное)		
	Одноподвижное (винтовое)		
	Одноподвижное (шарико-винтовое)		
4	Двухподвижное (цилиндрическое)		
	Двухподвижное (сферическое)		
3	Трехподвижное (сферическое)		
2	Четырехподвижное (линейное)		
1	Пятиподвижное (точечное)		

Позднее формулы, тождественные предложенной П.Л. Чебышевым, были получены М. Грюблером и А. Клейном [10, 11].

Для определения числа степеней свободы пространственных механизмов используют формулу, предложенную А.П. Малышевым:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^6 ip_i, \quad (2)$$

где W — число степеней свободы пространственного механизма.

В дальнейшем было установлено, что механизмы с плоскими и пространственными замкнутыми КЦ содержат один или несколько замкнутых контуров, а с разомкнутыми — могут содержать местные замкнутые контуры. Число замкнутых контуров механизма определяют по формуле Х.И. Гохмана [9]:

$$K = \sum_{i=1}^5 p_i - n. \quad (3)$$

Замкнутый контур может накладывать на относительные движения звеньев механизма некоторое количество избыточных контурных связей (ИКС), которые ухудшают процесс его функционирования [12]. Л.Н. Решетов предложил в формулу (2) ввести дополнительный член S , учитывающий общее число ИКС всего механизма. В результате формула (2) приобрела следующий вид [13]:

$$W_0 = 6n - \sum_{i=1}^6 ip_i + S, \quad (4)$$

где W_0 — число степеней свободы основной структурной схемы механизма, т. е. структурной схемы, содержащей минимальное число подвижных звеньев и КП.

В выражении (4) два неизвестных параметра — W_0 и S . Для структурного анализа механизма необходимо каким-либо образом определить один из них.

В настоящее время число избыточных контурных связей S определяют, принимая W_0 из рассмотрения структурной схемы механизма: в более простых случаях на основе геометрических соображений без каких-либо аналитических расчетов, в более сложных случаях путем исследования функций положения звеньев [14, 15] (в большинстве случаев принимают $W_0 = 1$) по формуле:

$$S = W_0 - 6n + \sum_{i=1}^6 ip_i. \quad (5)$$

Зависимость (5) дает возможность при известном W_0 определить только общее число ИКС всего механизма. Но он может состоять из нескольких замкнутых контуров, и каждый контур может обладать определенным числом ИКС. Эта формула не позволяет их определить и правильно устранить.

Данный подход к определению ИКС не совсем надежен, так как выделить в механизме основную структурную схему довольно сложно [16–18].

Также формула (5) не учитывает такие структурные особенности механизма, как наличие лишних контурных подвижностей (ЛКП) (возможность звена проворачиваться вокруг своей продольной оси или нескольких звеньев вокруг их общей оси вращения, не оказывая влияния на функциональные возможности механизма), лишних звеньев (звеньев, которые не оказывают влияния на его функциональные возможности, но влияют на качество работы) (ЛЗ) и метрических (пассивных [8]) связей (связей, которые повторяют ограничения на относительные движения звеньев в механизме [19]) (МС), что не позволяет корректно проводить структурный анализ механизмов.

Поэтому предлагаем иной подход к проведению структурного анализа механизмов.

Структурные формулы механизмов. Целью работы является усовершенствование формулы Малышева для проведения структурного анализа пространственных механизмов за счет учета в ней ИКС, ЛКП, ЛЗ и МС механизма.

Основной задачей работы является нахождение числа степеней свободы, ИКС, ЛКП, ЛЗ и МС механизмов, а также указание способов их устранения.

Число степеней свободы пространственных, а также плоских механизмов предлагаем определять по формуле:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + \sum_{j=1}^K S_j - \sum_{l=1}^K Z_l + \sum_{m=1}^K T_m, \quad (6)$$

где K — число замкнутых контуров; S_j — число избыточных связей j -го замкнутого контура механизма; Z_l — число лишних звеньев l -го контура механизма; T_m — число метрических связей m -го контура механизма.

Первые два члена в формуле (6) отражают топологию механизма, т. е. число его звеньев и порядок их соединения кинематическими парами. Последние три члена учитывают свойства замкнутых контуров механизма.

Плоский замкнутый контур, образованный КП только 5-го класса вносит в контур три ИКС. Если КП в замкнутом контуре, кроме 5-го класса, могут быть 4, 3, 2 и 1-го классов, т. е. иметь дополнительные подвижности, то число ИКС такого контура меньше, чем у плоского. В общем случае число ИКС j -го контура механизма предлагаем определять по формуле:

$$S_j = 3 - \sum_{i=1}^5 (m-i) p_i, \quad (7)$$

где p_i — число кинематических пар i -го класса замкнутого контура, которые не были рассмотрены до этого в других контурах; m — модификатор, учитывающий тип кинематических пар:

$$m = \begin{cases} 5 & \text{— для низших кинематических пар (5, 4 и 3-го классов);} \\ 4 & \text{— для высших кинематических пар (2-го и 1-го классов).} \end{cases}$$

Отрицательное значение S_j указывает на то, что появились лишние контурные подвижности (ЛКП).

Устранение ИКС осуществляют понижением класса некоторых КП контура, устранение ЛКП — повышением их класса [20, 21].

Наличие избыточных контурных связей и лишних контурных подвижностей в структурной схеме механизма указывает на то, что механизм обладает структурной избыточностью.

Структурную избыточность всего механизма предлагаем определять по формуле:

$$S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^K S_j. \quad (8)$$

Кроме ИКС и ЛКП в контурах механизма могут быть лишние звенья, которые не оказывают влияния на его функциональные возможности, но влияют на качество его работы.

Рассмотрим кулачковый механизм с роликовым толкателем (рисунок 2 а). Он состоит из кулачка 1, ролика 2 и толкателя 3. Вращение кулачка 1 через ролик 2 вызывает перемещение толкателя 3.

Ролик 2 предназначен для замены трения скольжения между кулачком и толкателем на трение качения, т. е. для улучшения процесса взаимодействия кулачка и толкателя. Если в механизме применить тарельчатый толкатель (см. рисунок 2 б), то его функциональные возможности не изменятся по сравнению с механизмом на рисунке 2 а, но ухудшатся качественные показатели его работы, т. е. ролик 2 является лишним звеном. Число лишних звеньев механизма предлагаем определять по формуле:

$$Z = \sum_{i=1}^5 (5 - m) p_i. \quad (9)$$

Формула (9) применима только для контуров, состоящих из трех и более звеньев. В контуре, состоящем из двух звеньев, не может быть лишних звеньев, так как минимальное число звеньев, образующих замкнутый контур, равно двум.

В замкнутых контурах механизмов, содержащих пары только 5, 4 и 3-го классов могут появляться метрические связи, которые накладывают

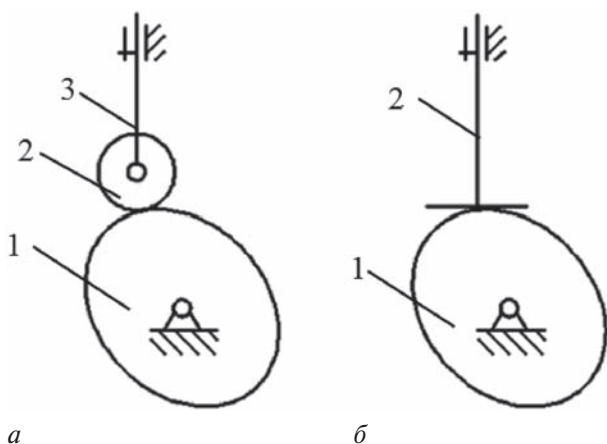


Рисунок 2 — Кулачковый механизм

повторяющиеся ограничения на относительные движения звеньев.

Механизм, изображенный на рисунке 3 а, в случае соединения звеньев СМ и ДН звеном АВ перпендикулярно звену СД, представляет собой ферму. Если звено АВ выбрать равным звену СД и установить так, чтобы выполнялись соотношения $MA = AC = DV = VH$, то оно будет налагать повторяющиеся ограничения на относительные движения звеньев механизма [14], т. е. звено АВ вызывает появление в механизме метрической связи.

Рассмотрим механизм (см. рисунок 3 б), состоящий из винта 1, гайки 2 с ползуном 2' и направляющей 3 [12]. Метрическая связь в данном механизме возникает при непараллельности оси винта 1 и направляющей 3.

На рисунке 3 в приведен аналогичный винтовой механизм без метрической связи. Гайка 2 соединена с направляющим ползуном 2' поступательной кинематической парой 4. В этом случае непараллельность осей винта 1 и направляющей 3 не оказывает влияния на работоспособность механизма.

При структурном анализе механизмов число метрических связей предлагаем определять по следующим формулам:

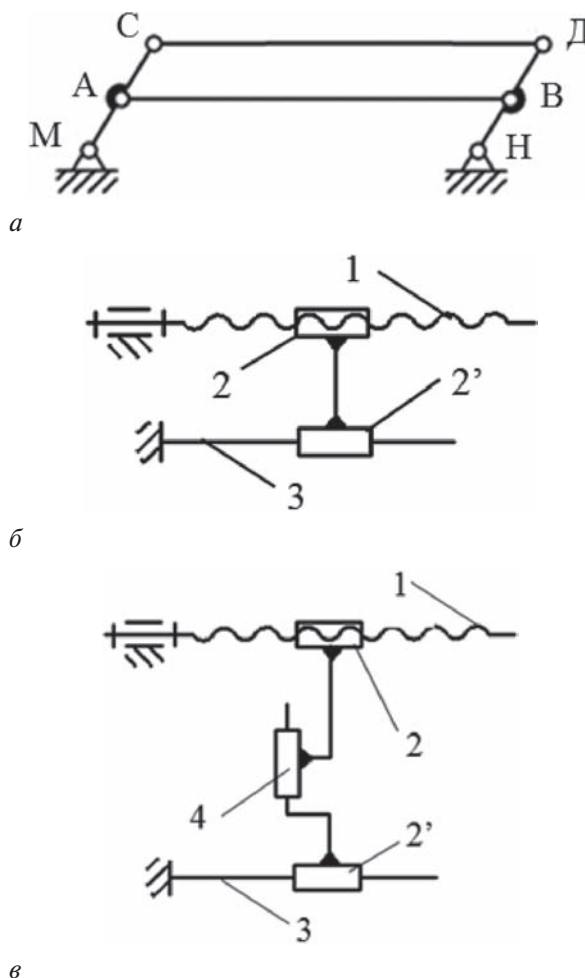


Рисунок 3 — Механизмы с метрическими связями (а, б) и пример их устранения (в)

- для механизмов, содержащих один замкнутый контур:

$$T = 0,5 \left(\frac{2,5 - n_k}{|2,5 - n_k|} + 1 \right), \quad (10)$$

где n_k — число подвижных звеньев замкнутого контура;

- для механизмов, содержащих несколько замкнутых контуров:

$$T = 0,25 \left(1 - \frac{n_k - 3,5}{|n_k - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - n'_k}{|1,5 - n'_k|} + 1 \right), \quad (11)$$

где n'_k — число подвижных звеньев замкнутого контура, не входящих в другие контуры.

Формулы (10) и (11) применимы для расчета контуров, образованных КП 5, 4 и 3-го классов. Если в контуре содержится хотя бы одна пара 2-го или 1-го класса, то такой контур метрических связей не имеет.

Наличие лишних звеньев и метрических связей в механизме указывает на то, что он обладает конструктивной избыточностью.

Для приведения механизма в движение необходимо задать ему обобщенные координаты, т. е. привести в движение приводы, установленные в СП. Число степеней подвижности механизма предлагаем определять по формуле:

$$H = n - \sum_{j=1}^K A_j, \quad (12)$$

где A_j — показатель числа звеньев контура.

Для многоконтурных механизмов его значения равны:

$$A_j = \begin{cases} 2, & \text{если контур состоит из двух и более подвижных звеньев, принадлежащих только данному контуру;} \\ 1, & \text{если контур включает в себя одно звено, принадлежащее только данному контуру.} \end{cases}$$

Для механизмов, содержащих один контур:

$$A_j = \begin{cases} 2, & \text{если контур состоит из трех и более подвижных звеньев;} \\ 1, & \text{если контур состоит из двух подвижных звеньев.} \end{cases}$$

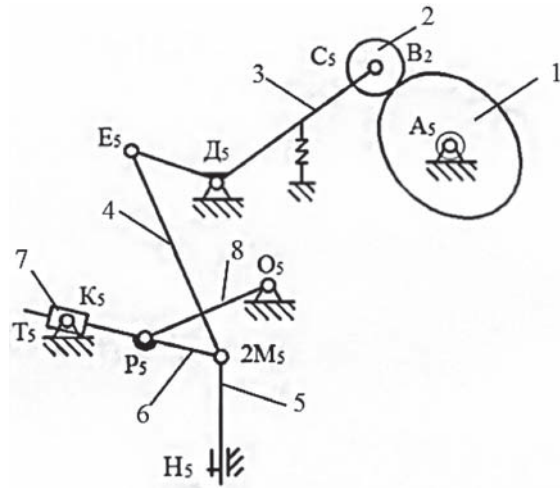
Примеры структурного анализа механизмов. Рассмотрим пример структурного анализа исполнительного механизма мехатронного устройства с использованием предлагаемого метода. Механизм (рисунок 4 а) состоит из восьми подвижных звеньев, одиннадцати пар 5-го класса и одной пары 2-го класса.

Число замкнутых контуров механизма:

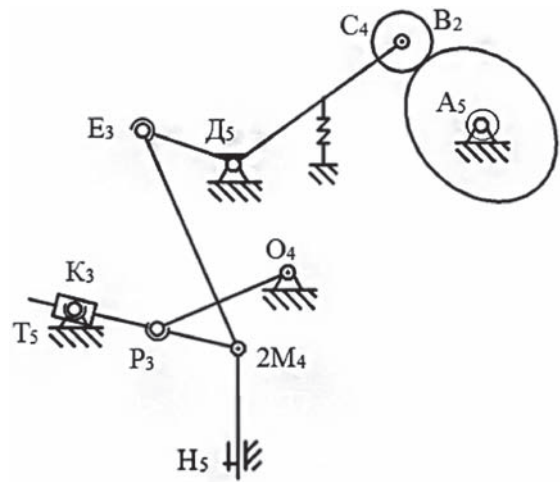
$$K = 12 - 8 = 4.$$

В механизме содержится четыре замкнутых контура: $A_5B_2C_3D_5$; $D_5E_5M_3H_5$; $T_5K_3M_3H_5$ и $T_5K_3P_5O_5$. Каждый контур содержит по три подвижных звена.

Определим число избыточных контурных связей, лишних звеньев и метрических связей каждого контура.



а



б

Рисунок 4 — Исполнительный механизм мехатронного устройства

Первый контур $A_5B_2C_3D_5$ содержит одну пару второго класса B_2 , поэтому метрических связей в нем нет, $T_1 = 0$.

Число избыточных связей контура:

$$S_1 = 3 - (5 - 5)3 - (4 - 2)1 = 1.$$

Число лишних звеньев контура:

$$Z_1 = (5 - 4)1 + (5 - 5)3 = 1.$$

Второй контур $D_5E_5M_3H_5$ состоит из трех подвижных звеньев 3, 4 и 5, два из которых (4 и 5) принадлежат только данному контуру (звено 3 принадлежит первому контуру $A_5B_2C_3D_5$).

Число метрических связей контура:

$$T_2 = 0,25 \left(1 - \frac{3 - 3,5}{|3 - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - 2}{|1,5 - 2|} + 1 \right) = 0.$$

Число избыточных связей контура:

$$S_2 = 3 - (5 - 5)4 = 3.$$

Число лишних звеньев контура:

$$Z_4 = (5 - 5)4 = 0.$$

Третий контур $T_5K_3M_3H_5$ состоит из трех подвижных звеньев 5, 6 и 7, два из которых (6 и 7) принадлежат только данному контуру (звено 5 принадлежит контуру $D_5E_5M_3H_5$).

Число метрических связей контура:

$$T_3 = 0,25 \left(1 - \frac{3-3,5}{|3-3,5|} \right) \left(\frac{1,5-2}{|1,5-2|} + 1 \right) = 0.$$

Число избыточных связей контура:

$$S_3 = 3 - (5 - 5)3 = 3.$$

Число лишних звеньев контура:

$$Z_3 = (5 - 5)4 = 0.$$

Четвертый контур $T_5K_5P_5O_5$ состоит из трех подвижных звеньев 7, 6 и 8, одно из которых (8) принадлежит только данному контуру (звено 2 принадлежит контуру $T_5K_5M_5H_5$).

Число метрических связей контура:

$$T_4 = 0,25 \left(1 - \frac{3-3,5}{|3-3,5|} \right) \left(\frac{1,5-1}{|1,5-1|} + 1 \right) = 1.$$

Число избыточных связей контура:

$$S_4 = 3 - (5 - 5)2 = 3.$$

Число лишних звеньев контура:

$$Z_4 = (5 - 5)4 = 0.$$

Число степеней свободы механизма:

$$W = 6 \cdot 8 - 5 \cdot 11 - 2 \cdot 1 + 10 - 1 + 1 = 1.$$

Число степеней подвижности механизма:

$$H = 8 - 3 \cdot 2 - 1 \cdot 1 = 1.$$

Для приведения механизма в управляемое движение достаточно задать одну обобщенную координату — вращение кулачка 1, т. е. установить один привод в паре A_5 .

Для устранения избыточных контурных связей в механизме заменим пары C_5 , O_5 и M_5 на пары C_4 , O_4 и M_4 , а пары K_5 и P_5 на пары K_3 на P_3 (см. рисунок 4 б).

Возможны и другие варианты замены класса КП (D_5 , E_5K_5 и P_5 на D_4 , E_4K_4 и P_4 ; M_5 и O_5 на M_3 и O_3), приводящие к устранению избыточных контурных связей в механизме, т. е. устранение избыточных контурных связей в механизме представляет собой многовариантную задачу [9].

Рассмотрим пример структурного анализа исполнительного механизма робота [22] (рисунок 5 а).

Механизм состоит из девяти подвижных звеньев, шести пар 5-го класса, двух пар 4-го класса и четырех пар 3-го класса. Определим подвижность механизма, число его степеней подвижности, число ИКС, лишних звеньев и метрических связей.

Число замкнутых контуров механизма:

$$K = 12 - 9 = 3.$$

В механизме содержится три замкнутых контура: $B_3C_3K_3D_3$; $E_3M_3O_3H_3$; $M_3O_3T_3P_3$. Определим число избыточных контурных связей, лишних звеньев и метрических связей каждого контура.

Первый контур $B_3C_3K_3D_3$ состоит из четырех подвижных звеньев 1, 2, 3 и 4, которые не входят в другие контуры. Число метрических связей контура:

$$T_1 = 0,25 \left(1 - \frac{4-3,5}{|4-3,5|} \right) \left(\frac{1,5-4}{|1,5-4|} + 1 \right) = 0.$$

Число избыточных связей контура:

$$S_1 = 3 - (5 - 5)1 - (5 - 3)2 = -1.$$

Отрицательное значение S_1 указывает на то, что имеется лишняя контурная подвижность, т. е. возможность группы звеньев 3 и 4 проворачиваться вокруг оси B_3K_3 , не оказывая влияния на функциональные возможности исполнительного механизма робота.

Число лишних звеньев контура:

$$Z_1 = (5 - 5)4 = 0.$$

Второй контур $E_3M_3O_3H_3$ состоит из четырех подвижных звеньев 2, 5, 6 и 7, три из которых (5, 6 и 7) принадлежат только данному контуру (звено 2 принадлежит контуру $B_3C_3K_3D_3$).

Число метрических связей контура:

$$T_2 = 0,25 \left(1 - \frac{4-3,5}{|4-3,5|} \right) \left(\frac{1,5-3}{|1,5-3|} + 1 \right) = 0.$$

Число избыточных связей контура:

$$S_2 = 3 - (5 - 5)1 - (5 - 3)2 = -1.$$

В контуре имеется одна лишняя подвижность — возможность поворота звена 7 вокруг своей продольной оси E_3H_3 .

Число лишних звеньев контура:

$$Z_2 = (5 - 5)4 = 0.$$

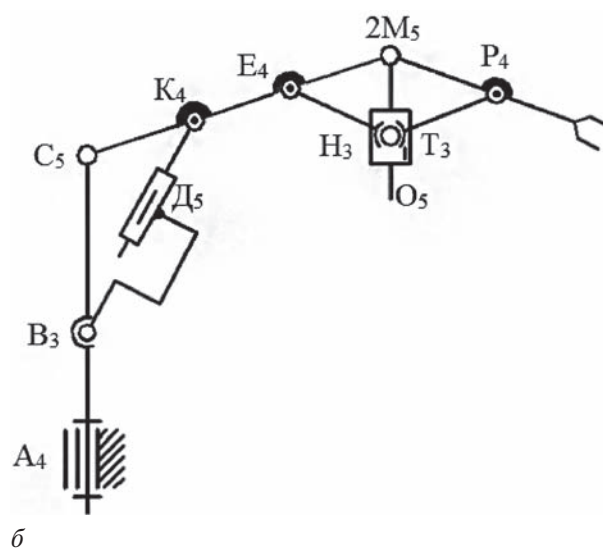
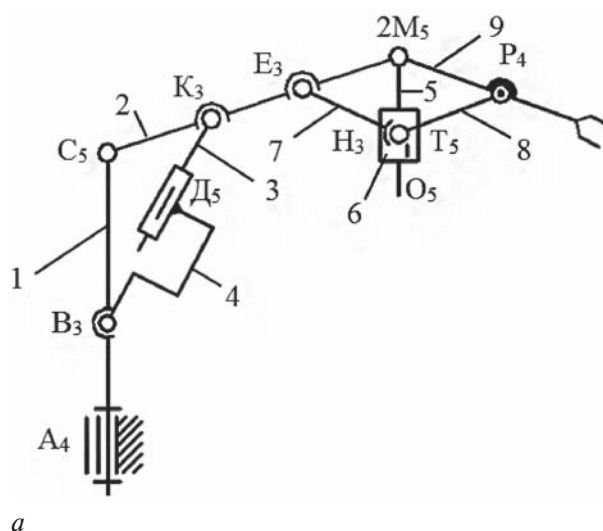


Рисунок 5 — Исполнительный механизм робота

Третий контур $M_3O_3T_5P_4$ состоит из четырех подвижных звеньев 5, 6, 8 и 9, два из которых (8 и 9) принадлежат только данному контуру (звенья 5 и 6 принадлежат контуру $E_3M_3O_3H_3$).

Число метрических связей контура:

$$T_3 = 0,25 \left(1 - \frac{4-3,5}{|4-3,5|} \right) \left(\frac{1,5-2}{|1,5-2|} + 1 \right) = 0.$$

Число избыточных связей контура:

$$S_3 = 3 - (5 - 5)2 - (5 - 4)1 = 2.$$

Число лишних звеньев контура:

$$Z_3 = (5 - 5)4 = 0.$$

Структурная избыточность всего исполнительного механизма равна:

$$S_z = \sum_{j=1}^K S_j = -1 - 1 + 2 = 0.$$

Если бы ИКС определяли по формуле (5), то такой результат указал бы на то, что исполнительный механизм робота спроектирован правильно. В действительности структурная схема требует усовершенствования, так как имеются избыточные связи и лишние подвижности в замкнутых контурах, что может привести за счет перекосов осей КП и деформации звеньев при принужденной сборке к увеличенному трению в КП и даже заклиниванию.

Число степеней свободы исполнительного механизма робота:

$$W = 6 \cdot 9 - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 4 - 1 - 1 + 2 = 4.$$

Число степеней подвижности механизма:

$$H = 9 - 3 \cdot 2 = 3.$$

Для приведения механизма в движение необходимо задать четыре обобщенные координаты — две линейные в степенях подвижности D_5 и O_5 , и в степени подвижности A_4 одну линейную и одну угловую, т. е. установить четыре двигателя.

Для устранения избыточных контурных связей и лишних подвижностей заменим пары K_3 на K_4 , E_3 на E_4 , а пару T_5 на T_3 (см. рисунок 5 б). Также возможны и другие варианты замены класса КП, приводящие к устранению ИКС и ЛКП.

Заключение. Предложенный метод структурного анализа механизмов робототехнических и мехатронных устройств дает возможность представлять на структурных схемах механизмов условными графическими изображениями степени их подвижности, что позволяет различать на схемах КП и СП, а также определять число избыточных и метрических связей, лишних подвижностей и лишних звеньев каждого замкнутого контура механизма, а также число степеней подвижности механизма и число его степеней свободы. Применение данного метода позволяет проектировать механизмы без структурной и конструктивной избыточности, что облегчает сборку механизмов,

уменьшает износ в кинематических парах, улучшает условия функционирования механизмов. Это обеспечивает высокое качество работы механической части мехатронных и робототехнических устройств.

Список литературы

1. Григорьев, С.Н. Принципы построения цифровых производств в машиностроении / С.Н. Григорьев, А.А. Кутин, В.А. Долгов // Вест. МГТУ «СТАНКИН». — 2014. — № 3. — С. 8–14.
2. Bolton, W. Mechatronics / W. Bolton. — N.Y.: Addison-Wesley Longman Ltd, 2003.
3. Shetty, D. Mechatronic Systems design: International Thompson Publications / D. Shetty, R. Kolk. — Boston: Brooks Cole, 1998.
4. Ильяхин, Ю.В. Методы научного познания в процессе исследования и создания мехатронных систем / Ю.В. Ильяхин // Вест. МГТУ «СТАНКИН». — 2012. — № 1. — С. 90–147.
5. Егоров, О.Д. Эволюционный алгоритм многокритериальной оптимизации параметров механизмов мехатронных устройств и роботов / О.Д. Егоров, М.А. Буйнов // Вест. МГТУ «СТАНКИН». — 2015. — № 3. — С. 90–96.
6. Егоров, О.Д. Проектирование мехатронного модуля захватного устройства робота с преобразователем движения речного типа / О.Д. Егоров, М.А. Буйнов // Вест. МГТУ «СТАНКИН». — № 2. — 2013. — С. 8–12.
7. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студ. вузов / Ю.В. Подураев. — М.: Машиностроение, 2006. — 256 с.
8. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. — М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1988. — 640 с.
9. Фролов, К.В. Теория механизмов и механика машин: учеб. для вузов / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1998. — 496 с.
10. The history of the original methods used in the synthesis of the planar kinematic chains with different degrees of liberty / N.I. Manolescu // V Konferencija o teoriji stroju a mechanismu. — Liberec, 1988. — Pp. 145–157.
11. Tuttle, E.R. Enumeration of Basic Kinematic Chains Using the Theory of Finite Groups / E.R. Tuttle, S.W. Peterson, J.E. Titus // Trends and Developments in Mechanisms, Machines, and Robotics. — ASME Design Technology Conference, Kissimmee, Florida. — 1988. — Vol. 1. — Pp. 165–172.
12. Решетов, Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы: справочник / Л.Н. Решетов. — М.: Машиностроение, 1979. — 334 с.
13. Решетов, Л.Н. Конструирование рациональных механизмов / Л.Н. Решетов. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
14. Механика машин: учеб. пособие для вузов / И.И. Вульфсон [и др.]; под ред. Г.А. Смирнов. — М.: Высш. шк., 1996. — 511 с.
15. Егоров, О.Д. Структурный анализ механизмов мехатронных устройств / О.Д. Егоров // Вест. МГТУ «СТАНКИН». — 2012. — № 2. — С. 16–19.
16. Tsai, L.-W. Robot analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators / L.-W. Tsai. — John Wiley & Sons Inc., 1999.
17. Yang, T.-L. Structural analysis and number synthesis of spatial mechanisms / T.-L. Yang // In Proceedings of the 6th World Conference on the Theory of Machines and Mechanism. — New Dehli. — 1983. — Pp. 280–283.
18. Yang, T.-L. Topology Structure Design of Robot Mechanisms (in Chinese) / T.-L. Yang. — Beijing: China Machine Press, 2004.
19. Проектирование механизмов и машин : учеб. пособие для вузов / В.Г. Гушин и [и др.]. — Старый Оскол: ТНТ, 2014. — 488 с.
20. Егоров, О.Д. Прикладная механика робототехнических устройств: учебное пособие / О.Д. Егоров. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 2014. — 372 с.
21. Егоров, О.Д. Структурный анализ рычажных механизмов / О.Д. Егоров // Технология машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 54–58.
22. Егоров, О.Д. Конструирование механизмов роботов: учеб. / О.Д. Егоров. — М.: Абрис, 2012. — 443 с.

EGOROV Oleg D., Cand. Techn. Sc.

Associate Professor of the Department “Robotic and Mechatronics”¹

E-mail: egorovod@yandex.ru

BUYNOV Maxim A.

Post-Graduate Student of the Department “Robotic and Mechatronics”¹

E-mail: mak5273@yandex.ru

¹Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russia

Received 14 September 2015.

METHODS OF STRUCTURAL ANALYSIS OF THE MECHANISM OF ROBOTIC AND MECHATRONIC DEVICES

A new method for the structural analysis of the mechanisms of mechatronic devices and robots. The formulas for the analytical determination of the number of redundant and metric relations of extra mobility and links that occur in the contours of the mechanisms. Given conditional graphics kinematic pairs and degrees of freedom. Showing examples of structural analysis tools and methods for eliminating identified redundant links and extra mobility.

Keywords: mechanism, structural analysis, redundant links, extra mobility metric connection, mobility, degree of mobility

References

1. Grigoriev S.N., Kutin A.A., Dolgov V.A. Printsipy postroeniya tsifrovyykh proizvodstv v mashinostroenii [The principles of digital industries in the engineering]. *Vestnik MGTU “STANKIN”* [Bulletin of MSTU], 2014, no. 3, pp. 8–14.
2. Bolton W. *Mechatronics*. New York, Addition-Wesley Longman Ltd, 2003.
3. Shetty D., Kolk R. *Mechatronic Systems design: International Thompson Publications*. Boston, Brooks Cole, 1998.
4. Ilyukhin Yu.V. Metody nauchnogo poznaniya v protsesse issledovaniya i sozdaniya mekhatronnykh system [Methods of scientific cognition in the process of research and creation of mechatronic systems]. *Vestnik MGTU “STANKIN”* [Bulletin of MSTU], 2012, no. 1, pp.145–147.
5. Egorov O.D., Buynov M.A. Evolyutsionnyy algoritm mnogokriterial'noy optimizatsii parametrov mekhanizmov mekhatronnykh ustroystv i robotov [Evolutionary algorithm of multicriteria optimization of mechanisms of mechatronic devices and robots]. *Vestnik MGTU “STANKIN”* [Bulletin of MSTU], 2015, no. 3, pp. 90–96.
6. Egorov O.D., Buynov M.A. Proektirovanie mekhatronnogo modulya zakhvatnogo ustroystva robota s preobrazovatelem dvizheniya reechnogo tipa [Designing mechatronic module of the grasp of the robot with the Converter of movement lath type]. *Vestnik MGTU “STANKIN”* [Bulletin of MSTU], 2013, no. 2, pp. 8–12.
7. Poduraev Yu.V. *Mekhatronika: Osnovy, metody, primeneniye* [Mechatronics: fundamentals, methods, application]. Moscow, Mashinostroenie, 2006. 256 p.
8. Artobolevskiy I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Nauka, Fiz.-mat. lit., 1988. 640 p.
9. Frolov K.V., Popov S.A., Musatov A.K. *Teoriya mekhanizmov i mekhanika mashin* [Theory of mechanisms and machinery mechanic]. Moscow, Vyssh. Shkola, 1998. 496 p.
10. Manolescu N.I. The history of the original methods used in the synthesis of the planar kinematic chains with different degrees of liberty. *Proc. V. Conference on the Theory of Machines and Mechanisms*. Liberec, 1988, pp. 145–157.
11. Tuttle E.R., Peterson S.W., Titus J.E. Enumeration of Basic Kinematic Chains Using the Theory of Finite Groups. Trends and Developments in Mechanisms, Machines, and Robotics. *ASME Design Technology Conference*. Kissimmee, Florida, 1988, vol. 1, pp. 165–172.
12. Reshetov L.N. *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy* [Aligning mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 334 p.
13. Reshetov L.N. *Konstruirovaniye ratsional'nykh mekhanizmov* [Designing of rational mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 256 p.
14. Vulfson I.I., Erikhov M.L., Kolovskiy M.Z. *Mekhanika mashin* [Mechanics devices]. Moscow, Vyssheshaja Shkola, 1996. 511 p.
15. Egorov O.D. Strukturnyy analiz mekhanizmov mekhatronnykh ustroystv [Structural analysis of lever mechanisms]. *Vestnik MGTU “STANKIN”* [Bulletin of MSTU], 2012, no. 2, pp.16–19.
16. Tsai L.-W. *Robot analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley & Sons Inc, 1999.
17. Yang T.-L. Structural analysis and number synthesis of spatial mechanisms. *Proc. of the 6th World Conference on the Theory of Machines and Mechanism*. New Dehli, 1983, pp. 280–283.
18. Yang T.-L. *Topology Structure Design of Robot Mechanisms*. Beijing: China Machine Press, 2004.
19. Gushchin V.G., Baltadzi S.A., Sobolev A.N., Brovkina Yu.I. *Proektirovanie mekhanizmov i mashin* [The design of mechanisms and machines]. Staryy Oskol, TNT, 2014. 488 p.
20. Egorov O.D. *Prikladnaya mekhanika robototekhnicheskikh ustroystv* [Applied mechanics of robotic devices]. Moscow, FGBOU VPO MGTU “STANKIN”, 2014. 372 p.
21. Egorov O.D. Strukturnyy analiz rychaznykh mekhanizmov [Structural analysis of lever mechanisms]. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Mechanical engineering], 2012, no. 4, pp. 54–58.
22. Egorov O.D. *Konstruirovaniye mekhanizmov robotov* [Construction machinery robots]. Moscow, Abris, 2012. 443 p.