

RF Patent 2566454 MPK2015 B25J11/00, B64G 4/00. Byull. Izobter., no. 30, 2015 (in Russian).

15. **Smirnov I. P., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Zhukov A. A.** *Mikrosistemnoe ustroystvo upravleniya poverkhnost'yu dlya krepleniya malogabaritnoi anteny* (Microsystem Device for Control of the Surface for Mounting a Compact Antenna), RF Patent 2456720, MPK2012 H01Q 1/28. Byull. Izobter., no. 20, 2012 (in Russian).

16. **Erdem E. Y., Chen Y. M., Mohebbi M., Darling R. B., Böhlinger K. F., Suh J. W., Kovacs G. T. A.** *Thermally Actuated Omnidirectional Walking Microrobot*, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, vol. 19, no. 3, pp. 433–442 (in Russian).

17. **Kälvesten E., Ebefors T., Mattsson J. U., Stemme G.** *A Walking Silicon Micro-robot*, *The 10th Int. Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99)*, Sendai, Japan, 1999, pp. 1202–1205.

18. **Smirnov I. P., Zhukov A. A., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Babaevsky P. G.** *Teplovoi mikromekhanicheskii aktyuator i sposob ego izgotovleniya* (Thermal Micromechanical Actuator and a Technology for Manufacturing it), RF Patent 2448896, MPK2012 B81B 3/00, B81C 1/00, B81B 7/00, Byull. Izobter., no. 12, 2012 (in Russian).

19. **Khandpur R. S.** *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication and Assembly*. Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, 2005, 704 p.

УДК 621.865.8:62-231

DOI: 10.17587/mau.17.239-244

О. Д. Егоров, канд. тех. наук, доц., egorovod@yandex.ru, **М. А. Буйнов**, аспирант, mak5273@yandex.ru, Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

Структурный анализ механизмов мехатронных и робототехнических 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. Показаны примеры структурного анализа механизмов и способы устранения выявленных избыточных связей, лишней подвижностей и лишних звеньев, а также метрических связей.

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

Введение

Мехатронные и робототехнические устройства находят широкое применение в различных областях техники [1–5].

Одним из важных этапов разработки мехатронных и робототехнических устройств является проектирование их механизмов, которые представляют собой системы твердых тел, подвижно связанных 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 кинематические пары (КП), т. е. подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев. Каждая КП обладает определенной подвижностью.

Все КП можно условно разделить на пассивные и активные. Пассивная КП (в дальнейшем просто КП) — соединение двух звеньев, не позволяющее осуществлять заданное управляемое движение одного звена пары относительно другого. Активная КП (степень подвижности) позволяет сообщать одному из звеньев пары управляемые обобщенные координаты. Степень подвижности (СП) включает в себя приводы, сообщающие движения звену пары.

КП и СП имеют различную физическую сущность, и на структурных и кинематических схемах СП изображают иначе, нежели КП, но близкими к ним условными графическими изображениями [6].

Конструирование механизмов начинается с их структурного анализа. Основная задача такого анализа состоит в нахождении и устранении избыточных контурных связей (связей, которые не уменьшают подвижность механизма, а лишь обращают его в статически неопределимую систему [7]) (ИКС), лишней контурных подвижностей (возможностей звена поворачиваться вокруг своей продольной оси или нескольких звеньев — вокруг их общей оси, не оказывая влияния на функциональные возможности механизма) (ЛКП), лишней звеньев (звеньев, которые не оказывают влияния на его функциональные возможности, но влияют на качество работы) (ЛЗ) и метрических связей (связей, которые повторяют ограничения на относительные движения звеньев в механизме [8]) (МС).

Существующие методы структурного анализа не всегда позволяют корректно определять ИКС, ЛКП механизма, а ЛЗ и МС до настоящего времени не определяли [9, 10]. Поэтому предлагается иной подход к структурному анализу механизмов, позволяющий гарантированно их определять, для рационального конструирования механизмов мехатронных и робототехнических устройств.

Структурные формулы механизмов

Аналитическую зависимость между подвижностью механизма и его структурными параметрами называют структурной формулой.

Первая структурная формула для плоских механизмов была предложена в 1869 г. П. Л. Чебышевым [8]:

$$W = 3n - \sum_{i=4}^5 (i-3)p_i,$$

где W — число подвижностей механизма; n — число подвижных звеньев механизма; i — класс кинематических пар ($i = 4$ — для высших кинематических пар; $i = 5$ — для низших кинематических пар); p_i — число кинематических пар i -го класса.

Позднее подобные формулы для плоских механизмов были получены М. Грюблером и А. Клейном.

Для пространственных механизмов используют формулу А. П. Малышева

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

Подвижность механизма указывает на то, сколько управляемых обобщенных координат необходимо задать, чтобы привести механизм в управляемое движение, т.е. сколько необходимо установить приводов. Приводы устанавливаются в СП. В общем случае СП может сообщать механизму несколько подвижностей. Общее число СП механизма предлагаем определять по формуле

$$H = n - \sum_{j=1}^K A_j,$$

где A_j — показатель числа звеньев контура, значения которого

- для многоконтурных механизмов

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

- для механизмов, содержащих один контур,

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

Часто путают понятия "подвижность механизма" и "степень свободы тела". Подвижность механизма — число управляемых обобщенных координат. Степень свободы тела — это независимое возможное его движение. Тело, находящееся в пространстве, не может иметь число степеней свободы, большее шести, в то время как подвижность механизма не ограничена. Например, тело, закрепленное в захватном устройстве робота, не может иметь число степеней свободы, большее шести, в то время как исполнительный механизм робота может иметь подвижность больше шести.

Таким образом, для реализации движения твердого тела в пространстве с заданным числом степеней свободы подвижность механизма должна быть равна или больше числа степеней свободы тела.

Для определения подвижности механизмов, содержащих ИКС, Л. Н. Решетов ввел в структурную формулу Малышева член S , учитывающий число ИКС всего механизма:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + S. \quad (2)$$

В выражении (2) два неизвестных параметра — W и S . Поэтому для анализа механизма необходимо каким-либо образом определить один из них.

В настоящее время число ИКС определяют, принимая W из рассмотрения структурной схемы механизма: в простых механизмах интуитивно, на основе опыта конструктора или геометрических соображений, в сложных механизмах — путем исследования функций положения звеньев [11] (в большинстве случаев принимают $W = 1$), по формуле

$$S = W - 6n + \sum_{i=1}^5 ip_i. \quad (3)$$

Такой подход является трудоемким, субъективным и не всегда достоверным. Он не гарантирует корректного нахождения числа ИКС.

Зависимость (3) дает возможность при известном W определить только общее число ИКС всего механизма. Но он может состоять из нескольких замкнутых контуров, и каждый контур может обладать некоторым числом ИКС. Эта формула не позволяет их определить и правильно устранить.

Поэтому предлагается новая методика определения числа ИКС и ЛКП в механизме. Плоский замкнутый контур механизма, образованный КП только 5-го класса, обладает тремя ИКС. Если в замкнутом контуре кроме КП 5-го класса могут быть КП 4-го, 3-го, 2-го или 1-го классов, т.е. контур может 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

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

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

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

Отрицательные значения S_j указывает на то, что появились ЛКП.

Наличие ИКС и ЛКП в структурной схеме указывает на тот факт, что механизм обладает структурной избыточностью:

$$S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^K S_j, \quad (4)$$

где K — число независимых контуров механизма, определяемое по формуле Х. И. Гохмана [11]

$$K = \sum_{i=1}^5 p_i - n.$$

Для определения подвижности пространственных механизмов, содержащих ИКС и ЛКП, предлагаем использовать формулу (1) с учетом соотношения (4):

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + S_{\Sigma}.$$

Устранение ИКС осуществляют понижением класса КП контура, устранение ЛП — повышением их класса [12, 13].

Кроме ИКС и ЛП контуры механизма могут содержать лишние звенья. Таким звеном в кулачковом механизме с вращающимся толкателем может быть ролик 2 (рис. 1, а).

Он предназначен для замены трения скольжения между кулачком 1 и толкателем 3 на трение качения, т.е. для улучшения процесса взаимодействия кулачка и толкателя. Если в механизме применить тарельчатый толкатель (рис. 1, б), то его функциональные возможности не изменятся по сравнению с механизмом на рис. 1, а, но ухудшатся качественные показатели его работы за счет повышенного трения скольжения.

Таким образом, с точки зрения структуры механизма ролик 2 является лишним звеном. В общем случае число лишних звеньев в j -м контуре механизма предлагаем определять по формуле

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

Формула (5) применима только для контуров, состоящих из трех и более подвижных звеньев. В контуре, состоящем из двух подвижных звеньев, не может быть ЛЗ, так как минимальное число подвижных звеньев, образующих замкнутый контур, равно двум.

В замкнутых контурах механизмов, содержащих пары только 5-, 4- и 3-го классов, могут появиться метрические связи, которые возникают при установке дополнительного звена в контуре механизма. Например, на рис. 2, а в механизме для увеличения жесткости установлено дополнительное звено AB , при этом его размер должен быть равен размеру звена CD , а также необходимо, чтобы $MA = AC = DB = BH$. В противном случае механизм неработоспособен [11]. На рис. 2, б в винтовой механизм добавлена направляющая 3, которая предотвращает поворот гайки 2 вместе винтом 1. При этом оси звеньев 1 и 3 должны быть параллельны между собой, иначе произойдет заклинивание.

При структурном анализе механизмов число T_j метрических связей j -го контура предлагаем определять по формулам:

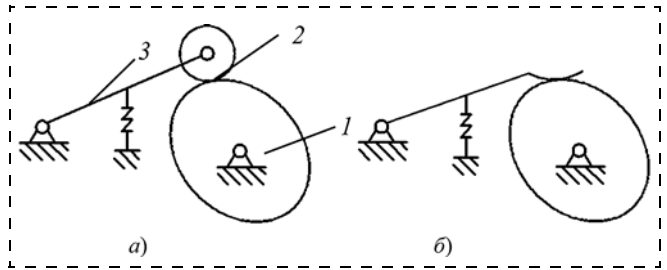


Рис. 1. Кулачковый механизм

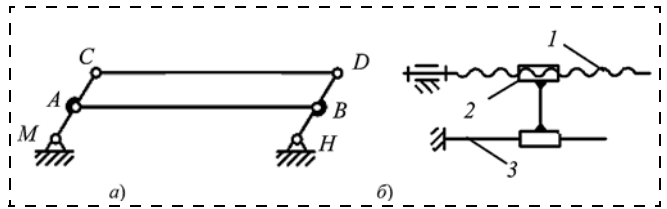


Рис. 2. Механизмы с метрическими связями

- для механизмов, содержащих один замкнутый контур,

$$T_j = 0,5 \left(\frac{2,5 - n_k}{|2,5 - n_k|} + 1 \right), \quad (6)$$

где n_k — число подвижных звеньев замкнутого контура;

- для механизмов, содержащих несколько замкнутых контуров,

$$T_j = 0,25 \left(1 - \frac{n_k - 3,5}{|n_k - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - n'_k}{|1,5 - n'_k|} + 1 \right), \quad (7)$$

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

Формулы (6) и (7) применимы для расчета контуров, образованных КП 5-, 4- и 3-го классов. Если в контуре содержится хотя бы одна пара 2- или 1-го класса, то такой контур метрических связей не имеет.

Метрические связи в структуре механизма являются дополнительными. Погрешности изготовления звеньев и сборки механизма МС могут привести к его заклиниванию. При проектировании следует использовать структурные схемы механизмов, не содержащие метрических связей.

Наличие ЛЗ и МС в механизме указывает на то, что он обладает конструктивной избыточностью, которую предлагаем определять по зависимости

$$C_{\Sigma} = \sum_{j=1}^K T_j - \sum_{j=1}^K Z_j.$$

Окончательно подвижность плоских и пространственных механизмов с учетом ИКС, ЛКП, ЛЗ и МС рекомендуем определять по формуле

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + S_{\Sigma} + C_{\Sigma}.$$

Примеры структурного анализа исполнительных механизмов мехатронных и робототехнических устройств

Приведем пример структурного анализа исполнительного механизма робота [14] (рис. 3, а).

Исполнительный механизм состоит из семи подвижных звеньев, двух сферических пар третьего класса D_3 и E_3 , имеющих по три вращательных подвижности, одной цилиндрической пары четвертого класса D_4' , имеющей одну вращательную и одну поступательную подвижности, и шести вращательных пар пятого класса A_5 , B_5 , C_5 , C_5' , D_5'' , G_5 , имеющих по одной подвижности.

Найдем число замкнутых контуров исполнительного механизма:

$$K = 9 - 7 = 2.$$

Вычислим число избыточных связей, лишних подвижностей, лишних звеньев и метрических связей в контурах механизма. В первом контуре $B_5 C_5 D_5'' D_4'$ число избыточных связей равно

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

Число метрических связей первого 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 лишних звеньев первого контура

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

Во втором контуре $C_5' E_3 D_3 D_5''$ число избыточных контурных связей равно

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

Отрицательное значение S_2 указывает на тот факт, что имеется лишняя контурная подвижность, т.е. возможность звена $E_3 D_3$ проворачиваться вокруг своей продольной оси симметрии, не оказывая влияния на функциональные возможности исполнительного механизма робота. Число метрических связей второго контура

$$T_2 = 0,25 \left(1 - \frac{4 - 3,5}{|4 - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - 2}{|1,5 - 2|} + 1 \right) = 0.$$

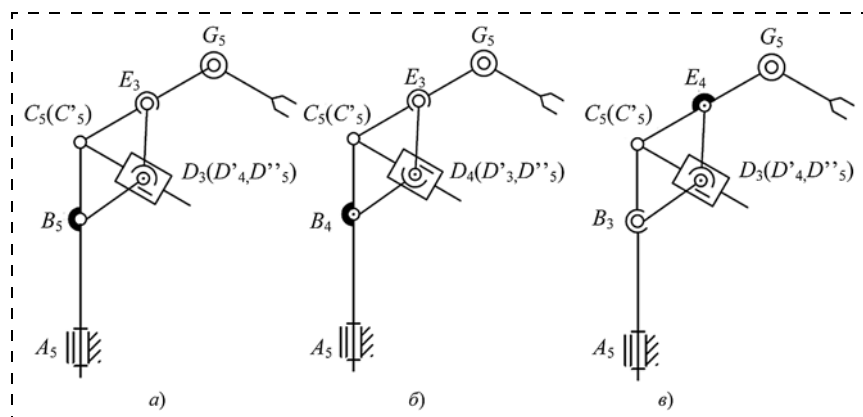


Рис. 3. Исполнительный механизм робота

Число лишних звеньев второго контура

$$Z_2 = (5 - 5) \cdot 3 = 0.$$

Структурная избыточность механизма

$$S_{\Sigma} = 2 - 1 = 1.$$

Конструктивная избыточность механизма

$$C_{\Sigma} = 0 - 0 = 0.$$

Вычисляем подвижность исполнительного механизма робота:

$$W = 6 \cdot 7 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 5 \cdot 6 + 1 = 3.$$

Число степеней подвижности механизма

$$H = 7 - 2 \cdot 2 = 3.$$

Для приведения механизма в управляемое движение необходимо установить три привода вращательного движения в кинематических парах A_5 , D_5'' и G_5 .

Устраним избыточные контурные связи и лишние подвижности. Для этого в первом контуре понизим класс двух кинематических пар, например, B_5 заменим на B_4 и D_4' заменим на D_3' , а во втором контуре повысим класс одной кинематической пары, т.е. D_3 заменим на D_4 (рис. 3, б).

В этом случае число избыточных связей первого контура $B_4 C_5 D_5'' D_3'$ и второго C_5', E_3, D_4, D_5'' контуров будет равно

$$S_1 = 3 - (5 - 3) \cdot 1 - (5 - 4) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 3 = 0;$$

$$S_2 = 3 - (5 - 3) \cdot 1 - (5 - 4) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 1 = 0.$$

При этом подвижность исполнительного механизма робота останется прежней:

$$W = 6 \cdot 7 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 2 - 5 \cdot 5 = 3.$$

Устранить избыточные контурные связи и лишние контурные подвижности также можно, заменяя в первом контуре B_5 на B_3 , а во втором контуре — E_3 на E_4 (рис. 3, в).

Таким образом, устранение избыточных контурных связей и лишних подвижностей является многовариантным процессом.

Проведем структурный анализ исполнительного механизма мехатронного захватного устройства робота (рис. 4, а).

Механизм захватного устройства состоит из пяти подвижных звеньев, двух пар второго класса B_2 и B_2' и семи пар пятого класса A_5 , C_5 , C_5' , F_5 , F_5' , P_5 и P_5' .

Найдем число замкнутых контуров механизма:

$$K = 9 - 5 = 4.$$

Вычислим число избыточных связей, лишних подвижностей, лишних звеньев и метрических связей в контурах механизма. В первом контуре $A_5 B_2 F_5$ число избыточных связей равно

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

Метрических связей в первом контуре нет ($T_1 = 0$), так как он содержит пару второго класса. Первый контур состоит из двух подвижных звеньев, поэтому лишних звеньев в нем нет ($Z_1 = 0$).

Второй контур $A_5 B_2' F_5'$ аналогичен первому контуру. Поэтому

$$S_2 = 1; T_2 = 0; Z_2 = 0.$$

В третьем контуре $F_5 C_5 P_5$ число избыточных контурных связей

$$S_3 = 3 - (5 - 5) \cdot 2 = 3.$$

Число метрических связей третьего контура

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

Третий контур состоит из двух подвижных звеньев, поэтому $Z_3 = 0$.

Структурное исполнение четвертого контура $F_5' C_5' P_5'$ аналогично третьему контуру. Поэтому

$$S_4 = 3; T_4 = 1; Z_4 = 0.$$

Структурная избыточность механизма

$$S_{\Sigma} = 1 + 1 + 3 + 3 = 8.$$

Конструктивная избыточность механизма

$$C_{\Sigma} = 1 + 1 - 0 = 2.$$

Вычисляем подвижность механизма:

$$W = 6 \cdot 5 - 5 \cdot 7 - 2 \cdot 2 + 8 + 2 = 1.$$

Число степеней подвижности механизма

$$H = 5 - 4 \cdot 1 = 1.$$

Для приведения механизма захватного устройства в управляемое движение необходимо установить привод вращательного движения M (рис. 4).

Для устранения избыточных контурных связей механизма заменим пары B_2 и B_2' на пары B_1 и B_1' , а пары F_5, P_5, F_5' и P_5' — на пары F_4, F_4', F_4' и P_4, P_4' . Для устранения метрических связей механизма заменим звенья $C_5 P_5$ и $C_5' P_5'$ на структурные группы с цилиндрическими парами K_4 и K_4' (рис. 4, б). Тогда число избыточных связей в контурах будет равно

$$S_1 = 3 - (4 - 1) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 2 = 0.$$

$$S_2 = 3 - (4 - 1) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 2 = 0.$$

$$S_3 = 3 - (5 - 4) \cdot 3 = 0.$$

$$S_4 = 3 - (5 - 4) \cdot 3 = 0.$$

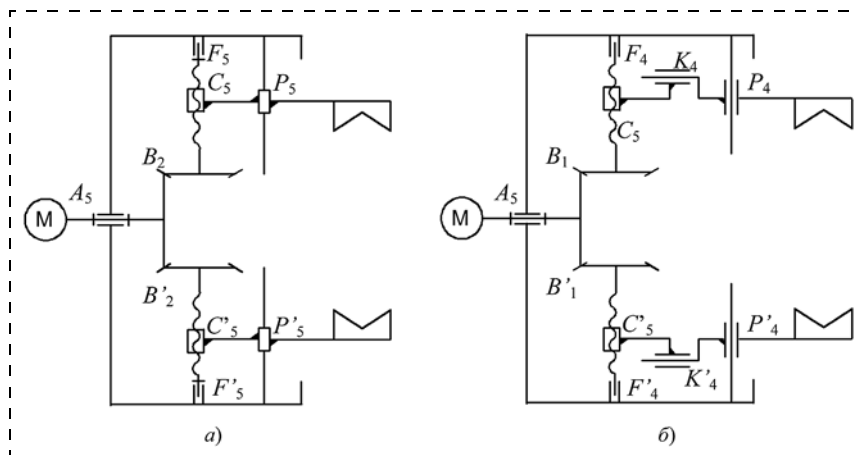


Рис. 4. Исполнительный механизм захватного устройства

Число метрических связей третьего и четвертого контуров

$$T_4 = 0,25 \left(1 - \frac{3 - 3,5}{|3 - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - 2}{|1,5 - 2|} + 1 \right) = 0.$$

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

Подвижность нового механизма

$$W = 6 \cdot 7 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 6 - 2 \cdot 1 = 1.$$

Число степеней подвижности нового механизма

$$H = 7 - 2 \cdot 2 - 2 \cdot 1 = 1.$$

Заключение

Предложенный метод структурного анализа механизмов робототехнических и мехатронных устройств дает возможность определять число избыточных и метрических связей, лишних подвижностей и лишних звеньев каждого замкнутого контура, а также число степеней подвижности механизма и его подвижность. Применение данного метода позволяет конструировать механизмы без структурной и конструктивной избыточности, что облегчает их сборку, уменьшает трение и 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., Кутин А. А., Долгов В. А. Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2014. № 3. С. 8—14.
2. Егоров О. Д., Буйнов М. А. Проектирование мехатронного модуля захватного устройства робота с преобразователем движения реечного типа // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2013. № 2. С. 8—12.
3. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Расчет и конструирование мехатронных модулей: учеб. пособ. М.: ГОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", 2012. 422 с.

4. **Sherry D., Kolk R.** *Mechatronic Systems design: International* Thompson Publications. Boston: Brooks Cole, 1998.
5. **Bolton W.** *Mechatronics*. 3-rd ed. N. Y.: Addition-Wesley Longman Ltd, 2003.
6. **Егоров О. Д.** Прикладная механика робототехнических устройств: учебное пособие. М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", 2014. 372 с.
7. **Решетов Л. Н.** Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник. М.: Машиностроение, 1979. 334 с.
8. **Гущин В. Г., Балтаджи С. А., Соболев А. Н., Бровкина Ю. И.** Проектирование механизмов и машин: учеб. пособ. для вузов. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 488 с.
9. **Hwang W.-M., Hwang Y.-W.** Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints // *Mechanism and Machine Theory*. 1992. Vol. 27, N. 2. P. 189–199.
10. **Srinath J., Krishnamurty S.** Modified standard codes in enumeration and automatic sketching of mechanisms // *Proc. of 4th Appl. Mech. Robotics Conf.* Cincinnati, OH, 1995.
11. **Механика машин:** учеб. пособие для вузов / И. И. Вульфсон, М. Л. Ерихов, М. З. Коловский и др.; Под ред. Г. А. Смирнова. М.: Высш. шк., 1996. 511 с.
12. **Егоров О. Д.** Структурный анализ механизмов мехатронных устройств // *Вестник МГТУ "СТАНКИН"*. 2012. № 2. С. 16–19.
13. **Егоров О. Д.** Прикладная механика мехатронных устройств: учебное пособие. М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", 2013. 229 с.
14. **Егоров О. Д.** Конструирование механизмов роботов. М.: Абрис, 2012. 443 с.

Structural Analysis of the Mechanisms of the Mechatronic and Robotic Devices

O. D. Egorov, egorovod@yandex.ru✉, **M. A. Buynov**, mak5273@yandex.ru,
Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, 127055, Russian Federation

Corresponding author: Egorov Oleg D., Ph. D., Associate Professor of the Robotic and Mechatronics Sub-department of MSTU STANKIN, Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: egorovod@yandex.ru

*Received on October 20, 2015
Accepted on November 11, 2015*

The article presents a new method of a structural analysis of the mechanisms in the mechatronic devices and robots, and formulas for analytical determination of the structural and constructive redundancy mechanism. The structural redundancy mechanism includes excessive contour connection, turning it into a statically indefinable system of extra contour and mobility (the ability of the link to rotate around its longitudinal axis or several links around their common axis, without affecting the functionality of the mechanism). The contour excessive communication can lead to an increased friction in the kinematic pairs or deformation of the links in the assembly, while the extra mobility contours lead to unnecessary design complexity of a mechanism. The constructive redundancy mechanism includes unnecessary links (the links, which do not affect its functionality, but influence the quality of its operation) and metric connections (the links, which duplicate the restrictions on the relative motion of the links in the mechanism). The excessive units increase the cost of a mechanism, while the metric connection can lead to blocking in case of inaccuracies in the manufacture of the links. The article presents examples of a structural analysis of the mechanisms and ways of elimination of the identified redundant links, the extra mobility and extra links, and metric connections. The proposed method of the structural analysis of mechanisms, robotic and mechatronic devices enables one to define a number of redundant and metric relationships, the extra mobility and extra links of each closed contour, and the degrees of freedom of a mechanism and its mobility. Application of this method allows us to design mechanisms without the structural redundancy, which facilitates the assembly process, reduces friction and wear in the kinematics pairs, and improves functioning of the mechanisms. This ensures high quality of the mechanical parts of the mechatronic and robotic devices.

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

For citation:

Egorov O. D., Buynov M. A. Structural Analysis of the Mechanisms of the Mechatronic and Robotic Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 239–244.

DOI: 10.17587/mau/17.239-244

References

1. **Grigor'ev S. N., Kutin A. A., Dolgov V. A.** *Printsiipy postroeniya tsifrovyykh proizvodstv v mashinostroenii* (The principles of digital industries in the engineering), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2014, no. 3, pp. 8–14 (in Russian).
2. **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"*, 2013, no. 2, pp. 8–12 (in Russian).
3. **Egorov O. D., Poduraev Yu. V.** *Raschet i konstruirovaniye mekhatronnykh moduley* (Calculation and design of mechatronic modules), Moscow, GOU VPO MGTU "STANKIN", 2012, 422 p. (in Russian).
4. **Shetty D., Kolk R.** *Mechatronic Systems design: International* Thompson Publications, Boston, Brooks Cole, 1998.
5. **Bolton W.** *Mechatronics*, N. Y., Addition-Wesley Longman Ltd, 2003.
6. **Egorov O. D.** *Prikladnaya mekhanika robototekhnicheskikh ustroystv* (Applied mechanics of robotic devices), Moscow, FGBOU VPO MGTU "STANKIN", 2014, 372 p. (in Russian).
7. **Reshetov L. N.** *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy* (Self-aligning mechanisms), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 334 p. (in Russian).
8. **Gushhin V. G., Baltadzi S. A., Sobolev A. N., Brovkin Ju. I.** *Proektirovanie mekhanizmov i mashin* (The design of mechanisms and machines), Staryj Oskol, TNT, 2014, 488 p. (in Russian).
9. **Hwang W.-M., Hwang Y.-W.** Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints, *Mechanism and Machine Theory*, 1992, vol. 27, no. 2, p. 189–199.
10. **Srinath J., Krishnamurty S.** Modified standard codes in enumeration and automatic sketching of mechanisms, *Proc. of 4th Appl. Mech. Robotics Conf.*, Cincinnati, OH, 1995.
11. **Vul'fson I. I., Erikhov M. L., Kolovskiy M. Z.** et al. *Mekhanika mashin* (Mechanics of machines), G. A. Smirnov ed., Moscow, Vyssh. shk., 1996, 511 p. (in Russian).
12. **Egorov O. D.** *Strukturnyy analiz mekhanizmov mekhatronnykh ustroystv* (Structural analysis of the mechanisms of mechatronic devices), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2012, no. 2, pp. 16–19 (in Russian).
13. **Egorov O. D.** *Prikladnaya mekhanika mekhatronnykh ustroystv* (Applied mechanics mechatronic devices), Moscow, FGBOU VPO MGTU "STANKIN", 2013, 229 p. (in Russian).
14. **Egorov O. D.** *Konstruirovaniye mekhanizmov robotov* (Construction machinery robots), Moscow, Abris, 2012, 443 p. (in Russian).