

УДК 62-23:667.06

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ  
С УЧЕТОМ ИХ СТРУКТУРНОЙ И КОНСТРУКТИВНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ**

**ANALYSIS OF MECHANISMS  
BASED ON THEIR STRUCTURAL AND CONSTRUCTIVE REDUNDANCY**

*О.Д. ЕГОРОВ, М.А. БУЙНОВ*  
*O.D. EGOROV, M.A. BUJNOV*

(Московский государственный технологический университет "СТАНКИН")  
(Moscow State University of Technology "STANKIN")  
E-mail: egorovod@yandex.ru; mak5273@yandex.ru

*В статье предложен новый метод структурного анализа механизмов. Представлены формулы для аналитического определения числа избыточных и метрических связей, лишних подвижностей и лишних звеньев, возникающих в контурах механизмов. Показаны примеры структурного анализа механизмов, применяемых в текстильной промышленности, и способы устранения выявленных избыточных связей и лишних подвижностей.*

*This paper proposes a new method of structural analysis of mechanisms. Formulas are presented for analytical determination of the number of redundant and metric relationships, the extra mobility and the extra links that occur in the circuits of the mechanisms. Shows examples of structural analysis of mechanisms used in textile industry, and ways to remove the identified redundant connections and superfluous mobilities.*

**Ключевые слова:** избыточная связь, лишняя подвижность, метрическая связь, подвижность, степень подвижности.

**Keywords:** redundant links, extra mobility, metric connection, mobility, degree of mobility.

В машинах, используемых в текстильной промышленности, применяются различные виды механизмов: рычажные, зубчатые, кулачковые, мальтийские и др. Важнейшей задачей, стоящей перед текстильной промышленностью, является улучшение качества и ассортимента изделий, которое в настоящее время возможно лишь при

использовании в машинах и станках новых прогрессивных механизмов с высокими эксплуатационными характеристиками. Проектирование таких механизмов начинают со структурного анализа, который является первичным и наиболее ответственным этапом, во многом определяющим эффективность и долговечность конструкции.

Основная задача при конструировании состоит в определении и, если необходимо, устранении из механизма структурной и конструктивной избыточности.

К структурной избыточности механизма относят избыточные контурные связи (связи, обращающие его в статически неопределимую систему [1]) (ИКС) и лишние контурные подвижности (возможность звена поворачиваться вокруг своей продольной оси или нескольких звеньев вокруг их общей оси, не оказывая влияния на функциональные возможности механизма) (ЛКП). ИКС могут привести к увеличению трения в кинематических парах или деформации звеньев при сборке, ЛКП приводят к необоснованному усложнению конструкции механизма.

К конструктивной избыточности механизма относят лишние звенья (звенья, которые не оказывают влияния на его функциональные возможности, но влияют на качество работы) (ЛЗ) и метрические связи ("Метрическая связь – связь, которая повторяет ограничения на относительные движения звеньев в механизме" [2]) (МС). ЛЗ приводят к удорожанию конструкции механизма, а МС могут привести к его заклиниванию в случае неточности изготовления звеньев.

Существующие методы структурного анализа не всегда позволяют корректно определять ИКС, ЛКП механизма, а ЛЗ и МС до настоящего времени не определяли. Поэтому предлагается иной подход к структурному анализу, позволяющий гарантировано определять структурную и конструктивную избыточность механизма, что обеспечивает его рациональное конструирование.

Анализ механизма проводят с использованием структурных формул. Формула для определения подвижности пространственных механизмов была предложена А.П. Малышевым в 1923г. Для определения подвижности механизмов, содержащих ИКС, Л.Н. Решетов ввел в структурную формулу Малышева член  $S$ , учитывающий число ИКС всего механизма [1]:

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

где  $W$  – число подвижностей механизма;  $n$  – число подвижных звеньев механизма;  $i$  – класс кинематических пар;  $p_i$  – число кинематических пар  $i$ -го класса.

Для нахождения числа ИКС по выражению (1) необходимо каким-либо образом определить подвижность механизма ( $W$ ). В работе [3] для определения ИКС механизма задают  $W$  на основании рассмотрения структурной схемы механизма. В общем случае  $W$  можно определить из геометрических соображений или путем анализа функции положения звеньев механизма [4]. Такой подход к определению ИКС является трудоемким, субъективным и не всегда достоверным.

Рассмотрим иной подход к определению 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, 3, 2 или 1-го классов, то есть контур может обладать дополнительными подвижностями, то число ИКС такого контура меньше, чем у плоского. Число ИКС  $j$ -го контура механизма предлагаем определять по формуле:

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

где  $m$  – модификатор, учитывающий тип КП:  $m=5$  – для низших кинематических пар (5, 4 и 3-го классов);  $m=4$  – для высших кинематических пар (2 и 1-го классов);  $p_i$  – число КП  $i$ -го класса замкнутого контура, которые не были рассмотрены до этого в других контурах.

Отрицательное значение  $S_j$  указывает на то, что появились ЛКП. Устранение ИКС осуществляют понижением класса КП контура, устранение ЛП – повышением их класса.

Структурная избыточность многоконтурного механизма:

$$S_a = \sum_{j=1}^K S_j,$$

где  $K$  – число независимых контуров механизма, определяемое по формуле Х.И. Гохмана [4].

Конструктивную избыточность механизма определяем в виде:

$$C_{\Sigma} = T_{\Sigma} - \sum_{j=1}^K Z_j,$$

где  $T_{\Sigma}$  – число метрических связей (МС) механизма;  $Z_j$  – число лишних звеньев (ЛЗ)  $j$ -го контура.

Число МС всего механизма предлагаем определять по формуле:

$$T_{\Sigma} = 2K + 1 - n. \quad (2)$$

Положительное значение, получаемое по формуле (2), соответствует числу МС механизма. Отрицательное значение и ноль свидетельствуют о том, что метрических связей в механизме нет. Зависимость (2) позволяет определить число МС механизма, но она не дает возможности найти контуры механизма, в которых они находятся. Для нахождения МС  $j$ -го контура механизма предлагаем использовать формулу:

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

где  $n_k$  – число подвижных звеньев замкнутого контура;  $n'_k$  – число подвижных звеньев замкнутого контура, которые не входят в другие контуры.

Число ЛЗ в  $j$ -м контуре механизма рекомендуем определять по выражению:

$$Z_j = \sum_{i=1}^5 (5 - m) p_i. \quad (4)$$

Формула (4) применима только для контуров, состоящих из трех и более подвижных звеньев. В контуре, состоящем из двух подвижных звеньев, не может быть ЛЗ.

Окончательно подвижность плоских и пространственных механизмов с учетом структурной и конструктивной избыточности необходимо определять по формуле:

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

Рассмотрим пример структурного анализа механизма привода батана ткацкого станка с кулачковым разгрузителем [5] (рис.1). На главном валу механизма расположен двойной кулачок 1, состоящий из основного кулачка 1а и контркулачка 1б, который через ролики 2, 3 и коромысло 4 сообщает движение подбатанному валу 9. Для уравнивания сил инерции, действующих на подбатанный вал, на нем установлен кулачковый разгрузитель, состоящий из кулачка 5, ролика 6, коромысла 7 и пружины 8.

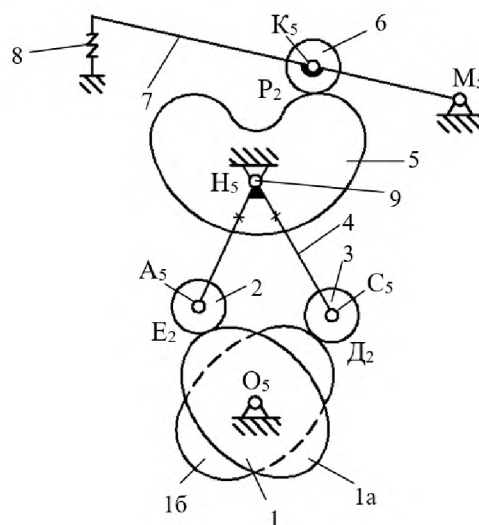


Рис. 1

Определим число замкнутых контуров механизма по формуле Гохмана:  $K = 9 - 6 = 3$ . Общее число МС механизма  $T_{\Sigma} = 2K + 1 - n = 2 \cdot 3 + 1 - 6 = 1$ .

Первый контур  $O_5 E_2 A_5 H_5$  содержит три подвижных звена: 1, 2 и 4, которые не входят в другие контуры. Число МС контура

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

Число ИКС  $S_1 = 3 - (5 - 5)3 - (4 - 2)1 = 1$ . Число ЛЗ контура  $Z_1 = (5 - 5)3 + (5 - 4)1 = 1$ . С точки зрения структуры лишним звеном в контуре является ролик 2, который служит для замены трения скольжения на трение качения в высшей паре  $E_2$ , но он не оказывает

влияние на функциональные преобразования в механизме.

Второй контур  $O_5D_2C_5H_5$  содержит три подвижных звена: 1, 3 и 4, из которых только одно звено 3 не входит в другие контуры. Число МС контура

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

В данном контуре содержится одна метрическая связь, вызванная дополнительным роликом 3, который служит для снижения контактных напряжений в паре ролик–кулачок [6]. Число ИКС  $S_2=1$ . Число ЛЗ контура  $Z_2=(5-5)3+(5-4)1=1$ .

Аналогично для третьего контура  $H_5P_2K_5M_5$ . Число МС  $T_3=0$ , число ИКС  $S_3=1$ , число ЛЗ контура  $Z_3=1$ . Подвижность механизма  $W=6 \cdot 6 - 5 \cdot 6 - 2 \cdot 3 + 3 + 2 = 1$ . Для устранения ИКС в механизме предлагаем заменить одноподвижные вращательные пары  $A_5$ ,  $C_5$ , и  $K_5$ , на двухподвижные сферические пары с пальцем  $A_4$ ,  $C_4$  и  $K_4$ .

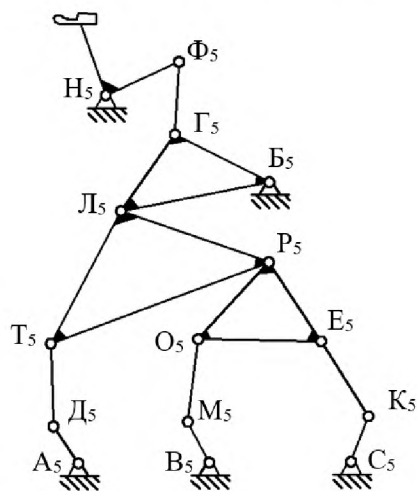


Рис. 2

Рассмотрим пример структурного анализа механизма привода платин трикотажной машины [4] (рис.2). Число контуров механизма  $K=15-11=4$ . Общее число МС механизма  $T_5=2K+1-n=2 \cdot 4+1-11=-2$ . Вычисления по формуле (2) дали отрицательный результат, следовательно, МС в механизме

нет. Первый контур  $A_5D_5T_5P_5O_5M_5B_5$ : число ИКС контура  $S_1=3$ , число ЛЗ контура  $Z_1=0$ . Аналогично для второго контура  $B_5M_5O_5E_5K_5C_5$ : число ИКС  $S_2=3$ , число ЛЗ контура  $Z_2=0$ . Для третьего контура  $B_5L_5P_5E_5K_5C_5$ :  $S_3=3$ ,  $Z_3=0$ . Для четвертого:  $S_4=3$ , число ЛЗ контура  $Z_4=0$ . Подвижность всего механизма  $W=6 \cdot 11 - 5 \cdot 15 + 12 = 3$ . Для устранения ИКС в механизме предлагаем заменить одноподвижные пары  $D_5$ ,  $K_5$ ,  $B_5$  и  $H_5$  на трехподвижные сферические  $D_3$ ,  $K_3$ ,  $B_3$  и  $H_3$ , а пары  $T_5$ ,  $E_5$ ,  $L_5$  и  $\Phi_5$  на двухподвижные цилиндрические пары  $T_4$ ,  $E_4$ ,  $L_4$  и  $\Phi_4$ . Возможны и другие варианты замены кинематических пар.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан метод структурного анализа механизмов, который позволяет аналитически определять подвижность механизма, число избыточных контурных связей и лишних контурных подвижностей, а также число метрических связей и число лишних звеньев.

2. Указаны возможные способы устранения избыточных контурных связей и лишних контурных подвижностей в механизмах текстильных машин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы. – М.: Машиностроение, 1979.
2. Гуцин В.Г., Балтаджи С.А., Соболев А.Н., Бровка Ю.И. Проектирование механизмов и машин. – Старый Оскол: ТНТ, 2014.
3. Кулемкин Ю.В., Лясич В.А., Макаров В.А. Исследование структуры зевобразующих механизмов ткацких станков СТБ // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, №6.
4. Вульфсон И.И., Ерихов М.Л., Коловский М.З. и др. Механика машин / Под ред. Г.А. Смирнова. – М.: Высшая школа, 1996.
5. Патент на полезную модель № 99486 Кл. МПК D03D/ 20.11.2010. Батанный механизм с кулачковым разгрузателем / Лушников С.В., Белый М.А., Степнов Н.В.
6. Терехина А.О., Соловьев А.Б. Модернизированный кулачковый привод батанного механизма ткацкого станка типа СТБ // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2004, №2.

## REFERENCES

1. Reshetov L.N. Samoustanavlivayushiesya mehanizmy. – M.: Mashinostroenie, 1979.

2. Gushin V.G., Baltadzhi S.A., Sobolev A.N., Brovkina Yu.I. Proektirovanie mehanizmov i mashin. – Staryj Oskol : TNT, 2014.

3. Kulemkin Yu.V., Lyasich V.A., Makarov V.A. Issledovanie struktury zevoobrazuyushih mehanizmov tkackih stankov STB // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2006, №6.

4. Vulfson I.I., Erihov M.L., Kolovskij M.Z. i dr. Mehanika mashin / Pod red. G.A. Smirnova. – M.: Vysshaya shkola, 1996.

5. Patent na poleznuyu model № 99486 Kl. MPK D03D/ 20.11.2010. Batannyj mehanizm s kulachkovym razgruzhatelem / Lushnikov S.V., Belyj M.A., Stepanov N.V.

6. Terehina A.O., Solovev A.B. Modernizirovannyj kulachkovyj privod batannogo mehanizma tkackogo stanka tipa STB // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2004, №2.

Рекомендована кафедрой робототехники и мехатроники. Поступила 23.06.18.

---