

УДК 621.01

ПОНЯТИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР КВАЗИВЫСОКИХ КЛАССОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ УСТРАНЕНИИ ИЗБЫТОЧНЫХ СВЯЗЕЙ В ШАРНИРНЫХ МЕХАНИЗМАХ

Л.Н. Гудимова, Л.Т. Дворников, А.Г. Никитин

E-mail: lyu-gudiova@yandex.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Создание механизмов, свободных от избыточных связей в них, является одной из наиболее актуальных задач современного машиностроения. Наиболее широко в практике машиностроения применяются плоские шарнирные механизмы. В работе академика И.И. Артоболевского «Механизмы в современной технике» из более двух тысяч описанных там механизмов не менее 70 % являются плоскими с избыточными связями в своих цепях. Появление в шарнирных рычажных механизмах избыточных связей приводит к уменьшению коэффициента полезного действия, способствует износу деталей в их соединениях, уменьшает срок службы машин. Магистральным в машиностроении должно стать направление по созданию адаптивных, самоустанавливающихся (не содержащих избыточных связей) машин. К настоящему времени хорошо изучен метод устранения избыточных связей, предложенный Л.Н. Решетовым. Однако эта методика позволяет для удовлетворения условия отсутствия избыточных связей в шарнирных механизмах определять лишь общее количество классических кинематических пар пятого, четвертого и третьего классов. В настоящей работе рассматривается вопрос об использовании таких кинематических пар, которые могут обеспечивать требуемое перемещение (или вращение) в нужном направлении лишь на определенную наперед заданную незначительную величину. Подобные пары следует называть кинематическими парами квазивысокого класса, то есть приближенными по возможным движениям к классическим парам высоких классов. Такой подход к решению проблемы устранения избыточных связей в шарнирных рычажных механизмах, которые широко применяются и в металлургической промышленности, позволит существенно улучшить работу механизмов качения и прижима кристаллизатора, перемещения столов среднесортного и крупносортового станов, летучих ножниц, исполнительных механизмов кузнечно-штамповочных машин и др.

Ключевые слова: кинематическая пара, квазивысокий класс, четырехзвенный механизм, рациональный механизм, избыточная связь, механизм качения, механизм прижима.

THE CONCEPT OF KINEMATIC PAIRS OF QUASI-HIGH CLASSES AND THEIR USE IN ELIMINATION OF REDUNDANT LINKS IN ARTICULATED MECHANISMS

L.N. Gudimova, L.T. Dvornikov, A.G. Nikitin

E-mail: lyu-gudiova@yandex.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The creation of mechanisms free from redundant links in them is one of the most urgent tasks of modern engineering. Planar articulated mechanisms are most widely used in the practice of mechanical engineering. In his work “Mechanisms in modern technology” Academician I.I. Artobolevsky described more than two thousand mechanisms, at least 70% were planar ones with redundant links in their chains. The appearance of redundant links in the articulated mechanisms leads to a decrease in the efficiency, contributes to the wear of parts in their joints, and reduces the service life of machines. The main direction in mechanical engineering should be the direction of creating adaptive, self-aligning (not containing redundant links) machines. To date, the method for eliminating redundant links proposed by L.N. Reshetov has been thoroughly studied. However, this technique makes it possible to determine only the total number of classical kinematic pairs of the fifth, fourth and third classes to satisfy the condition of the absence of redundant links in the articulated mechanisms. In this paper, we consider the issue of using such kinematic pairs that can provide the required displacement (or rotation) in the desired direction only by a certain predetermined insignificant amount. Such pairs should be called kinematic pairs of a quasi-high class, that is, close in possible movements to classical pairs of high classes. This approach to solving the problem of eliminating redundant links in articulated link mechanisms,

which are widely used in the metallurgical industry, will significantly improve the operation of the rolling and clamping mechanisms of the mold, the movement of tables of medium and large-section mills, flying shears, actuators of forging and stamping machines, etc.

Keywords: kinematic pair, quasi-high class, four-link mechanism, rational mechanism, redundant link, rolling mechanism, clamping mechanism.

Применение шарнирных и рычажных механизмов в качестве исполнительных в машинах металлургической промышленности обусловлено возможностью их использования для передачи значительных усилий [1 – 3]. Наиболее часто используются кривошипно-ползунные и коленно-рычажные механизмы. Рычажные механизмы иногда используют в комбинации с кулачковыми для получения сложных траекторий точек исполнительных органов машин. Существенным недостатком всех шарнирных механизмов является наличие в них избыточных связей, которые приводят к уменьшению коэффициента полезного действия и срока службы машин, к увеличению энергозатрат производственного цикла и к износу деталей в местах соединений [4 – 6].

При введении в цепи плоских шарнирных механизмов кинематических пар более высоких классов, обеспечивающих увеличение числа относительных движений в них (снимающих избыточность связей), предполагалось, что пары p_4 , p_3 , p_2 и p_1 принципиально отличаются от пар p_5 по числу возможных движений [7 – 9]. При работе пары p_5 возможно единственное относительное движение (вращательное или поступательное) в единой для обоих звеньев плоскости; при работе пары p_4 возможно еще одно дополнительное относительное движение, выводящее звенья из единой плоскости. При работе пары p_3 возможны три степени свободы в относительном движении звеньев, а пар p_2 и p_1 – всего две и одна степень свободы относительного движения соответственно.

Если решается задача исключения избыточных связей в плоском механизме [9 – 12], то она существенно конкретизируется. Задача может быть сформулирована так: каким образом следует соединить звенья между собой при условии, что плоскости движения входного и выходного звеньев строго определены, в частности, когда входное и выходное звенья движутся в одной и той же плоскости. При этом все остальные звенья, соединяющие входное и выходное звенья, самоустанавливаются так, чтобы в целом в механизме не было избыточных связей.

Эти пары должны быть более подвижные, то есть более высоких классов, но относительные движения в них могут быть весьма ограниченными по величине. Такие высшие пары называются кинематическими парами квазивысоких классов (приблизительно высоких классов). Зная структуру конкретного плоского механизма, вполне возможно

отследить, как должны самоустанавливаться промежуточные звенья между собой, чтобы движение беспрепятственно передавалось от входного звена на выходное.

Дело в том, что уже второе звено плоского механизма (то есть следующее после входного) не может быть строго введено в плоскость движения первого звена, третье звено не может быть введено в плоскость движения второго звена и так далее [13 – 15]. Чтобы дать возможность второму, третьему и следующим звеньям двигаться в своих плоскостях, используют кинематические пары более высоких классов. Но эти относительные движения могут быть ограниченными по величине. Поэтому кинематические пары, соединяющие такие (не находящиеся в одной плоскости движения) звенья, следует проектировать особо, а значит считать их парами квазивысоких классов.

Поясним подробнее обнаружение избыточности связей и их устранение через пары квазивысоких классов. На рис. 1 показан шарнирный четырехзвенный механизм в двух проекциях (на рис. 1 умышленно непараллельность осей шарниров показана чрезмерной, чтобы точки пересечения осей пар не выходили за пределы рисунка). Видно, что геометрические оси шарниров реально не могут быть выполнены соосными или параллельными (линии, перпендикулярные осям шарниров $I - I$, $II - II$, $III - III$ и $IV - IV$, пересекаются между собой в точках K_1 , K_2 и K_3 соответственно).

Очевидно, что при повороте звена I передать движение к звену 3 проблемно, а при приведенных отклонениях осей – невозможно. Каждое такое пересечение осей шарниров, препятствующее свободе движения звеньев, – и есть избыточная связь.

Именно три пересечения осей шарниров $I - I$ и $II - II$, $II - II$ и $III - III$, $III - III$ и $IV - IV$ в точках K_1 , K_2 и K_3 свидетельствуют о невозможности трех относительных движений, то есть о трех избыточных связях, которые аналитически определяются по формуле $q = m(p - n)$ (где m – количество общих связей, накладываемых на механизм в целом; p – количество кинематических пар; n – количество подвижных звеньев; q – количество избыточных связей). Для этого плоского механизма $m = 3$, $p = 4$, $n = 3$ и $q = 3$. Чтобы ликвидировать эти избыточные связи достаточно обычные шарниры за-

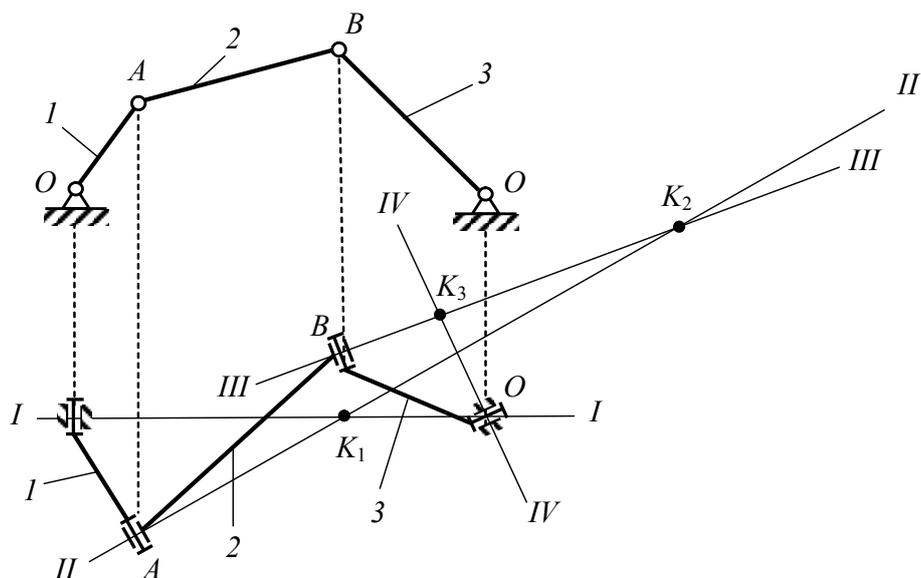


Рис. 1. Избыточность связей в шарнирном четырехзвенном механизме

менить на пары, позволяющие более одного относительного движения.

Реальное проявление избыточных связей при работе механизмов можно показать на примере плоского шарнира, когда соединяемые в шарнир звенья оказываются в пересекающихся плоскостях. На рис. 2 звенья 1 и 2 соединены в шарнир. Когда плоскости звеньев совпадают или параллельны (рис. 2, а), момент M_1 беспрепятственно передается звену 2 ($M_2 = M_1$). Если же плоскости, в которых движутся звенья, пересекаются в пространстве (рис. 2, б), то момент M_1 лишь частично передается звену 2, в виде момента M_2 , при этом появляется момент M_{21} в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой задано движение звену 1.

Это обстоятельство приводит к появлению контактов звеньев в точках, смещенных относительно центра шарнира (рис. 2, в). Появляющиеся при этом силы F_{21} и F_{12} , являются вредными, приводящими к потере передаваемой мощности, то есть становятся ненужными, избыточными связями. Это препятствие может быть преодо-

лено, если геометрические элементы звеньев, образующих пару, выполнить криволинейными, как это показано на рис. 2, г. Это не будет сферический шарнир в полном его понимании, это будет шарнир квазивысокого класса. Кривизна соединения может быть рассчитана, исходя из требований допусков на соединение звеньев.

Выводы

Проблема создания кинематических пар квазивысоких классов требует своего дальнейшего систематического решения. Применение шарнирных рычажных механизмов без избыточных связей особенно актуально в металлургических машинах, в которых во время эксплуатации размеры звеньев могут изменяться из-за износа в соединениях деталей, из-за возникающих в них деформаций, в том числе и от воздействия высоких температур. Это приводит к сокращению срока эксплуатации, уменьшению коэффициента полезного действия и надежности в эксплуатации.

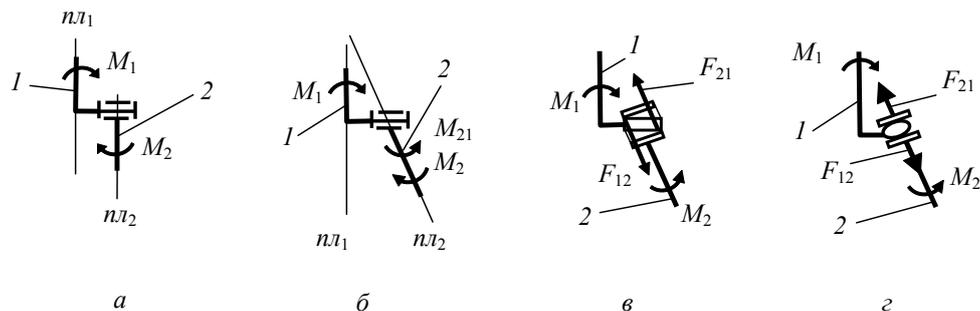


Рис. 2. Избыточность связи (плоский шарнир) и ее устранение

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х т. Т. 1. Машины и агрегаты доменных цехов / Ф.К. Иванченко, М.А. Тылкин, А.А. Королев и др. – М.: Металлургия, 1987. – 440 с.
2. Артоболовский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
3. Uicker J.J., Pennock G.R. Theory of Mechanisms. – New York: Oxford Univ. Press, 2003. – 928 p.
4. Родионов Н.А. Исследование долговечности подшипников шарнирно-рычажного механизма качения кристаллизатора МНЛЗ. – В кн.: Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича, А.Н. Евграфова. – СПб.: изд. Политехн. ун-та, 2013. С. 371 – 378.
5. Живаго Э.Я. Основные принципы классификации и создания кинематических пар. – В кн.: Труды Междунар. Науч.-техн. конференции. Вопросы проектирования, эксплуатации технических систем в металлургии, машиностроении, строительстве. Ч. II. – Старый Оскол: 1999. С. 142 – 144.
6. Butcher E.A., Hartman C. Efficient enumeration and hierarchical classification of planar simple-jointed kinematic chains: Application to 12- and 14-bar single degree-of-freedom chains // Mechanism and Machine Theory. 2005. Vol. 40. No. 9. P. 1030 – 1050.
7. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Расчет геометрических и кинематических параметров пространственного рычажного механизма с избыточной связью // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 3. С. 3 – 8.
8. Евграфов А.Н., Терешин В.А., Хростицкий А.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 2. С. 170 – 176.
9. Евграфов А.Н., Хростицкий А.А. Терешин В.А. Особенности задачи исследования геометрии механизма с избыточными связями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 135. С. 122 – 126.
10. Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терешин В.А. Методика силового расчета парадоксальных механизмов с избыточными связями. – В кн.: XL Неделя науки СПбГПУ. Материалы междунар. науч.-практ. конференции. Ч. IV. – СПб.: изд. Политехн. ун-та, 2011. С. 136 – 138.
11. About preparation of new section of terminology IFToMM on MMS: Chapter 16 “Compliant Mechanisms” / N.T. Pavlovic et al. – In book: Terminology for the mechanism and machine science: Proceedings of the Scientific Seminar (Saint-Petersburg, Russia, June 23-29, 2014). 25th Working Meeting of IFToMM Permanent Commission on MMS. – Gomel – Saint-Petersburg, 2016. P. 47 – 49.
12. Audi R. The Cambridge dictionary of philosophy. – Cambridge University Press, 1999. – 1031 p.
13. Boegelsack G. Twenty-five years IFToMM Commission A “Standardization of Terminology” – history, methodology, results and future work // Mech. Mach. Theory. 1998. Vol. 33. No. 1/2. P. 1 – 5.
14. Khurmi R.S., Gupta J.K. Theory of machines. – Ram Nagar, New Delhi, India, 2011. – 1071 p.
15. Saura M., Celdran A., Dopico D., Cuadrado I. Computational structural analysis of planar multi-body systems with lower and higher kinematic pairs. Mechanism and Machine Theory, 71. – Elsevier, 2014. P. 79 – 92.

© 2021 г. Л.Н. Гудимова, Л.Т. Дворников,
А.Г. Никитин

Поступила 7 декабря 2020 г.