

УДК 621.412

doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-39-46

Структурный анализ ромбического механизма с развитым шатуном вытеснительной группы двигателя Стирлинга

Г.А. Тимофеев, И.З. Катаев, Д.М. Самсоненко

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Structural analysis of a rhombic mechanism with the advanced connecting rod in the Stirling engine replacing group

G.A. Timofeev, I.Z. Kataev, D.M. Samsonenko

Bauman Moscow State Technical University

Ввиду высокой удельной теплоты сгорания ископаемое топливо на основе углеводородов считается основным источником энергии. Однако источники ископаемого топлива истощаются, вследствие чего становится все более необходимой разработка универсального двигателя, способного работать не только на различных видах ископаемого топлива, но и на возобновляемых источниках энергии. Примером такого устройства является двигатель Стирлинга бета-типа. Разработка механизма привода для такой конфигурации двигателя Стирлинга является важной составной частью проектирования энергетического агрегата в целом. Чтобы обеспечивать долговременную и безотказную работу такого двигателя, ромбический механизм привода не должен иметь избыточных связей. Создание механизма без избыточных связей является сложной задачей. Для ее решения с использованием метода графов проведен структурный анализ ромбического механизма привода с развитым шатуном вытеснительной группы.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, ромбический механизм, развитой шатун вытеснительной группы, структурный анализ, метод графов

Fossil fuel based on the hydrocarbons appears to be the main source of energy due to its high combustion specifics. However, the fossil fuel resources are depleting, thus making it increasingly necessary to design and develop a universal engine capable of running not only on various types of fossil fuels, but also on the renewable energy sources. An example of such an engine is the beta-type Stirling engine. Design and development of the drive mechanism for such Stirling engine configuration is an important part in designing the power unit as a whole. To ensure long-term and trouble-free operation of such an engine, the rhombic drive mechanism should not have any redundant connections. Creating a mechanism without redundant connections is a difficult task. To solve it using the graph method, structural analysis of the rhombic drive mechanism with the advanced connecting rod in the displacement group was carried out.

Keywords: Stirling engine, rhombic mechanism, advanced connecting rod in the displacement group, structural analysis, graph method

хронизирующие колеса, жестко связанные с кривошипами, зацепляются КП первого класса E , реализованной в контакте бочкообразными зубьями.

Алгоритм структурного анализа различных сложных зубчатых механизмов методом графов, подробно описанный в работах [2, 16], включает в себя следующие основные шаги.

1. Построение графа механизма на основе структурной схемы. Каждое звено механизма — это вершина графа, а КП — его ребра. Каждому ребру ставится в соответствие матрица подвижности КП ($f''f'f'''$). Каждый элемент матрицы обозначает число допускаемых парой независимых линейных f' , угловых f'' и винтовых f''' перемещений.

2. Расчет числа независимых контуров графа по формуле

$$k = p - n + 1, \quad (1)$$

где p — число КП; n — число звеньев механизма.

3. Удаление из графа механизма k ребер осуществляется таким образом, чтобы в нем не осталось замкнутых контуров. Полученный остов — дерево графа.

4. Последовательное добавление по одному ребру к дереву, получение независимых контуров. Выбор первого контура так, чтобы в него входили ведущее звено и стойка.

5. Расчет для каждого контура числа подвижностей f_k и связей q_k . Определение подвижностей каждого контура по формуле

$$(W)_k = \sum_{i=1} (f)_i + (-1)(330) + (-1)(W)_0, \quad (2)$$

где $(W)_k$ — матрица подвижностей анализируемого контура; $\sum (f)_i$ — сумма матриц подвижностей КП, являющихся характеристиками контура; (330) — матрица подвижностей, обеспечивающая замыкание контура без натяга; $(W)_0$ — матрица подвижностей входного звена (основной подвижности).

6. Анализ контуров, имеющих избыточные подвижности. Определение, какие звенья или их группы имеют местную подвижность, и какого она класса:

$$(f)_r = \sum_{i=2}^{r+1} (f)_i + (-1)(330) + (-1) \sum_{j=1}^{r-1} (f)_{j \in r}, \quad (3)$$

где $(f)_r$ — матрица подвижности упорядоченной r -выборки звеньев: одного звена или же

Таблица 1

Кинематические пары ромбического механизма с развитым шатуном ВГ и матрицы их подвижностей

КП	Звенья, составляющие КП	Матрица подвижностей	Класс КП
A	0–1	(100)	V_1
B	1–3	(300)	III_1
C	2–7	(100)	V_1
D	2–3	(300)	III_1
F	3–8	(100)	V_1
A'	0–4	(100)	V_1
B'	4–6	(300)	III_1
C'	5–7	(100)	V_1
D'	5–6	(300)	III_1
F'	6–8	(100)	V_1
L	7–10	(300)	III_1
M	8–9	(300)	III_1
E	1–4	(320)	I_5
K	9–10	(110)	IV_2
H	9–0	(110)	IV_2
G	10–0	(110)	IV_2

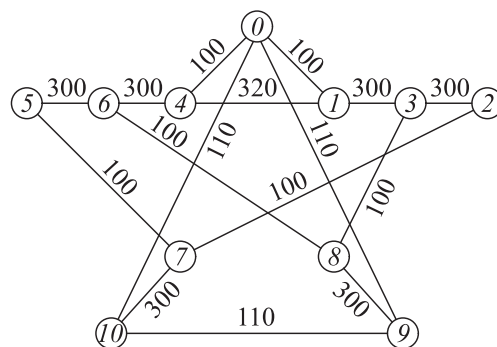


Рис. 2. Граф ромбического механизма с развитым шатуном ВГ двигателя Стирлинга

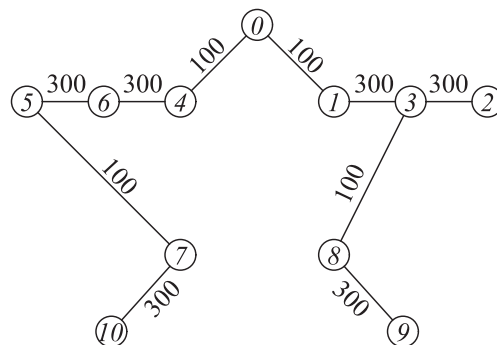


Рис. 3. Дерево графа ромбического механизма с развитым шатуном ВГ двигателя Стирлинга

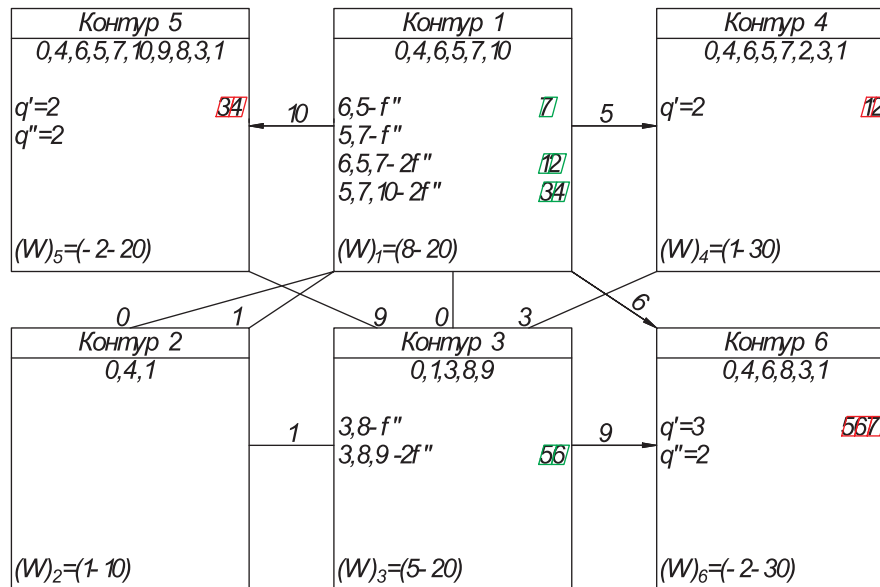


Рис. 4. Контурная сеть графа

двигателя Стирлинга, показанный на рис. 2. По формуле (1) определяем число независимых контуров.

Удаляя из графа механизма шесть ребер, получаем его дерево (рис. 3), а добавляя по одному удаленному ребру — шесть независимых контуров: $A'B'D'C'LG$, $A'EA$, $ABFMH$, $ABDCC'D'B'A'$, $ABFMKLC'D'B'A'$ и $ABFF'B'A'$.

По формулам (2) и (3) рассчитываем подвижности контуров и местные подвижности звеньев, входящих в их состав. Результаты расчета приведены в табл. 2, где ребра, уже участвовавшие в расчете, перечеркнуты, а ребра, добавленные к дереву, обозначены штриховыми линиями.

Проверку расчета выполняем по выражению [2, 16]

$$W_0 + \sum_1^k f_r - \sum_1^k q_r = \sum_{j=1}^{p-k} f_{d_j} - \sum_{i=5}^5 i p_{xi}, \quad (4)$$

где W_0 — основная подвижность механизма; $\sum f_r$ и $\sum q_r$ — суммы подвижностей и ИС механизма, вычисленные по независимым контурам; $\sum f_{d_j}$ — сумма подвижностей КП, принадлежащих дереву; $\sum i p_{xi}$ — сумма КП i -го класса из числа хорд.

После подстановки данных из табл. 2 в формулу (4) получаем

$$1 + 9 - 11 = 22 - (5 \cdot 2 + 4 \cdot 3 + 1 \cdot 1) = -1.$$

Равенство выполнено, следовательно, расчет проведен верно.

Из табл. 2 следует, что контуры 1 и 3 обладают местной подвижностью. Для графа строим контурную сеть, показанную на рис. 4, где q' — число линейных ИС; q'' — число угловых ИС.

Анализируя ее по описанным ранее правилам, выясняем, что четыре линейные ИС в контурах 4 и 5 ликвидированы подвижностями контура 1. Две линейные ИС контура 6 устранены подвижностями контура 3 и одна — подвижностью контура 1.

Анализ результатов вычислений выявил, что в механизме остались четыре угловые ИС (по две связи в контурах 5 и 6), две местные угловые подвижности, расположенные на звеньях 5, 7 и 3, 8 и одна собственная подвижность $(W)_0 = 1$.

Вывод

Структурный анализ ромбического механизма с развитым шатуном ВГ двигателя Стирлинга показал, что в двигателе устранены не все ИС. Однако на практике двигатель с внешним подводом тепла должен иметь очень жесткую конструкцию [2, 17]. В случае полного устранения ИС жесткость механизма может значительно уменьшиться, что отрицательно скажется на качестве его работы и приведет к ухудшению внешней динамики. Частичное устранение ИС позволяет найти компромисс между требуемой жесткостью конструкции и точностью изготовления ее деталей [18]

Литература

- [1] Решетов Л.Н. *Самоустанавливающиеся механизмы*. Москва, Машиностроение, 1991. 288 с.
- [2] Павлова Л.А. *Метод графов в структурном исследовании пространственных механизмов*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1967. 187 с.
- [3] Mason L.S. Solar Stirling for deep space applications. *AIP Conf. Proc.*, 2000, vol. 504, no. 1, pp. 1272–1277, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1290939>
- [4] Афанасьев В.А., Цейтлин А.М., Поляков П.Б. и др. Оценка КПД криогенного двигателя Стирлинга, входящего в состав газификатора сжиженного природного газа системы питания газовым потоком судового двигателя. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология*, 2013, № 1, с. 78–83.
- [5] Афанасьев В.А., Марутов Г.А., Цейтлин А.М. Сравнение экологических и технических параметров парокompрессионных холодильных машин и газовых холодильных машин, работающих по циклу Стирлинга. *Вестник Астраханского государственного технического университета*, 2011, № 2, с. 11–15.
- [6] Хабаров О.О. Конструкции тепловых двигателей Стирлинга для судов лесосплавного флота. *Наука, техника и образование*, 2015, № 2, с. 68–70.
- [7] Карницкий В.Ю., Ботирова А.У. Эксплуатация автономных энергетических установок с двигателями Стирлинга в регионах России, где нет запасов традиционных энергоносителей. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2018, № 12, с. 115–117.
- [8] Laazaar K., Boutammachte N. *Development of a new technique of waste heat recovery in cement plants based on Stirling engine technology*. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 210, art. 118316, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118316>
- [9] Мехтиев А.Д., Югай В.В., Нешина Е.Г. и др. Альтернативный источник энергии для автономных потребителей на основе низкотемпературного двигателя Стирлинга. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика*, 2020, т. 20, № 3, с. 78–87, doi: <https://doi.org/10.14529/power200308>
- [10] Мехтиев А.Д., Югай В.В., Алькина А.Д. и др. Микро электростанция с двигателем с внешним подводом теплоты, работающая на энергии тепловых потерь коксового производства. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2019, № 1–1, с. 41–47, doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.79.1.007>
- [11] Круглов М.Г., ред. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Машиностроение, 1977. 150 с.
- [12] Уокер Г. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Машиностроение, 1986. 405 с.
- [13] Senft J.R. *Theoretical limits on the performance of Stirling*. *Int. J. Energy Res.*, 1998, vol. 22, no. 11, pp. 991–1000, doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(199809\)22:11%3C991::AID-ER427%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(199809)22:11%3C991::AID-ER427%3E3.0.CO;2-U)
- [14] Харрисбергер Л. Обзор методов структурного синтеза трехмерных механизмов. *Конструирование и технология машиностроения*, 1965, № 2, с. 129–138.
- [15] Тимофеев Г.А., Катаев И.З. Особенности кинематики ромбических механизмов. *Инженерный вестник*, 2015, № 10, URL: <http://ainjournal.ru/doc/821242.html>
- [16] Тимофеев Г.А., Самойлова М.В. Использование метода графов в структурном анализе планетарно-волнового механизма. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2, с. 3–14.
- [17] Тимофеев Г.А. Исследование структуры волновой зубчатой передачи с генератором волн внешнего деформирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2016, № 3, с. 3–10.
- [18] Пейсах Э.Е., Нестеров В.А. *Система проектирования плоских рычажных механизмов*. Москва, Машиностроение, 1988. 232 с.

References

- [1] Reshetov L.N. *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy* [Self-aligning mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 288 p. (In Russ.).

- [2] Pavlova L.A. *Metod grafov v strukturnom issledovanii prostranstvennykh mekhanizmov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Method of graphs in structural study of spatial mechanisms. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MHTU Publ., 1967. 187 p. (In Russ.).
- [3] Mason L.S. *Solar Stirling for deep space applications*. AIP Conf. Proc., 2000, vol. 504, no. 1, pp. 1272–1277, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1290939>
- [4] Afanasyev V.A., Tseytlin A.M., Polyakov P.B. et al. Evaluation of efficiency of Stirling cryogenic engine, included in the evaporator of liquefied natural gas of the system gas flow supply of the marine engine. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Ser. Marine Engineering and Technologies], 2013, no. 1, pp. 78–83. (In Russ.).
- [5] Afanasyev V.A., Marutov G.A., Tseytlin A.M. Comparison of ecological and technical parameters of vapor compression and gas refrigerating machines operating on the Stirling cycle. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan State Technical University], 2011, no. 2, pp. 11–15. (In Russ.).
- [6] Khabarov O.O. Stirling heat engine designs for forestry vessels. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2015, no. 2, pp. 68–70. (In Russ.).
- [7] Karnitskiy V.Yu., Botirova A.U. Operation of autonomous energy installations with Stirling engines in the regions of Russia where there are no traditional energy carriers inserts. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2018, no. 12, pp. 115–117. (In Russ.).
- [8] Laazaar K., Boutammachte N. *Development of a new technique of waste heat recovery in cement plants based on Stirling engine technology*. Appl. Therm. Eng., 2022, vol. 210, art. 118316, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118316>
- [9] Mekhtiev A.D., Yugay V.V., Neshina E.G. et al. Alternative low temperature Stirling engine based source of energy for autonomous consumers. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 3, pp. 78–87, doi: <https://doi.org/10.14529/power200308> (in Russ.).
- [10] Mekhtiev A.D., Yugay V.V., Alkina A.D. et al. Micro powerplant with engine with external heat supply, working on energy of heat losses of coke production. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2019, no. 1–1, pp. 41–47, doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.79.1.007> (in Russ.).
- [11] Kruglov M.G., ed. *Dvigateli Stirlinga* [Stirling engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 150 p. (In Russ.).
- [12] Walker G. *Stirling engines*. Clarendon Press, 1980. 532 p. (Russ. ed.: *Dvigateli Stirlinga*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 405 p.)
- [13] Senft J.R. *Theoretical limits on the performance of Stirling*. Int. J. Energy Res., 1998, vol. 22, no. 11, pp. 991–1000, doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(199809\)22:11%3C991::AID-ER427%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(199809)22:11%3C991::AID-ER427%3E3.0.CO;2-U)
- [14] Kharrisberger L. Review of methods for structural synthesis of three-dimensional mechanisms. *Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya*, 1965, no. 2, pp. 129–138. (In Russ.).
- [15] Timofeev G.A., Kataev I.Z. *Features of kinematics of rhombic mechanisms*. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2015, no. 10, URL: <http://ainjournal.ru/doc/821242.html> (in Russ.).
- [16] Timofeev G.A., Samoylova M.V. Application of method of graphs for structural analysis of planetary and wave mechanism. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2010, no. 2, pp. 3–14. (In Russ.).
- [17] Timofeev G.A. Investigation of the structure of a wave gear with an external deformation wave generator. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2016, no. 3, pp. 3–10. (In Russ.). (Eng. version: J. Mach. Manuf. Reliab., 2016, vol. 45, no. 3, pp. 191–198, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618816030195>)
- [18] Peysakh E.E., Nesterov V.A. *Sistema proektirovaniya ploskikh ryuchaznykh mekhanizmov* [Flat lever mechanism design system]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 232 p. (In Russ.).

Информация об авторах

ТИМОФЕЕВ Геннадий Алексеевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

КАТАЕВ Инал Заурович — аспирант кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kataev.in@yandex.ru).

САМСОНЕНКО Дмитрий Максимович — инженер-исследователь, НИИ автоматизации производственных процессов. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: samsondm97@gmail.com).

Information about the authors

TIMOFEEV Gennady Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

KATAEV Inal Zaurovich — Postgraduate, Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kataev.in@yandex.ru).

SAMSONENKO Dmitry Maksimovich — Research Engineer. Research Institute of Automation of Manufacturing Processes. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: samsondm97@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тимофеев Г.А., Катаев И.З., Самсоненко Д.М. Структурный анализ ромбического механизма с развитым шатуном вытеснительной группы двигателя Стирлинга. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 6, с. 39–46, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-39-46

Please cite this article in English as:

Timofeev G.A., Kataev I.Z., Samsonenko D.M. Structural analysis of a rhombic mechanism with the advanced connecting rod in the Stirling engine replacing group. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 6, pp. 39–46, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-39-46



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
под редакцией А.Н. Морозова**

**«Физические основы механики. Колебания
и волны. Элементы теории относительности.
Модуль 1»**

Авторы: Д.К. Веретимус, Н.К. Веретимус

Пособие предназначено для самостоятельного изучения студентами дисциплины «Физика». Рассмотрены теоретические основы следующих разделов физики: кинематика, динамика, механические колебания, волны, специальная теория относительности. Приведены базовые понятия и определения. В каждом разделе даны примеры решения тематических задач и задачи для самостоятельного решения.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана всех специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>