

УДК 621.01

## Структурный анализ механизмов параллельной структуры с четырьмя и пятью степенями свободы

**А.В. Календарев, А.Е. Лысогорский, В.А. Глазунов**

*Рассмотрены вопросы структурного анализа механизмов параллельной структуры. Данная задача решается на основе применения разных структурных формул для разных частей механизма.*

**Ключевые слова:** параллельная структура, структурный анализ, синтез механизмов.

## Structural Analysis of the Mechanisms of Parallel Structure With four or Five Degrees of Freedom

**A.V. Kalendarev, A.E. Lysogorskiy, V.A. Glazunov**

*The article deals with the structural analysis of the mechanisms of parallel structure. This task is solved on the basis of application of different structural formulas for different parts of the mechanism.*

**Keywords:** parallel structure, structural analysis, synthesis of mechanisms.

Механизмы параллельной структуры содержат несколько кинематических цепей, соединяющих основание и выходное звено, и воспринимают нагрузку подобно пространственным фермам. Этим обусловлены их повышенные показатели по грузоподъемности, а также тот интерес, который они вызывают у исследователей [1–6].

В работах представлены различные применения подобного рода механизмов в технологических, испытательных, измерительных, обучающих системах [1–3], рассмотрены принципы классификации, кинематического и силового анализа, особых положений [4–6].

Вместе с тем, некоторые важные вопросы, связанные с исследованием этих объектов, до сих пор не решены. В частности, речь идет о структурном анализе, поскольку не всегда ясно, какую из структурных формул следует применять в том или ином случае.

В данной работе рассмотрен структурный анализ механизмов параллельной структуры с частичной кинематической развязкой. Это обусловлено тем, что имеет место частичный механизм, выполняющий движения в плоскости. К таким движениям могут добавляться перемещение в вертикальном направлении, а также наклон вокруг горизонтальной оси.

Вначале представим механизм, вертикальные перемещения которого осуществляются одним приводом (рис. 1). Данное устройство состоит из основания 1, выходного звена 2, линейного двигателя 3, подвижное звено 4 которого связано с рамкой 5. На раме расположен



**КАЛЕНДАРЕВ**  
Артем Вадимович  
аспирант  
(МГТУ им. А.Н. Косыгина)

**KALENDAREV**  
Artem Vadimovich  
Post-Graduate  
(Moscow, Russian Federation,  
Moscow State Textile University  
'A.N. Kosygin')



**ЛЫСОГОРСКИЙ**  
Александр Евгеньевич  
аспирант  
(МГТУ им. А.Н. Косыгина)

**LYSOGORSKIY**  
Alexander Evgenievich  
Post-Graduate  
(Moscow, Russian Federation,  
Moscow State Textile University  
'A.N. Kosygin')



**ГЛАЗУНОВ**  
Виктор Аркадьевич  
доктор технических наук,  
доктор философских наук,  
профессор  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**GLAZUNOV**  
Victor Arkadyevich  
Dr. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Philos.),  
Professor  
(Moscow, Russian Federation,  
MSTU named  
after N.E. Bauman)

частичный плоский механизм с линейными двигателями  $6, 6', 6''$  и вращательными кинематическими парами  $7, 7', 7'', 8, 8', 8''$ , связывающие промежуточные звенья с выходным звеном 2. Определим число степеней свободы плоского механизма по структурной формуле П.Л. Чебышева:

$$W = 3(n - 1) - 2p_5,$$

где  $n$  — число звеньев;  $p_5$  — число пар 5-го класса (одноподвижных пар).

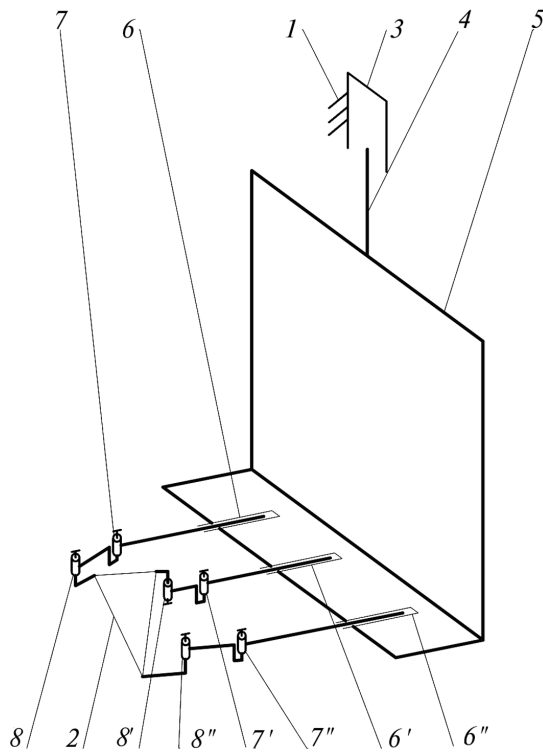


Рис. 1. Механизм параллельной структуры с четырьмя степенями свободы с линейными двигателями и вращательными кинематическими парами

В плоском механизме содержится восемь звеньев, девять кинематических пар 5-го класса — шесть вращательных кинематических пар и три двигателя поступательного перемещения.

Исходя из изложенного, рассчитаем число степеней свободы в данном механизме:

$$W = 3(8 - 1) - 2 \cdot 9 = 3.$$

Если к этим степеням свободы добавить движение рамки 5, то получим четыре степени свободы. В данном случае частичный плоский механизм, имеющий параллельную структуру, последовательно соединен с линейным двигателем.

Общее число степеней свободы можно определить суммированием числа степеней свободы каждой из последовательно соединенных частей.

Рассмотрим механизм, в котором три вращательные пары  $8, 8', 8''$  заменены на сферические (рис. 2). Это сделано для того, чтобы исключить избыточные связи. Остальные элементы механизма имеют те же обозначения. В плоском механизме содержится восемь звеньев, три кинематические пары 3-го класса, а также шесть кинематических пар 5-го класса — три вращательные кинематические пары и три двигателя поступательного перемещения.

Для данного механизма найдем число степеней свободы по формуле А.П. Малышева:

$$W = 6(n - 1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1;$$

$$W = 6(8 - 1) - 5 \cdot 6 - 3 \cdot 3 = 3,$$

где  $n$  — число звеньев;  $p_1$  — число пар 1-го класса (пятиподвижных пар);  $p_2$  — число пар 2-го класса (четыреподвижных пар);  $p_3$  — число пар 3-го класса (трехподвижных пар);  $p_4$  — число пар 4-го класса (двухподвижных пар);  $p_5$  — число пар 5-го класса (одноподвижных пар). Данный частичный механизм имеет три степени свободы и является плоским, поскольку оси вращательных пар  $8, 8', 8''$  параллельны.

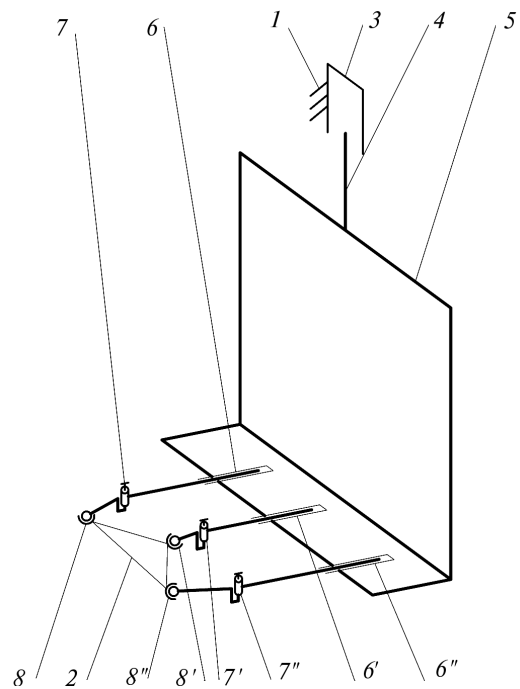


Рис. 2. Механизм параллельной структуры с четырьмя степенями свободы с линейными двигателями, вращательными и сферическими кинематическими парами

Если к этим степеням свободы добавить движение рамки 5, то вновь получим четыре степени свободы. В данном случае частичный плоский механизм, имеющий параллельную структуру, вновь последовательно соединен с линейным двигателем. Общее число степеней свободы вновь можно получить суммированием числа степеней свободы каждой из последовательно соединенных частей.

Таким образом, рассмотрены два механизма параллельной структуры с четырьмя степенями свободы, у которых имеются три поступательных движения и одно вращение.

Проанализируем механизм, в котором имеет место еще одно вращение вокруг горизонтальной оси (рис. 3). Вновь сначала представим случай, когда в плоском механизме содержатся линейные двигатели и вращательные кинематические пары (все обозначения соответствуют приведенным выше). Однако, для осуществления вращения вокруг горизонтальной оси в механизм добавлены еще одна вращательная кинематическая пара 9, сопряженная с подвижным звеном 4 линейного двигателя 3, а также еще один линейный двигатель 10 с подвижным звеном 11, которое связано с рамкой 5 посредством двух вращательных кинематических пар 12 и 12'.

Число степеней свободы плоского механизма, включающего линейные двигатели 6, 6', 6'', а также вращательные кинематические пары 7, 7', 7'' и 8, 8', 8'' и выходное звено 2, определенное по структурной формуле П.Л. Чебышева, вновь равно трем.

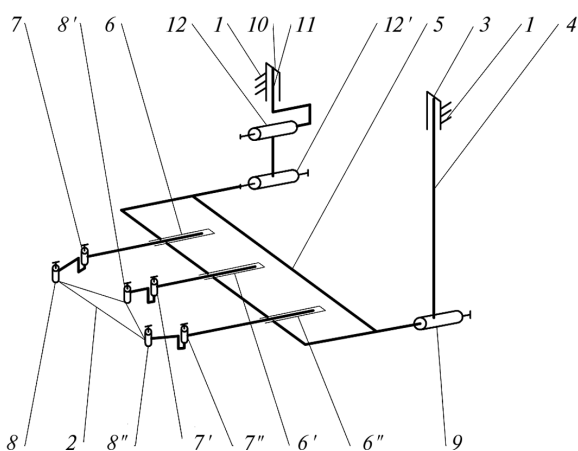


Рис. 3. Механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы, с линейными двигателями и вращательными кинематическими парами

Далее по формуле П.Л. Чебышева подсчитаем число степеней свободы для частичного плоского механизма, содержащего линейные двигатели 3 и 10, подвижные звенья 4 и 11, а также вращательные кинематические пары 9, 12 и 12':

$$W = 3(n - 1) - 2p_5; \quad W = 3(5 - 1) - 2 \cdot 5 = 2,$$

где  $n$  — число звеньев;  $p_5$  — число пар 5-го класса (одноподвижных пар).

Таким образом, получен механизм с пятью степенями свободы. В данном случае частичный плоский механизм, имеющий параллельную структуру, последовательно соединен с другим плоским механизмом. Общее число степеней свободы можно получить суммированием числа степеней свободы каждой из последовательно соединенных частей.

Вновь рассмотрим механизм, в котором три вращательные пары 8, 8', 8'' заменены на сферические (рис. 4). Это сделано для того, чтобы исключить избыточные связи. Остальные элементы механизма имеют те же обозначения. В плоском механизме содержится восемь звеньев, три кинематические пары 3-го класса, а также шесть кинематических пар 5-го класса — три вращательные кинематические пары и три двигателя поступательного перемещения.

Для данного механизма число степеней свободы, найденное по формуле А.П. Малышева, равно трем. Этот частичный механизм имеет три степени свободы и является плоским, поскольку оси вращательных пар 8, 8', 8'' параллельны.

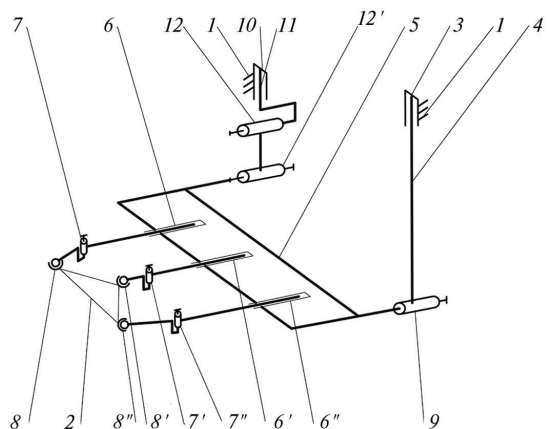


Рис. 4. Механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы, с линейными двигателями, сферическими и вращательными кинематическими парами

Для осуществления вращения вокруг горизонтальной оси в механизм вновь добавлены еще одна вращательная кинематическая пара 9, сопряженная с подвижным звеном 4 линейного двигателя 3, а также еще один линейный двигатель 10 с подвижным звеном 11, которое связано с рамкой 5 посредством двух вращательных кинематических пар 12 и 12'. Число степеней свободы для указанного частичного плоского механизма, содержащего линейные двигатели 3 и 10, подвижные звенья 4 и 11, а также вращательные кинематические пары 9, 12 и 12', найденное по формуле П.Л. Чебышева, вновь равно двум.

Таким образом, снова получен механизм с пятью степенями свободы. В данном случае частичный плоский механизм, имеющий параллельную структуру, снова последовательно соединен с другим плоским механизмом. Общее число степеней свободы вновь можно получить суммированием числа степеней свободы каждой из последовательно соединенных частей.

## Выводы

1. Для механизмов параллельной структуры, выполняющих плоские движения, в зависимости от наличия вращательных или сферических кинематических пар, целесообразно применять разные структурные формулы — П.Л. Чебышева или А.П. Малышева.

2. Если частичный плоский механизм, имеющий параллельную структуру, последовательно соединен с другим плоским механизмом, то общее число степеней свободы можно получить

суммированием числа степеней свободы каждой из последовательно соединенных частей.

## Литература

1. Merlet J.P. *Parallel robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 372 p.
2. Gosselin C.M., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains // *IEEE Transactions on Robotics and Automatics*. 1990. Vol. 6(3). P. 281—290.
3. Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations // *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 2004. Vol. 23. P. 1021—1039.
4. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 95 с.
5. Крайнев А.Ф., Глазунов В.А. Новые механизмы относительного манипулирования // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1994. № 5. С. 106—117.
6. Arakelian V., Briot S., Glazunov V. Increase of singularity-free zones in the workspace of parallel manipulators using mechanisms of variable structure // *Mechanism and Machine Theory*. 2008. Vol. 43. P. 1129—1140.

## References

1. Merlet J.P. *Parallel robots*. Kluwer Academic Publishers. 2000. 372 p.
2. Gosselin C.M., Angeles J. *Singularity analysis of closed-loop kinematic chains*. *IEEE Transactions on Robotics and Automatics*. 1990, vol. 6(3), pp.281—290.
3. Gogu G. *Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations*. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 2004, vol. 23, pp. 1021—1039.
4. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Krainev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noi struktury* [Spatial mechanisms of parallel structure]. Moscow, Nauka publ., 1991. 95 p.
5. Krainev A.F., Glazunov V.A. *Novye mekhanizmy otositel'nogo manipulirovaniia* [New mechanisms to manipulate the relative regulation]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 1994, no. 5, pp. 106—117.
6. Arakelian V., Briot S., Glazunov V. *Increase of singularity-free zones in the workspace of parallel manipulators using mechanisms of variable structure*. *Mechanism and Machine Theory*. 2008, vol. 43, pp. 1129—1140.

Статья поступила в редакцию 13.12.2012

## Информация об авторах

**КАЛЕНДАРЕВ Артем Вадимович** (Москва) — аспирант кафедры прикладной механики. МГТУ им. А.Н. Косыгина (119071, Москва, Российская Федерация, ул. Малая Калужская, д. 1, e-mail: kalendarev.artem@gmail.com).

**ЛЫСОГОРСКИЙ Александр Евгеньевич** (Москва) — аспирант кафедры прикладной механики. МГТУ им. А.Н. Косыгина (119071, Москва, Российская Федерация, ул. Малая Калужская, д. 1, e-mail: Lazo-kazo@mail.ru).

**ГЛАЗУНОВ Виктор Аркадьевич** (Москва) — доктор технических наук, доктор философских наук, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1, e-mail: vaglznv@mail.ru).

## Information about the authors

**CALENDAREV Artem Vadimovich** (Moscow) — Post-Graduate of «Applied Mechanics» Department. Moscow State Textile University 'A.N. Kosygin' (119071, Malaja Kaluzskaja Street 1, Moscow, Russian Federation, e-mail: kalendarev.artem@gmail.com).

**LYSOGORSKIY Alexander Evgenievich** (Moscow) — Post-Graduate of «Applied Mechanics» Department. Moscow State Textile University 'A.N. Kosygin' (119071, Malaja Kaluzskaja Street 1, Moscow, Russian Federation, e-mail: Lazo-kazo@mail.ru).

**GLAZUNOV Victor Arkadievich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Philos.), Professor of «Computer systems of automation of production» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya Street 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: vaglznv@mail.ru).