

УДК 681.532.8

## ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕХАНИЗМА ОПТИЧЕСКОГО КОММУТАТОРА

<sup>1</sup>Егоров И.Н., <sup>1</sup>Кобзев А.А., <sup>2</sup>Потанин Ю.С., <sup>1</sup>Шевцов Д.С.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: egorovmtf@mail.ru;

<sup>2</sup>ФКП ГЛП «Радуга», Радужный, e-mail: u1414@yandex.ru

В данной статье приводятся результаты классификации видов и анализа кинематических схем механизмов с параллельной, параллельно-перекрестной и параллельно-переменной структурой. На основе результатов анализа выбирается наиболее адекватный вариант кинематической структуры оптического коммутатора, применяющегося в оптических системах с набором излучателей, и даются рекомендации по применению исполнительных механизмов в составе коммутатора. Оптический коммутатор позволяет реализовать скоростной опрос излучателей с одновременной компенсацией угловых разъюстировок их оптических осей, возникающих под действием климатических и вибрационных факторов, а также интенсивного нагрева. Компенсация достигается за счет специфического позиционирования оптического элемента (призмы) в пространстве по трем переносным и двум ориентирующим степеням подвижности, что позволяет расположить отраженную ось излучения в необходимом направлении.

**Ключевые слова:** параллельная кинематика, гексапод, оптический коммутатор, электропривод, оптическая система с набором излучателей, призма

## SELECTION OF KINEMATIC STRUCTURE OF AN OPTICAL SWITCH'S MECHANISM

<sup>1</sup>Egorov I.N., <sup>1</sup>Kobzev A.A., <sup>2</sup>Potinin Y.S., <sup>1</sup>Shevtsov D.S.

<sup>1</sup>Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,  
Vladimir; e-mail: egorovmtf@mail.ru;

<sup>2</sup>State Laser Polygon «Raduga», Raduzhnyi, e-mail: u1414@yandex.ru

In this article presents a results of analysis and classification of the spectrum of mechanisms with parallel, cross-parallel and variable-parallel structure for the subsequent selection of the kinematic structure of the optical switch's mechanism used in optical systems with a set of optical emitters. Also provides guidance on the application of actuators. Optical switch allows for quick emitter's switching with simultaneous compensation of angular misalignments of the optical axes, arising under the influence of climatic factors and vibration, as well as the intense heat. Compensation is achieved by a specific positioning of the optical element (prism) in the space of three transporting and two orienting degrees of mobility that allows to position the axis of the reflected radiation in the desired direction.

**Keywords:** parallel kinematics, hexapod, optical switch, electric drive, multichannel optical system, prism

В области изучения взаимодействия оптического излучения с материалами актуальной научно-технической проблемой является разработка оптических коммутаторов, обеспечивающих переключение между каналами оптической системы с набором излучателей. В работах [6, 8] данная проблема рассматривается в комплексе с решением задачи объединения в оптическом коммутаторе функций как автоюстировки, так и переключения оптических каналов. Под автоюстировкой в данном случае понимается компенсация угловых «уводов» оптических осей излучателей от эталонного положения посредством специфического позиционирования и ориентирования оптического элемента (призмы) в пространстве. В соответствии с результатами анализа кинематических схем механизмов с параллельной, параллельно-перекрестной и параллельно-переменной структурой [1–5, 7]

и выводами сделанными в работах [6, 8] за основу оптического коммутатора принят юстирующий механизм с параллельной кинематикой.

**Цель исследования.** Выбор кинематической структуры оптического коммутатора на основе анализа кинематических схем механизмов с параллельной структурой.

### Материалы и методы исследования

Манипуляционные системы (МС) с последовательной структурой (с разомкнутой кинематической цепью) состоят из нескольких звеньев, последовательно соединенных различными типами соединений. При выполнении технологических операций со связанным объектом кинематическая цепь замыкается. Если к МС мехатронных и робототехнических устройств предъявляются повышенные требования по грузоподъемности, жесткости и точности, то предпочтение, по сравнению с механизмами с последовательным расположением звеньев, отдается механизмам с параллельной структурой [1–5, 7].

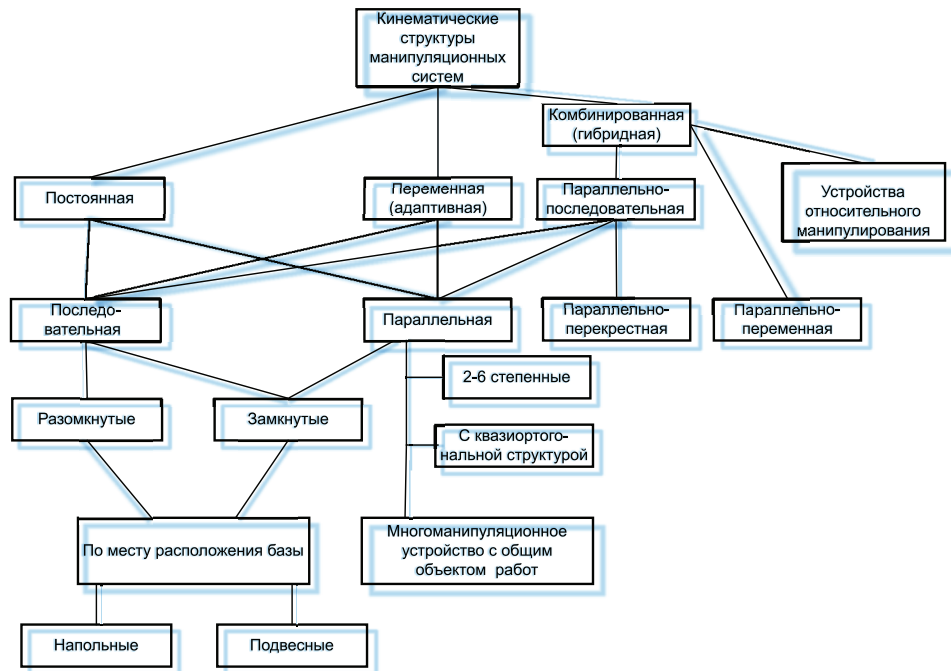


Рис. 1. Кинематические структуры манипуляционных систем

Классификация кинематических структур МС робототехнических и мехатронных устройств может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.

Выходное звено механизмов с параллельной структурой (МСПС) связано с основанием несколькими кинематическими цепями, каждая из которых оснащена приводом, либо накладывает некоторое количество связей на движение выходного звена. Поэтому к недостаткам МСПС следует отнести меньшее рабочее пространство по сравнению с классическими последовательными структурами, относительно небольшую их манипулятивность и более сложную конструкцию механизма.

Общее число звеньев кинематической цепи, соединяющей выходное звено МСПС с основанием, не больше шести. Такая кинематическая цепь при отсутствии локальной внутренней подвижности и линейной зависимости между кинематическими винтами пар, налагает  $D$  связей на движение выходного звена:

$$D = -6n + 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1, \quad (1)$$

где  $n$  – количество промежуточных звеньев цепи;  $p_5, \dots, p_1$  – количество одно-, ..., пятиподвижных пар (подсчет  $p_5, p_4, \dots, p_1$  ведется после замены кинематических соединений эквивалентными кинематическими парами). Если  $D = 0$ , то присоединяемая цепь не налагает связей на движение выходного звена; при  $D < 0$  в присоединяемой цепи имеется подвижность, не связанная с перемещением выходного звена; если  $D > 0$ , то присоединение цепи приводит к уменьшению числа степеней свободы на  $D$ .

Далее будут рассматриваться структуры, у которых  $D \geq 0$ . При этом структурная формула имеет вид:

$$W = 6 - \sum_{i=1}^k D_i = 6 + \sum_{i=1}^k (6n_i - 5p_{5,i} - \dots - p_{1,i}), \quad (2)$$

где  $W$  – число степеней свободы механизма;  $n_i$  – количество промежуточных звеньев  $i$ -й соединительной

цепи;  $p_{5,i}, \dots, p_{1,i}$  – количество одно-, ..., пятиподвижных пар  $i$ -й цепи;  $i, k$  – номер и число присоединяемых кинематических цепей.

### Результаты исследования и их обсуждение

На основе формулы (2) был проведен синтез всевозможных схем МСПС [1, 2] при  $W = 1 \dots 6, k = 2 \dots 6$ . Эти базовые схемы отличаются набором  $D_i$  в соединительных кинематических цепях. Схемы синтезированы из условия, что каждая соединительная цепь либо должна содержать приводную пару, либо налагать некоторое число связей на движение выходного звена. При этом количество соединительных цепей с  $D_i = 0$  не превышает число степеней свободы механизма. Синтезированные схемы классифицированы на основе следующих признаков: число степеней свободы механизма  $W$ , число соединительных цепей  $k$ , общее число степеней свободы и число пар разных классов в каждой соединительной цепи.

Следующим существенным признаком, значительно расширяющим классификацию, является количество приводов в каждой соединительной кинематической цепи. Из всего многообразия МСПС особый интерес представляет класс механизмов, в которых все звенья работают на растяжение-сжатие. В него входят механизмы, все приводы которых должны быть линейными, а оси сопряженных звеньев должны пересекаться в одной точке.

Методика структурного анализа механизмов параллельной кинематики, предложенная К. Хантом, заключается в выделении неподвижного основания механизма, стойки и выходного звена. Затем вводятся кинематические цепи. Классификация осуществляется по числу степеней свободы, которых лишается механизм при вводе каждой цепи, общему числу степеней свободы механизма и числу кинематических ветвей.

Одним из первых таких механизмов была платформа Стюарта, а позднее – манипулятор Данилевского. Исследования показали, что, изменяя взаимное расположение центров шарниров основания и выходного звена, можно получить целый ряд МСПС. Разновидности механизмов параллельной структуры подробно рассмотрены в работах [1–5, 7] и др. Классификация механизмов с параллельной структурой представлена на рис. 2.

Топологию кинематических связей параллельных механизмов принято описывать рядом букв, кодирующих тип и последовательность кинематических пар, начиная с неподвижной платформы ( $R$  – вращательная пара,  $P$  – поступательная пара,  $S$  – шаровая пара,  $U$  или  $(RR)$  – карданное соединение). Чтобы выделить, что данная кинематическая пара активная, ее буква подчеркивается.

В области параллельных механизмов с шестью степенями свободы наиболее популярным является 6-UPS параллельный механизм с совмещенными шарнирами, обычно называемый платформой Гафа – Стюарта или гексаподом [1–4, 7]. Гексаподы выполнены на базе шести мехатронных телескопических устройств поступательного перемещения (ШВП). Для изменения их длины служат регулируемые электроприводы. Контроль

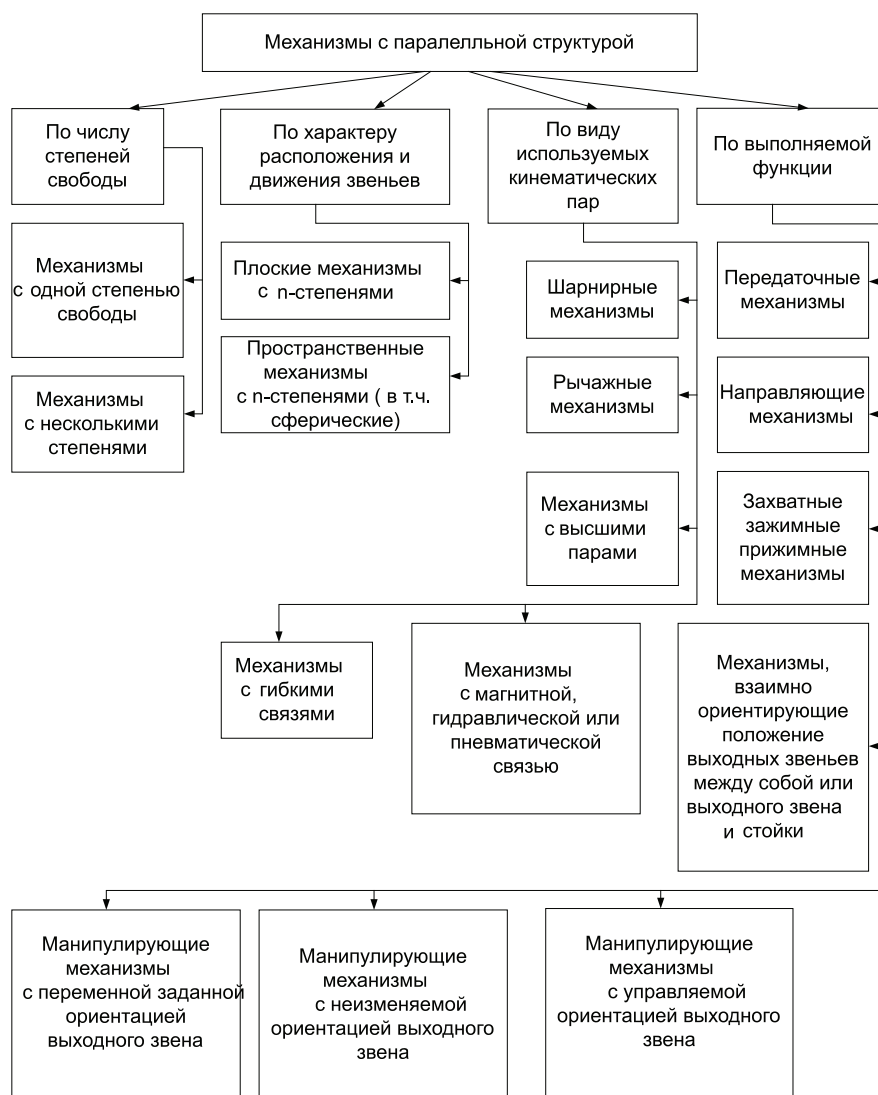


Рис. 2. Классификация механизмов с параллельной структурой

перемещения осуществляется датчиками положения. Одним концом телескопическое устройство шарнирно соединено с основанием, а другим – с подвижной верхней платформой, на которой расположен исполнительный орган. Программно задавая различное перемещение каждого винта, можно управлять положением ИО по шести координатам.

Кинематическая схема классической платформы Стюарта с совмещенными шарнирами представлена на рис. 3, а; схема отличающаяся порядком присоединения приводных звеньев к платформе (Flagge Parallel Manipulators) – на рис. 3, б, с разнесенными шарнирами – на рис. 3, в.

Виды систем приводов платформы Стюарта условно представлены на рис. 4.

это, несомненно, 6-RUS. Часто U соединение в цепи заменяют на S соединение. Это приводит к избыточной степени свободы в каждой связи, однако это не изменяет свойства 6-RUS параллельного механизма. Точно так же U и S соединения каждой штанги можно взаимозаменять без изменения характеристик механизма. Поэтому обычно не делают различий между механизмами типа RUS, RSS или RSU, и все обозначаются как RUS.

Еще один распространенный вид параллельных манипуляторов – это механизмы с топологией 6-PUS. По сравнению с платформой Стюарта масса подвижных частей и вероятность столкновения опор у 6-PUS механизма меньше. Благодаря использованию линейных приводов HEXAPOD-робот с топологией

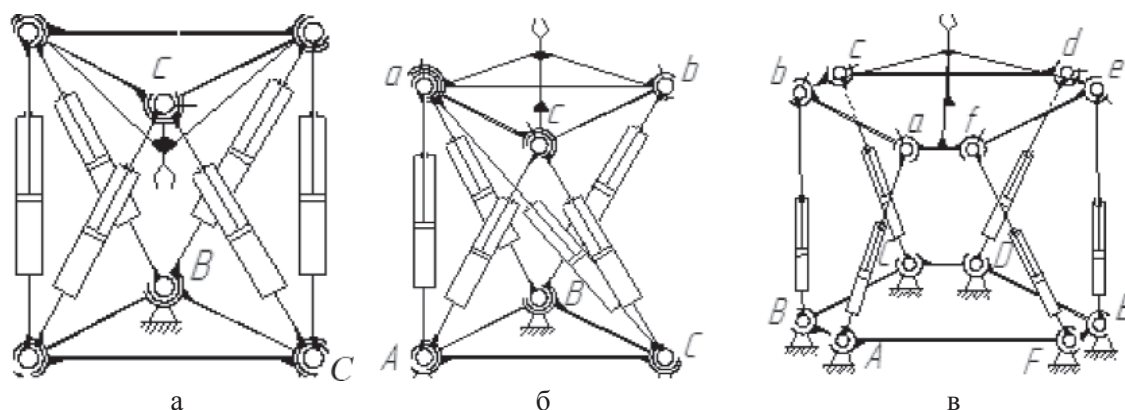


Рис. 3. Кинематическая схема платформы Стюарта:  
а – с совмещенными шарнирами; б – платформа типа Flagge Parallel Manipulators;  
в – с разнесенными шарнирами

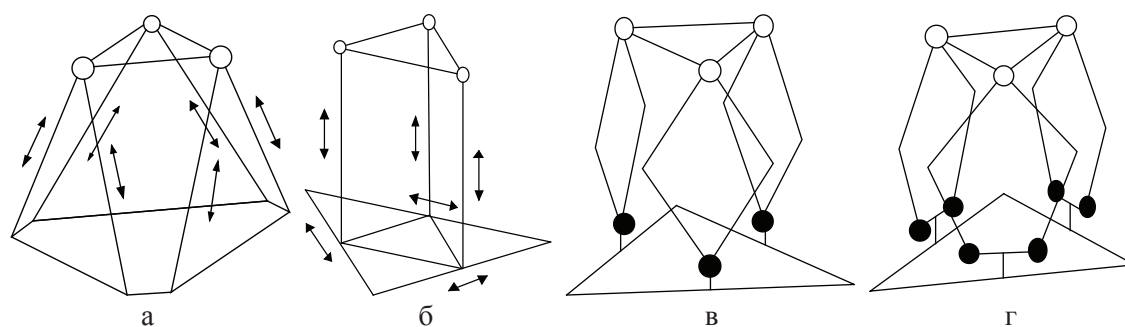


Рис. 4. Система приводов платформы Стюарта:  
а, б – линейные приводы; в, г – приводы вращательного типа

Существует класс схем МСПС с вращательными приводами. Валы шести вращательных двигателей, установленных на основании, в частности могут иметь кривошипные, перемещающие нижние концы рычагов. Рычаги попарно соединены друг с другом шарнирами.

Второй по популярности параллельный механизм с шестью степенями свободы –

6-PUS отличается более высокими статическими (особенно механическая жесткость) и динамическими (быстродействие) характеристиками. В случае необходимости размещения на основании и выходном звене элементов кинематических пар приводных цепей возможно увеличение габаритов основания, выходного звена и механизма в целом.

Также возможно исполнение МС по параллельно-последовательной схеме. В этом случае МС состоит из основания, на котором при помощи сферических шарниров крепятся шесть поступательных приводов. Штоки приводов сферическими шарнирами присоединены к крестовине, которая, в свою очередь, является базой для установки линейного привода рабочего органа. Достоинствами данной схемы, по сравнению со стандартной схемой платформы Стюарта, являются: увеличенный рабочий объем за счет введения избыточной степени подвижности (поворот и/или выдвигание рабочего органа) и повышенная маневренность манипулятора. Недостатками данной схемы можно считать все недостатки, присущие стандартной схеме платформы Стюарта, а также наличие консольного элемента, что уменьшает жесткость манипулятора, так как звено рабочего органа работает на изгиб.

сти вращательных пар. Такая компоновка может способствовать уменьшению габаритов основания и выходного звена, а также увеличению жесткости.

Неидеальность связей в МСПС (наличие сил и моментов сил трения в кинематических парах) приводит к тому, что вблизи особых положений может произойти заклинивание механизма. Таким образом, работоспособность механизма будет теряться не в самом особом положении, а в некоторой окрестности этого положения. К другому виду особых положений МСПС относятся внутренние связи, которые ограничивают рабочие пространства этих механизмов и могут приводить к потере управляемости. Проведенное цифровое моделирование и экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и высокое качество мехатронного устройства

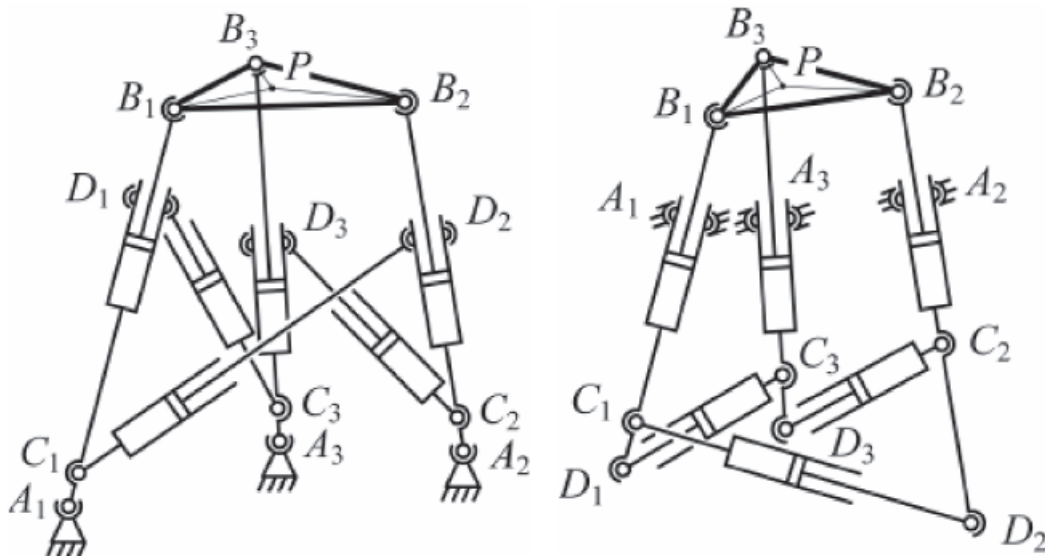


Рис. 5. Манипуляционные механизмы с параллельно-перекрестной структурой

Для манипуляционных систем с параллельной кинематикой в работах [1, 2, 7] предложены механизмы параллельно-перекрестной и параллельно-переменной структуры, представляющие собой гибридные (комбинированные) кинематические структуры. На рис. 5 показаны два механизма параллельно-перекрестной структуры с шестью степенями свободы и шестью кинематическими цепями, три из которых расположены параллельно и три перекрестно.

Возможны два варианта расположения приводов: в первом случае все двигатели расположены в рабочей зоне; во втором случае двигатели расположены вне рабочей зоны. Сферические кинематические пары могут быть выполнены в виде совокупно-

оптического коммутатора во всем рабочем пространстве.

### Выводы

В качестве юстирующего механизма оптического коммутатора [6, 8] следует выбирать параллельный механизм с топологией 6-UPS по причине сравнительно высокой жесткости и удобства управления оптическим элементом по 6 степеням подвижности. В качестве мехатронных телескопических устройств рекомендуется выбирать цифровые электроприводы с интегрированными датчиками положения и ШВП, т.к. в данном случае возможна реализация динамического

и высокоточного управления положением рабочего органа – призмы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01364).*

#### Список литературы

1. Габутдинов Н.Р., Глазунов В.А., Филиппов Д.Н. Механизмы параллельной структуры с шестью степенями свободы, разработанные в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН // Известия высш. уч. завед. Машиностроение. – 2014. – № 7. – С. 83–89.
2. Глазунов В.А., Брио С., Аракелян В., Грунтович М.М., Нгуен Минь Тхань. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 2. – С. 90–100.
3. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
4. Диментберг Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 336 с.
5. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами: монография. – Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2010. – 192 с.
6. Кобзев А.А., Потанин Ю.С. Формирование главной обратной связи в системе автоустойчивости на базе оптического коммутатора для многоканальных лазерных комплексов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9 (2). – С. 262–266. – URL: [www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=10004104](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10004104) (дата обращения: 29.10.2015).
7. Крайнев А.Ф. Разновидности механизмов параллельной структуры и возможности их применения в ГПС // Гибкие производственные системы, ГПС-6. – Междун. ин-т информации. – 1990. – С. 60–73.
8. Потанин Ю.С. Математический алгоритм работы оптического коммутатора многоканальных лазерных систем //

Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: [www.science-education.ru/117-13641](http://www.science-education.ru/117-13641) (дата обращения: 29.10.2015).

#### References

1. Gabutdinov N.R., Glazunov V.A., Filippov D.N. Mechanizmy parallelnoj struktury s sheстью stepenjami svobody, razrabotannye v Institute mashinovedenija im. A.A. Blagonravova RAN // Izvestija vyssh.uch.zaved. Mashinostroenie. 2014. no. 7. pp. 83–89.
2. Glazunov V.A., Brio S., Arakeljan V., Gruntovich M.M., Nguen Min Than. Razrabotka manipuljacionnyh mehanizmov parallelnoperekrestnoj struktury // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin. 2008. no. 2. pp. 90–100.
3. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Krajnev A.F. Prostranstvennyye mehanizmy parallelnoj struktury. M.: Nauka. 1991. 96 p.
4. Dimentberg F.M. Teorija prostranstvennyh sharnirnyh mehanizmov. M.: Nauka, 1982. 336 p.
5. Egorov I.N. Pozicionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mehatronnymi ustrojstvami: monografija. Vladimir: Izd-vo Vladimir. gos. un-ta im. A.G. i N.G. Stoletovyh, 2010. 192 p.
6. Kobzev A.A., Potanin Ju.S. Formirovanie glavnoj obratnoj svyazi v sisteme avtojustirovki na baze opticheskogo kommutatora dlja mnogokanalnyh lazernyh kompleksov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9 (2). pp. 262–266. URL: [www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=10004104](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10004104) (date: 29.10.2015).
7. Krajnev A.F. Raznovidnosti mehanizmov parallelnoj struktury i vozmozhnosti ih primenenija v GPS // Gibkie proizvodstvennyye sistemy, GPS-6. Mezhdun. in-t informacii. 1990. pp. 60–73.
8. Potanin Ju.S. Matematicheskij algoritm raboty opticheskogo kommutatora mnogokanalnyh lazernyh sistem // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 3. URL: [www.science-education.ru/117-13641](http://www.science-education.ru/117-13641) (date: 29.10.2015).