

УДК 621.01

DOI 10.18698/0536-1044-2017-8-78-87

# Рабочие зоны механизмов параллельной структуры и способы определения их формы и размеров

К.Г. Эрастова, П.А. Ларюшкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Workspaces of Parallel Mechanisms and Methods of Determining Their Shape and Size

K.G. Erastova, P.A. Laryushkin

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

@ e-mail: erastovakg@gmail.com, pav.and.lar@gmail.com

**i** Благодаря уникальным свойствам механизмы параллельной структуры находят широкое применение в современной робототехнике. При синтезе таких механизмов важную роль играет размер рабочей зоны, так как на него влияют области так называемых особых положений, в которых он может потерять управляемость и подвижность. Существует несколько подходов к определению рабочих зон механизмов различных типов, однако в основном они представлены теоретическими исследованиями и не учитывают параметры реальных манипуляторов. Выполнено обобщение известных знаний о рабочих зонах механизмов параллельной структуры, их типах и способах определения формы и размеров, а также совершенствование этих способов для прикладного применения при синтезе механизмов реальных робототехнических устройств. Предложена и наглядно проиллюстрирована с помощью различных плоских и пространственных механизмов дополненная классификация рабочих зон механизмов. Полученные результаты позволяют оценивать пригодность манипулятора для практического применения уже на стадии его синтеза.

**Ключевые слова:** механизм параллельной структуры, рабочая зона, плоский механизм, пространственный механизм, синтез механизма

**i** Parallel mechanisms are widely used in modern robotics due to their unique properties. The important part of synthesis of these mechanisms is determining the size of the workspace as it is affected by singularity areas, in which the mechanism can become uncontrollable and immobile. There are several approaches to determining workspaces of parallel mechanisms of different types. Most of them are based on theoretical research and do not consider the parameters of real manipulators. This article presents a summary of known facts about workspaces, their types, and methods of determining their shape and size as well as ways of improving these methods for applied use in the synthesis of real robotic mechanisms. A supplementary classification of workspaces is proposed and illustrated by examples of various planar and spatial mechanisms. The results obtained allow estimating operational suitability of the mechanism for practical needs as early as at the synthesis stage.

**Keywords:** parallel mechanism, workspace, planar mechanisms, spatial mechanism, mechanism synthesis

Одной из основных тенденций современной робототехники является синтез механизмов параллельной структуры (МПС) [1–3], что подтверждается большим количеством научных работ, посвященных этой тематике. Актуальность разработки и совершенствования МПС обусловлена их особыми свойствами, отличными от механизмов последовательной структуры [4]: многоподвижная замкнутая кинематическая цепь манипулятора обеспечивает более высокие жесткость его конструкции и грузоподъемность, что приводит к уменьшению размеров и масс подвижных звеньев. Благодаря наличию нескольких замкнутых цепей нагрузки распределены равномерно, что положительно сказывается на характеристиках, связанных с прочностной надежностью [5], а также более высокую точность позиционирования выходного звена (ВЗ), так как ошибка позиционирования не накапливается, а усредняется на каждом приводе.

Наряду с достоинствами, следует отметить и существенные недостатки МПС, такие как ограниченная рабочая зона (РЗ) манипулятора, трудности при проектировании систем управления, а также наличие особых положений, в которых механизм может потерять управляемость и подвижность [6, 7].

При синтезе МПС важную роль играет размер РЗ, в общем понимании представляющей собой множество точек, в которых может находиться ВЗ манипулятора, т. е. тех точек, где обратная задача о положениях имеет решение [8].

Определение размера и формы РЗ началось с разработки платформы Гью–Стюарта в 1956 г. [9]. В настоящее время наиболее распространенным способом определения размера и формы РЗ является итерационный, т. е. основанный на разбиении РЗ на точки с некоторым шагом и решении обратной задачи о положениях в них [10].

Цель работы — обобщение известных знаний о РЗ МПС, их типах и способах определения формы и размеров, а также совершенствование этих способов для прикладного применения при синтезе механизмов реальных робототехнических устройств.

Следует отметить, что отсутствие понимания рабочего пространства является одним из главных препятствий в развитии полезных на практике МПС, что обуславливает актуальность данной работы [11].

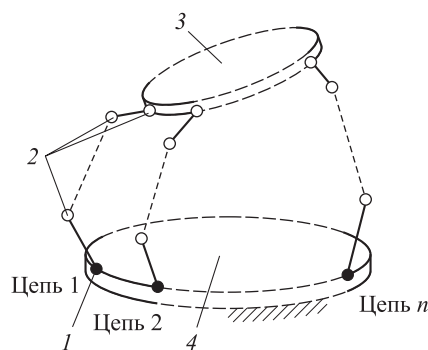


Рис. 1. Обобщенная схема МПС:  
1 и 2 — приводная и неприводные кинематические пары; 3 — подвижная платформа (ВЗ);  
4 — неподвижное основание

Пусть положение и ориентация ВЗ некоего обобщенного МПС (рис. 1) с  $n$  степенями свободы задано в некоторой неподвижной системе отсчета координатами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Обозначим обобщенные координаты, представляющие собой перемещения в приводных парах, как  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ .

**Классификация РЗ.** Определение понятия РЗ предлагалось в работах многих ученых. Например, в статье [8] РЗ — это пространство из множества точек, которых достигает «характерная точка» (точка схвата, и т. п.) ВЗ манипуляционного механизма. Это достаточно общее определение, которое может упустить ряд важных факторов, когда речь идет о механизме реального устройства. Во-первых, существенное влияние на РЗ механизма оказывают ограничения конструкции. Во-вторых, распределение нагрузок на приводы является непостоянным при различных положениях и ориентациях ВЗ, вследствие чего существуют области, в которых нагрузка на приводы больше допустимой, что приводит к существенной потере точности позиционирования. Таким образом, функционирование реального манипулятора в некоторых областях становится недопустимым или даже невозможным, несмотря на то, что теоретически эти области входят в РЗ механизма.

Для учета таких негативных явлений предлагается следующая классификация.

1. *Теоретическая РЗ* — множество точек, в которых может находиться ВЗ, т. е. тех точек, где обратная задача о положениях имеет решение. Это определение включает в себя традиционное понимание РЗ механизма. Согласно работе [6], можно выделить следующие типы РЗ МПС:

- *РЗ постоянной ориентации* — множество точек, в которых может находиться ВЗ, сохраняя заданную ориентацию;

- *РЗ ориентации/поворота* — множество всех возможных ориентаций ВЗ при заданном зафиксированном положении;

- *максимальная РЗ* — множество точек, в которых может находиться ВЗ хотя бы с одной его ориентацией;

- *РЗ ограниченной ориентации* — множество точек, в которых может находиться ВЗ хотя бы с одной его ориентацией при условии, что возможная ориентация ограничена некоторыми значениями. Таким образом, максимальная РЗ — частный случай РЗ ограниченной ориентации с ограничением  $[0; 2\pi]$ ;

- *РЗ диапазона ориентации* — множество точек, в которых может находиться ВЗ во всех ориентациях из некоторого заданного диапазона;

- *полная РЗ* — множество точек, в которых может находиться ВЗ во всех возможных ориентациях, т. е. полная РЗ — частный случай РЗ диапазона ориентации с ограничением  $[0; 2\pi]$ .

2. *Конструктивная РЗ* — множество точек, в которых может находиться ВЗ, согласно конструктивным ограничениям реального МПС (таким как, ограничения на минимальный угол между звеньями, на угол поворота входного звена и т. п.) и требованиям по необходимой ориентации ВЗ.

3. *Эффективная РЗ* — множество точек, в которых может находиться ВЗ, согласно конструктивным ограничениям реального механизма и требованиям по необходимой ориен-

тации ВЗ при условии возможности поддержания в этих точках некоторых параметров движения, не превышающих критические (например, моментов в приводах МПС).

Введение таких понятий, как конструктивная и эффективная РЗ позволяет с помощью предложенных алгоритмов оценивать пригодность манипулятора для практического применения уже на стадии его синтеза. Рассмотрим способы определения формы и размера РЗ различных типов.

### Способы определения формы и размера РЗ МПЛ.

Для вычисления РЗ традиционно используют геометрический и итерационный способы [6]. Несмотря на то что существуют численные методы определения [6], в данной работе они не рассматриваются, так как их область применения ограничена вследствие сложности математического аппарата небольшим подклассом параллельных манипуляторов.

**Геометрический способ.** Для оценки формы и размера РЗ механизма в первом приближении целесообразно использовать геометрический способ. Для каждого значения обобщенной координаты  $\psi_i$   $i$ -я кинематическая цепь манипулятора ограничивает область перемещения его ВЗ некоторой кривой (в случае плоских механизмов) или поверхностью (в случае пространственных механизмов), которая при изменении координаты  $\psi_i$  в некотором заданном диапазоне образует некую область или объем  $W_i$ . Пересечение всех областей  $\bigcap W_i$  образует максимальную РЗ манипулятора [6].

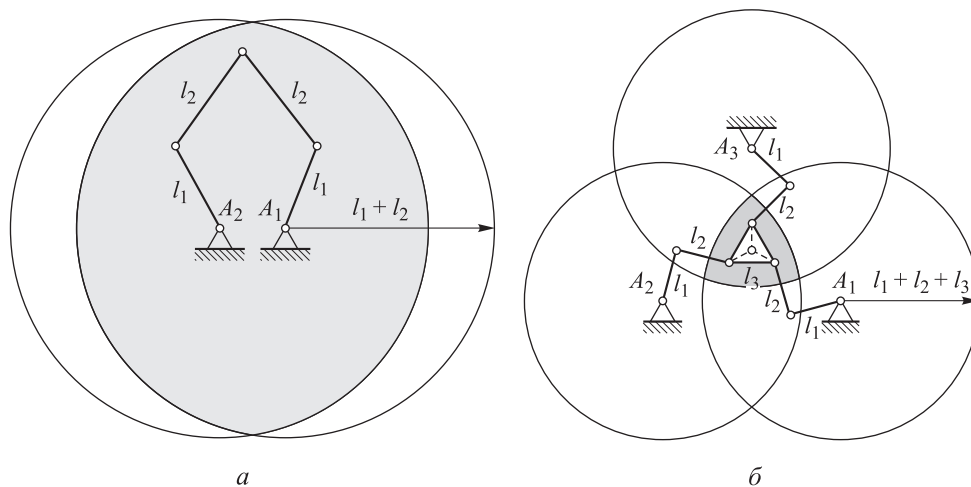


Рис. 2. Геометрически определенные РЗ для пятизвенного механизма (а) и 3RRR-механизма (б)

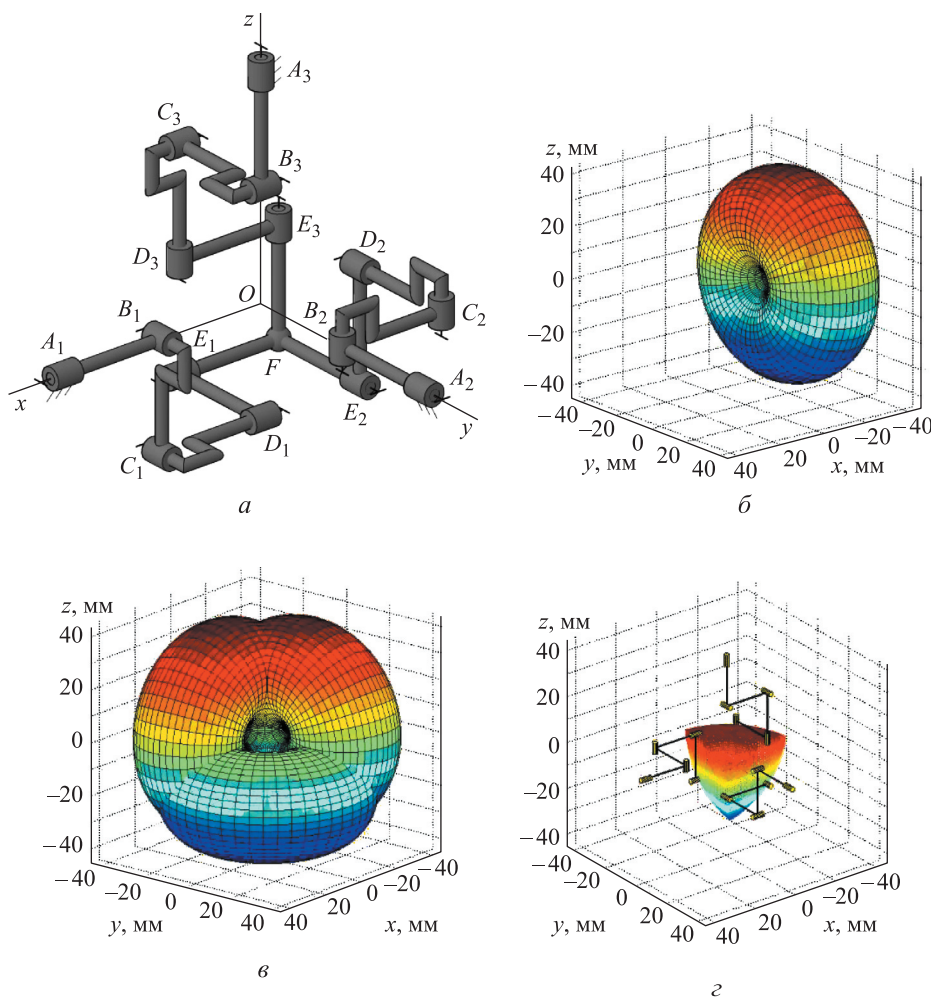


Рис. 3. Кинематическая схема пространственного механизма с тремя поступательными степенями свободы (а) и его РЗ, определенная геометрическим способом: б — поверхность, ограничивающая перемещение ВЗ для одной цепи; в — поверхность, ограничивающая перемещение ВЗ для каждой из цепей, г — пересечение допустимых областей перемещения ВЗ — РЗ механизма [12]

В качестве примера рассмотрим данный способ применительно к пространственному и плоским механизмам. На рис. 2 приведены РЗ, определенные геометрически, для двух механизмов — пятизвенного и плоского 3RRR. В этих механизмах каждая из цепей ограничивает РЗ окружностью с центром в точке расположения приводного шарнира  $A_i$  и радиусом

$$r_k = \sum_{i=1}^n l_{k,i},$$

где  $n$  — число звеньев цепи;  $l_i$  — длина  $i$ -го звена  $k$ -й цепи.

Рассмотрим пространственный механизм с тремя поступательными степенями свободы, представленный в работе [12], кинематическая схема которого приведена на рис. 3, а, где  $A_i$  — приводные пары;  $B_i, C_i, D_i$  — пассивные (неприводные) пары;  $F$  — ВЗ механизма.

Для такого механизма каждая цепь ограничивает перемещение ВЗ тороидальной поверхностью, образованной вращением центра окружности радиуса  $R = B_i C_i$  по окружности того же радиуса, вокруг оси, совпадающей с осью первой кинематической пары этой цепи. Пересечение всех областей, ограниченных данными поверхностями, образует РЗ механизма (рис. 3, б–г).

**Итерационный способ.** Благодаря простоте и высокой точности этот способ нашел широкое применение в работах многих ученых [12–14]. Он заключается в следующем: выбирают некую область, заведомо большую, чем предполагаемая РЗ механизма (определяемая, например, геометрически). Эту область разбивают на точки — узлы — с некоторым шагом  $h_i$ , соответствующим координате  $x_i$ . Для каждого узла ищут решение обратной задачи о положениях:

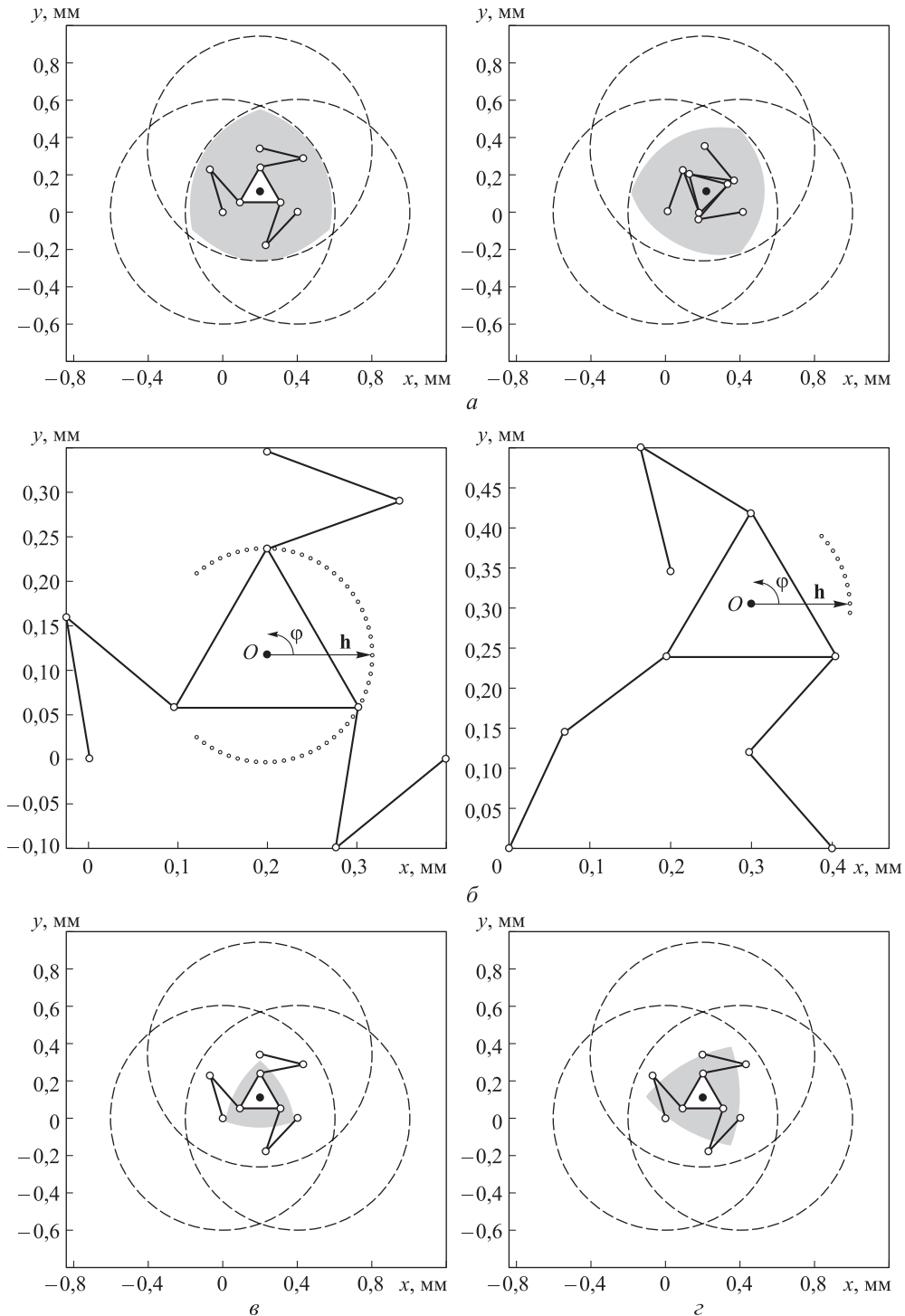


Рис. 4. Различные рабочие зоны 3RRR-механизма:

$a$  — РЗ постоянной ориентации при угле  $\varphi = 0$  (слева) и  $\varphi = \pi/4$  (справа);  $b$  — РЗ ориентации/поворота для начального положения  $[x_0; y_0]$  (слева) и для некоторого произвольного положения  $[x; y]$  (справа);  $v$  — полная РЗ;  $z$  — РЗ ограниченной ориентации в диапазоне угла  $\varphi [0; \pi/2]$

если данное решение существует, значит, точка принадлежит РЗ.

В качестве примера определим теоретические РЗ различных типов для плоского 3RRR-механизма. На рис. 4,  $a$  показана РЗ постоянной

ориентации 3RRR-механизма при постоянном значении угла ориентации ( $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi/4$ ); итерации проведены по координатам  $x, y$ .

На рис. 4,  $b$  изображена РЗ ориентации/поворота 3RRR-механизма. В этом случае

координаты ВЗ  $x, y$  зафиксированы, а итерации проводят по углу  $\varphi$  с некоторым шагом. На рисунке показан вектор ориентации  $\mathbf{h}$  в начальном (нулевом) положении, а также направление отсчета угла ориентации  $\varphi$ . Начало вектора  $\mathbf{h}$  всегда находится в точке  $O$  (ВЗ механизма), возможные положения конца вектора показаны дугой. Максимальный и минимальный углы ориентации  $\varphi$ , доступные при данном положении ВЗ, определяют диапазон ориентаций, возможных в данной точке.

Для вычисления полной РЗ (рис. 4, в) и РЗ ограниченной ориентации (рис. 4, з) необходимо выполнять итерации как по углу, так и по координате.

Исследование РЗ зон пространственных механизмов выполняется аналогично. На рис. 5, а приведены схемы двух манипуляторов — шестистепенного на основе кривошипно-шатунного механизма [13] и сферического [14], а на рис. 5, б — их максимальные РЗ.

Основным достоинством такого способа определения размера и формы РЗ является то, что, корректируя, убирая и добавляя условия в алгоритм (рис. 6), можно вычислить РЗ с любыми заданными ограничениями (связанными, например, с конструктивными особенностями механизма или со спецификой его применения), максимально приблизив ее к конструктивной РЗ манипулятора.

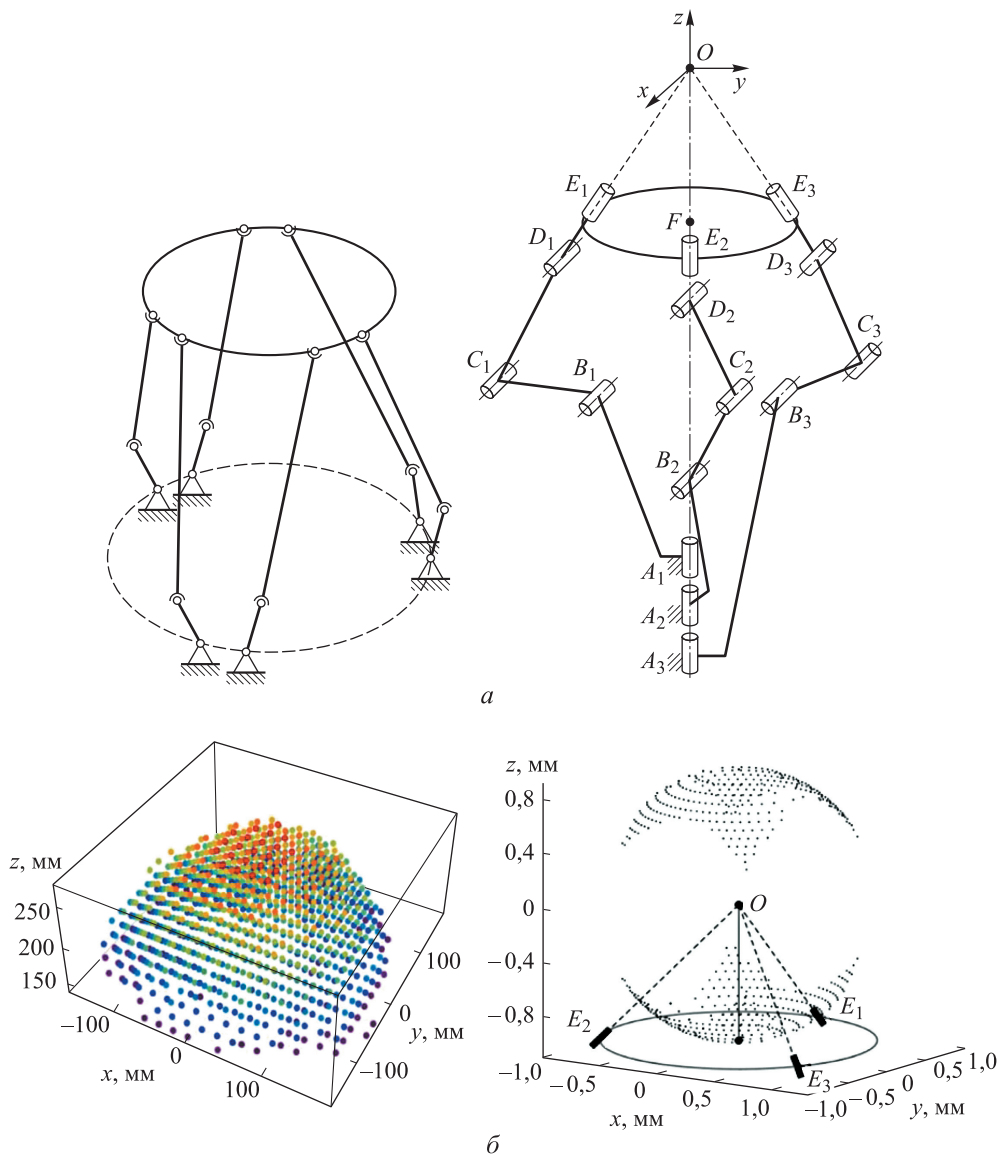


Рис. 5. Кинематические схемы (а) и максимальные РЗ (б) шестистепенного манипулятора на основе кривошипно-шатунного механизма (слева) и сферического манипулятора (справа):  $A_i$  — приводные пары;  $B_i, C_i, D_i, E_i$  — неприводные пары;  $F$  — ВЗ механизма;  $O$  — полюс вращения

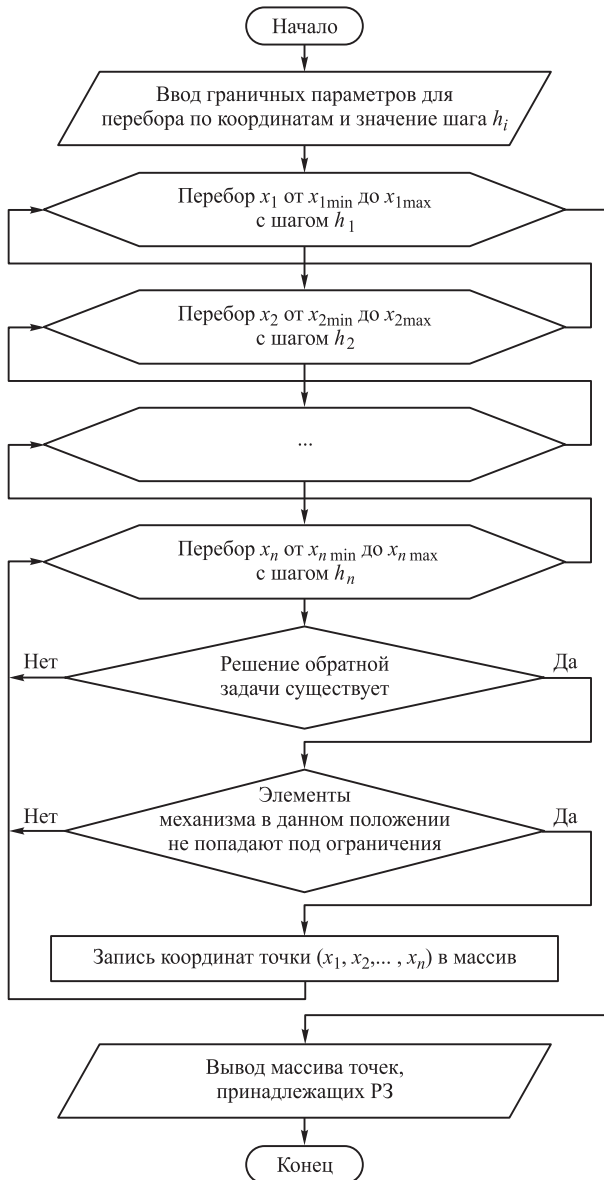


Рис. 6. Алгоритм определения конструктивной P3 механизма

В качестве примера рассмотрим построение конструктивной и эффективной P3 манипулятора на основе пятизвенного механизма (рис. 7).

Для прототипа манипулятора, предназначенного для использования в 3D-принтере (см. рис. 7, б), приняты следующие геометрические параметры:  $l = 120$  мм;  $l_{11} = l_{21} = 160$  мм;  $l_{12} = l_{22} = 220$  мм. Масса экструдера, закрепленного на выходном шарнире С,  $m_{\text{экс}} = 1$  кг. Приводные шарниры  $A_1$  и  $A_2$  расположены на оси  $x$  и равноудалены от оси  $y$ , т. е.  $A_1(-0,5l; 0)$ ,  $A_2(0,5l; 0)$ .

P3 пятизвенного механизма, определенная геометрически, представлена на рис. 2, а. Чтобы найти конструктивную P3 такого механизма,

наложим в соответствии с прототипом следующие ограничения:

- угловое перемещение первых звеньев ограничено стойкой и концевыми выключателями. Размер концевой датчика составляет 5 мм. Координаты расположения выключателей:  $S_1(-0,5l - 50; -50)$ ,  $S_2(0,5l + 50; -50)$ ;
- минимально допустимый угол между звеньями  $A_1B_1$  и  $B_1C$  равен  $20^\circ$ ;
- минимально допустимый угол между звеньями  $B_1C$  и  $B_2C$  составляет  $5^\circ$ .

Согласно данным условиям, в алгоритм программы (см. рис. 6) были внесены соответствующие изменения. Результат расчета приведен на рис. 8, а.

Для определения формы и размера эффективной P3 необходимо получить распределение крутящих моментов в приводах при различных положениях и ориентациях ВЗ. Огромное влияние на неравномерность этого распределения оказывают так называемые особые положения, в которых подвижность механизма отличается от желаемой и ВЗ (исполнительный орган) устройства может поте-

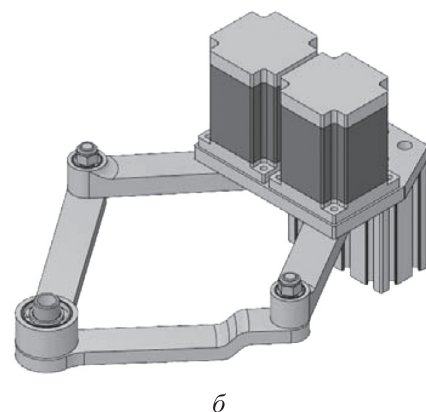
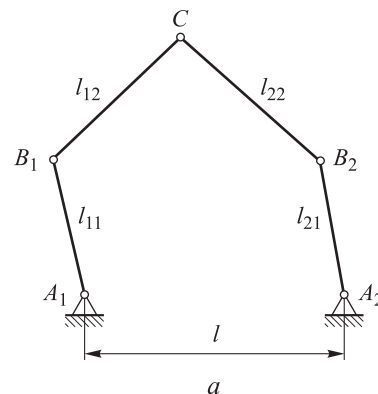


Рис. 7. Кинематическая схема пятизвенного механизма (а) и прототип манипулятора на его основе (б)

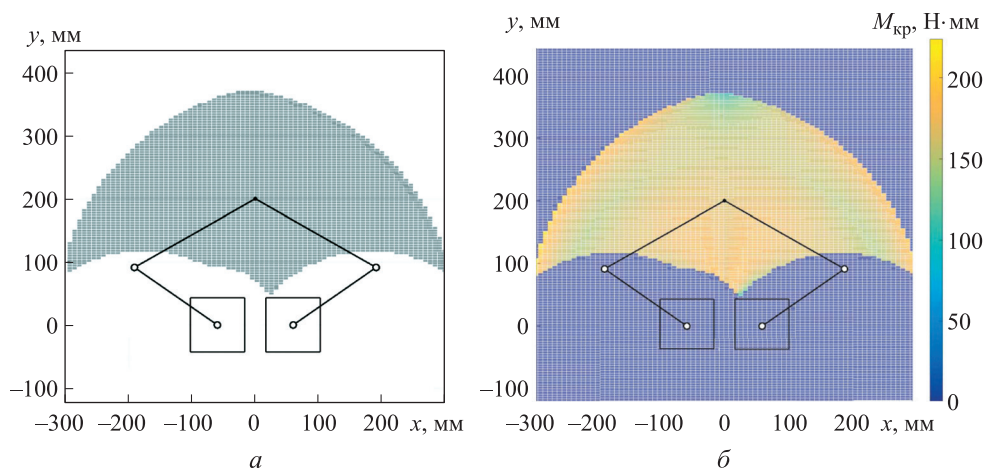


Рис. 8. Конструктивная (а) и эффективная (б) P3 манипулятора на основе пятизвенного механизма

рять управляемость или подвижность [1, 2, 7]. При этом известно, что негативные явления, такие как повышение нагрузки на приводы, возникают не только непосредственно в зонах особых положений, но и при приближении к ним [6, 15, 16]. Для рассматриваемого манипулятора геометрические соотношения подобраны так, чтобы обеспечить P3, свободную от особых положений.

Для оценки крутящих моментов в приводах при различных положениях и ориентациях ВЗ использован подход, представленный в статье [17]. Его суть заключается в вычислении крутящих моментов в приводах при приложении нагрузки к ВЗ с «наихудшего» направления, при котором эти моменты максимальны по модулю. Результаты такого анализа, проведенного для всех точек P3, представлены на рис. 8, б. Как видно из рисунка, крутящие моменты  $M_{кр}$  в

приводах по P3 не превышают 200 Н·мм. Для выбранного прототипа шагового двигателя NEMA34 модели FL86STH65–2808 предельный крутящий момент составляет 340 Н·мм.

## Выводы

1. Обобщены известные знания о P3 МПС, их типах и способах определения формы и размеров.
2. Разработана новая классификация P3 параллельных механизмов, учитывающая влияние конструктивных особенностей и зон особых положений.
3. Предложен способ определения конструктивных и эффективных зон механизмов, позволяющий оценивать пригодность манипулятора для практического применения уже на стадии его синтеза.

## Литература

- [1] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике. *Доклады академии наук*, 2014, т. 459, № 4, с. 428–431.
- [2] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука, 1991. 95 с.
- [3] Глазунов В.А., Чунихин А.Ю. Развитие механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2014, № 3, с. 37–43.
- [4] Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Терехова А.Н., Ву Нгок Бик. Об особенностях устройств относительного манипулирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2007, № 2, с. 77–85.
- [5] Захаров М.Н. *Прочностная надежность оборудования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 123 с.
- [6] Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Springer, 2006. 402 p.
- [7] Хейло С.В., Ларюшкин П.А., Глазунов В.Г., Эрстова К.Г. Определение рабочей зоны манипуляторов параллельной структуры. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2013, № 2(191), с. 27–31.



- [8] Хейло С.В., Глазунов В.А. Решение задачи об управлении поступательно-направляющим механизмом параллельной структуры. *Справочник. Инженерный журнал*, 2013, № 10, с. 17–24.
- [9] Stewart D. A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proc. of the UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings*, 1965-66, vol. 180, pt. 1, no 15, pp. 371–386.
- [10] Merlet J.-P. Workspace-oriented methodology for designing a parallel manipulator. *Proceedings of the 1996 international conference on robotics and automation*, 1996, pp. 3726–3731.
- [11] Glazunov V.A., Kraynev A.F., Rashoyan G.V., Trifonova A.N. Singular I Zones of Parallel Structure Mechanisms. *Proc. 10<sup>th</sup> World Congress on TMM*, Oulu, Finland, 1999, pp. 2710–2715.
- [12] Ларюшкин П.А., Палочкин С.В. Рабочая зона манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2012, № 3(339), с. 92–96.
- [13] Пащенко В.Н. Построение рабочей зоны шестистепенного манипулятора параллельной структуры на базе кривошипно-шатунного механизма. *Интернет-журнал «Науковедение»*, 2016, т. 8, № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/142TVN316.pdf> (дата обращения 15 марта 2017).
- [14] Эрастова К.Г., Ларюшкин П.А., Глазунов В.Г. Рабочая зона и оптимальные геометрические параметры сферического манипулятора параллельной структуры. *Сб. тр. XXVIII Междунар. инновационно-ориентированная конф. молодых ученых и студентов (МИКМУС — 2016)*, Москва, ИМАШ РАН, 2017, с. 310–313.
- [15] Глазунов В.А., Аракелян В., Брио С., Рашоян Г.В. Скоростные и силовые критерии близости к сингулярностям манипуляторов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2012, № 1, с. 10–17.
- [16] Глазунов В.А., Нгуен Нгок Хуэ, Нгуен Минь Тхань. К анализу особых положений механизмов параллельной структуры. *Машиностроение и инженерное образование*, 2009, № 4, с. 11–16.
- [17] Ларюшкин П.А., Глазунов В.А., Эрастова К.Г. Определение максимальных усилий в приводах манипуляторов параллельной структуры по заданной величине внешней нагрузки. *Машиностроение и инженерное образование*, 2016, № 2(47), с. 40–46.

## References

- [1] Ganiev R.F., Glazunov V.A. Handling Mechanisms of Parallel Structure and their Application in Modern Equipment. *Doklady Physics*, 2014, vol. 59, no 12, pp. 582–585.
- [2] 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.
- [3] Glazunov V.A., Chunichin A.Y. Development of mechanisms of parallel structure. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216.
- [4] Glazunov V.A., Lastochkin A.B., Terekhova A.N., Vu Ngok Bik. Ob osobennostiakh ustroystv otноситel'nogo manipulirovaniia [About the features of the devices relative manipulation]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2007, no. 2, pp. 77–85.
- [5] Zakharov M.N. *Prochnostnaia nadezhnost' oborudovaniia* [Strength equipment reliability]. Moscow, Bauman Press, 2011. 123 p.
- [6] Merlet J.-P. *Parallel Robots*. Springer, 2006. 402 p.
- [7] Kheilo S.V., Lariushkin P.A., Glazunov V.G., Erastova K.G. Opredelenie rabochei zony manipuliatorov parallel'noi struktury [Determination of Robot Range Manipulators Parallel Structure]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An Engineering journal with appendix]. 2013, no. 2(191), pp. 27–31.
- [8] Kheilo S.V., Glazunov V.A. Reshenie zadachi ob upravlenii postupatel'no-napravliaiushchim mekhanizmom parallel'noi struktury [Control of translation parallel structure mechanism]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering journal with appendix]. 2013, no. 10, pp. 17–24.

- [9] Stewart D. A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proc. of the UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings*, 1965-66, vol. 180, pt. 1, no 15, pp. 371–386.
- [10] Merlet J.-P. Workspace-oriented methodology for designing a parallel manipulator. *Proceedings of the 1996 international conference on robotics and automation*, 1996, pp. 3726–3731.
- [11] Glazunov V.A., Kraynev A.F., Rashoyan G.V., Trifonova A.N. Singular I Zones of Parallel Structure Mechanisms. *Proc. 10 World Congress on TMM*, Oulu, Finland, 1999, pp. 2710–2715.
- [12] Lariushkin P.A., Palochkin S.V. Rabochaia zona manipulatora parallel'noi struktury s tremia stepeniami svobody [Workspace of the parallel structure manipulator with three degrees of freedom]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiia tekstil'noi promyshlennosti* [News of higher educational institutions. Technology of textile industry]. 2012, no. 3(339), pp. 92–96.
- [13] Pashchenko V.N. Postroyeniye rabochei zony shestistepennogo manipulatora parallel'noi struktury na baze krivoshipno-shatunnogo mekhanizma [The construction working area shestistrunnoi manipulator of the parallel structure on the basis of the crank mechanism]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»* [Internet-journal «Science of science»]. 2016, vol. 8, no. 3. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/142TVN316.pdf> (accessed 15 March 2017).
- [14] Erastova K.G., Lariushkin P.A., Glazunov V.G. Rabochaia zona i optimal'nye geometricheskie parametry sfericheskogo manipulatora parallel'noi struktury [Workspace and optimal geometric parameters of spherical parallel manipulator]. *28 Mezhdunarodnaia innovatsionno-orientirovannaia konferentsiia molodykh uchenykh i studentov (MIKMUS — 2016) sb. tr. konf.* [28 International Innovation Conference of Young Scientists and Students IICYSS-2016]. Moscow, IMASH RAN publ., 2017, pp. 310–313.
- [15] Glazunov V.A., Arkaelyan V., Briot S., Rashoyan G.V. Speed and force criteria for the proximity to singularities of parallel structure manipulators. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, no. 3, pp. 194–199.
- [16] Glazunov V.A., Nguen Ngok Khue, Nguen Min' Tkhan'. K analizu osobykh polozhenii mekhanizmov parallel'noi struktury [Singular configuration analysis of the parallel mechanisms]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* [Mechanical engineering and engineering education]. 2009, no. 4, pp. 11–16.
- [17] Lariushkin P.A., Glazunov V.A., Erastova K.G. Opredeleniye maksimal'nykh usilii v privodakh manipulatorov parallel'noi struktury po zadannoi velichine vneshnei nagruzki [Computation of the maximal actuation efforts in parallel manipulators at a specified value of external load]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* [Mechanical engineering and engineering education]. 2016, no. 2(47), pp. 40–46.

Статья поступила в редакцию 17.04.2017

## Информация об авторах

**ЭРАСТОВА Ксения Георгиевна** (Москва) — лаборантка НИИ АПП. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [erastovakg@gmail.com](mailto:erastovakg@gmail.com)).

**ЛАРЮШКИН Павел Андреевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [pav.and.lar@gmail.com](mailto:pav.and.lar@gmail.com)).

## Information about the authors

**ERASTOVA Ksenia Georgievna** (Moscow) — Research Assistant, Scientific Research Institute of Automation of Production Processes. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [erastovakg@gmail.com](mailto:erastovakg@gmail.com)).

**LARYUSHKIN Pavel Andreevich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [pav.and.lar@gmail.com](mailto:pav.and.lar@gmail.com)).