

## Выбор кинематической структуры модульной робототехнической системы в зависимости от типа поверхности передвижения

А.И. Савельев<sup>1</sup>, Д.В. Блинов<sup>2</sup>, А.А. Ерашов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 14 линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Б. Морская, д. 67, г. Санкт-Петербург 190121, Российская Федерация

✉ e-mail: erashov.a@ias.spb.su

### Резюме

**Цель исследования.** Цель настоящей работы заключается в выявлении преимуществ и недостатков различных кинематических структур (формаций) самореконфигурируемых модульных робототехнических систем в зависимости от типа поверхности, по которой в основном должна перемещаться данная система.

**Методы.** В работе проведен анализ кинематических структур модульных робототехнических систем относительно их возможностей перемещения, выделены особенности перемещения данных формаций по различным поверхностям, а также особенности применения некоторых формаций. Проведено исследование функциональных возможностей собственной мобильной автономной реконфигурируемой системы на основе рассмотренных формаций.

**Результаты.** По результатам проведенного исследования были выделены основные структуры модульных робототехнических систем, среди которых наиболее популярными на сегодняшний день являются формации, имеющие цепную архитектуру: «змея», «манипулятор»; «шагающие» структуры: «квадропод», «паук», «сороконожка», а также мобильные структуры «машина», «колесо» и «шар». На основе проведенного анализа были разработаны структуры для собственной модульной робототехнической системы. При разработке структур были учтены геометрические особенности и кинематические ограничения ее модулей.

**Заключение.** Применение результатов анализа позволит лучше адаптировать модульную самореконфигурируемую робототехническую систему к поверхности, по которой перемещается данная система. На выбор той или иной формации модульной системы также оказывает влияние необходимая скорость перемещения по данной поверхности. Наибольшей адаптивностью к различным типам поверхностей обладают шагающие формации, однако они же являются наиболее сложными с точки зрения разработки системы управления.

**Ключевые слова:** модульная робототехника; модульные робототехнические системы; самореконфигурируемые модульные роботы; автономные роботы; кинематические структуры модульных роботов; реконфигурация.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке РФФИ № 20-08-01109\_А.

**Для цитирования:** Савельев А.И., Блинов Д.В., Ерашов А.А. Выбор кинематической структуры модульной робототехнической системы в зависимости от типа поверхности передвижения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 120-135. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-120-135>.

Поступила в редакцию 24.08.2021

Подписана в печать 30.09.2021

Опубликована 21.10.2021

## Choice of Kinematic Structure of Modular Robotic System Depending on the Type of Motion Surface

Anton I. Saveliev<sup>1</sup>, Dmitriy V. Blinov<sup>2</sup>, Aleksei A. Erashov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

<sup>2</sup> St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
Bolshaya Morskaya 67, St. Petersburg 190121, Russian Federation

✉ e-mail: erashov.a@iias.spb.su

### Abstract

**Purpose of research.** The purpose of this study is to identify the advantages and disadvantages of various kinematic structures (formations) of self-reconfigurable modular robotic systems depending on the type of surface over which the system is mainly to be moved.

**Methods.** Analysis of kinematic structures of modular robotic systems with respect to their displacement capabilities was carried out. Features of movement of these formations on different surfaces, as well as features of application of some formations are highlighted. A study of functionality of its own mobile autonomous reconfigurable system was carried out on the basis of described formations.

**Results.** According to the results of the study, the main structures of modular robotic systems were identified, among which the most popular are formations that have a chain architecture: "snake," "manipulator"; "walking" structures: "quadropod," "spider," "centipede," as well as mobile structures "machine," "wheel" and "ball." Based on the conducted analysis, structures were developed for their own modular robotics system. Geometric features and kinematic limitations of its modules were considered in developing the structures

**Conclusion.** The use of the analysis results will allow better adaptation of a modular self-reconfigurable robotic system to the surface on which this system moves. The selection of a particular formation of the modular system is also influenced by the required speed of movement over a given surface. Walking formations have the greatest adaptability to various types of surfaces, but they are also the most difficult from the point of view of control system developing.

**Keywords:** modular robotics; modular robotic systems; self-reconfigurable modular robots; autonomous robots; kinematic structures of modular robots; reconfiguration.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The work was carried out with the support of RFPI No. 20-08-01109\_A.

**For citation:** Saveliev A. I., Blinov D.V., Erashov A. A. Choice of Kinematic Structure of Modular Robotic System Depending on the Type of Motion Surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 120-135 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-120-135>.

Received 24.08.2021

Accepted 30.09.2021

Published 21.10.2021

## Введение

Модульные робототехнические системы [1] имеют три основных преимущества перед классическими роботами: адаптивность [2], повышенная ремонтпригодность [3] и более низкая стоимость производства [4]. Снижение стоимости производства по сравнению с классическими роботами обеспечивает отсутствие необходимости вносить корректировки в производственный процесс при изменении назначения роботов [5].

На выбор конкретной формации модульных роботов в каждом отдельном случае применения влияют выполняемые задачи и условия функционирования. Вместе с тем различные кинематические структуры могут выполнять одни и те же задачи с разной степенью эффективности. Актуальной темой исследований является выбор формаций модульных робототехнических систем в зависимости от условий среды и задач. Выбор подходящей структуры позволит повысить точность работы системы, уменьшить энергетические потери, а также оптимизировать маршрут при выборе мобильных формаций.

В данной работе рассмотрены популярные кинематические структуры модульных роботов и приведен их анализ для выбора наиболее подходящих формаций с учетом выполняемых задач и физических ограничений рабочей области. Результаты проведенного анализа рассматриваются применительно к соб-

ственной мобильной автономной реконфигурируемой системе [6].

## Материалы и методы

В современной модульной робототехнике выделяют три основные архитектуры роботов [5]: змеевидную (Chain architecture), решетчатую (Lattice architecture) и гибридную (Hybrid architecture). При змеевидной архитектуре модули формируют цепочку или древовидную структуру, при этом число присоединенных роботов может варьироваться. При решетчатой архитектуре модули занимают фиксированное положение и образуют двумерные или трехмерные структуры в виде сеток различного типа. Гибридная архитектура совмещает эти два паттерна [5, 7].

Наиболее распространенной формацией модульной робототехнической системы является «змея». Роботы данной формации состоят из последовательно соединенных модулей. Передвижение робота такой формации происходит за счет встроенных в модули приводов. Популярность формации «змея» обусловлена способностью робота перемещаться в узких, труднопроходимых местах, подниматься на небольшие уступы, преодолевать ямы и траншеи, что невозможно при использовании каждого модуля отдельно. Одним из примеров формации «змея» является робототехническая система Swarm-bot [8, 9]. Каждый модуль Swarm-bot имеет мани-

пулятор для взаимодействия с окружающей средой и гусенично-колесную платформу для движения. Swarm-bot имеет только один захват для взаимодействия с другими модулями, что не позволяет ей образовывать сложные пространственные структуры. Этого недостатка лишены серийные модульные роботы SMORES-EP [10, 11]. Каждый модуль приводится в движение исполнительным механизмом с двигателем постоянного тока, модули соединяются между собой посредством постоянных магнитов [12]. Данные конфигурации обеспечивают подъем по лестницам, преодоление преград различной высоты, передвижение в узких пространствах и транспортировку малогабаритных грузов.

Из формации типа «змея» возможно образование других конфигураций [13] за счет присоединения модулей к уже функционирующей структуре. Змеевидные роботы менее эффективны по сравнению с другими формациями при движении по гладкой поверхности. В первую очередь это связано с тем, что максимальная скорость данной системы ограничена максимальной скоростью отдельного модуля. Кроме того, данная формация является маломобильной, что затрудняет выполнение маневров, а также передвижение робота по неровной поверхности. Особенностью данной формации является большое число подвижных сочленений (в некоторых случаях их может быть больше 10).

Близкую к «змее» геометрию имеет формация «манипулятор». Основная задача роботов, имеющих такую формацию, состоит в перемещении объектов. Зачастую формация «манипулятор» относится к змеевидной архитектуре, однако встречаются и гибридные варианты. При змеевидной архитектуре «манипулятора» модули последовательно соединяются друг с другом, при этом один из концов системы фиксируется, а на другом устанавливается специальный модуль, обеспечивающий взаимодействие с объектами в рабочем пространстве. При гибридной архитектуре система использует для опоры специальное основание, при этом несколько модулей используется в качестве противовеса для фиксации системы в заданном положении. Пример робота с формацией «манипулятор» на основе модулей Larva-bot представлен в [14]. Движение звеньев манипулятора, собранного из модулей Larvabot, осуществляется при помощи сервоприводов, а для соединения используются механические крючки.

Недостатков формации «змея», связанных с движением по неровной поверхности, лишена формация «машина», которая относится к решетчатой архитектуре. При движении мобильный робот с формацией «машина» соприкасается с поверхностью несколькими элементами, которые выполняют роль колес. В качестве таких элементов могут выступать стандартные модули робототехнической системы, способные к

передвижению, или специальные модули, если такой возможности у стандартных модулей нет. Примерами модульной робототехнической системы, способной перестраиваться в формацию «машина», являются ранее упомянутый SMORES-EP и Soldercubes [15]. Soldercubes использует для построения данной формации девять модулей, из которых четыре являются специализированными модулями-колесами. Формация «машина» позволяет робототехнической системе перемещаться с высокой скоростью по поверхностям с неровностями (небольшим ямам и буграм), поворачивать на высокой скорости, а также в некоторых случаях перевозить грузы. Однако роботы с формацией «машина» не способны преодолевать такие препятствия, как лестницы, глубокие ямы и т.д. Кинематическая схема данной формации представляет собой некоторое статичное основание с подвижными элементами «колесами», каждый из которых имеет в среднем по 2 степени свободы.

Наряду с вышеупомянутыми формациями модульных роботов популярны «шагающие» формации: «квадропад» (quaduped), «паук», «сороконожка», относящиеся к решетчатой архитектуре. Шагающие модульные роботы включают в себя модули-конечности, закрепленные на модуле-основании (теле). Так, для демонстрации возможностей модульной робототехнической системы Fable II [16], была использована шагающая формация с четырьмя ко-

нечностями «квадропад». Модульная робототехническая система Hexabot [17] представляет другой вариант шагающей формации – насекомоподобные структуры с 12 конечностями «сороконожка», для создания которой было использовано пятнадцать идентичных модулей. Шагающие системы наиболее универсальны, поскольку способны преодолевать различные препятствия. Также важным достоинством большинства шагающих формаций является наличие основания, которое можно использовать для переноса грузов. Недостатком данной формации является сложность создания системы управления и ограниченные функциональные возможности. Кроме того, такая формация отличается достаточно низкой скоростью передвижения, поэтому шагающие роботы наиболее эффективны в случаях, когда использование других формаций затруднительно или невозможно.

Отдельно стоит упомянуть перекачивающихся (rolling) модульных роботов, которые имеют змеевидную или решетчатую архитектуру и образуют кольцо или сферу. Передвижение данной структуры происходит посредством смещения центра тяжести [18, 19]. Достоинствами формаций «колесо» и «сфера» является возможность развивать большую скорость перемещения по сравнению с остальными формациями. Также данные формации приспособлены для передвижения по пересеченной местности, однако в связи с частыми столкновениями с поверхностью

требуют дополнительных средств защиты конструкции от повреждений. Кроме того, такие формации не предназначены для движения по узким проходам, поэтому наиболее предпочтительным является использование их на открытой местности.

При передвижении мобильных робототехнических формаций важную роль играет поверхность, по которой предстоит перемещаться роботу. Существует множество методов классификации поверхностей, но для модульных робототехнических систем актуальной является классификация по степени дисперсности поверхности: гладкие (бетон, металлические пластины), крупнодисперсные (булыжник, гравий), среднедисперсные (асфальт) и мелкодисперсные (песок, земля, трава) [20] и наличию у поверхности углов наклона (горизонтальные, наклонные и поверхности с переменным углом наклона) [21]. Наиболее адаптируемыми к типу поверхности формациями являются «шагающие» формации: «квадропод», «паук», «сороконожка». Однако скорость передвижения при использовании данных формаций является низкой. Поэтому в случае необходимости движения работа по ровной поверхности с большой скоростью следует использовать формацию «машина», а также формации «колесо» и «сфера». Если же робототехнической системе необходимо преодолеть труднопроходимый участок местности (труба, узкая траншея, широкая яма), лучшим вариантом будет

использование формации «змея». Для обеспечения взаимодействия со средой необходимо использовать формацию «манипулятор».

### Результаты и их обсуждение

Среди рассмотренных модульных робототехнических систем присутствуют такие, которые могут формировать различные кинематические структуры, т.е. такие системы имеют возможность адаптироваться под тип поверхности, по которым они перемещаются. Однако ни в одной из работ не была продемонстрирована возможность образования всех распространенных кинематических структур, рассмотренных в настоящей работе. Для исследования практического применения многофункциональных модульных робототехнических систем необходимо выбрать такую, которая позволит сформировать вышеописанные формации. Адаптацией к типам поверхностей обладают модули мобильной автономной реконфигурируемой системы (МАРС) [6, 22]. МАРС способна самостоятельно соединяться в формацию вне зависимости от начального расположения устройств, а также перемещаться в ее составе [1].

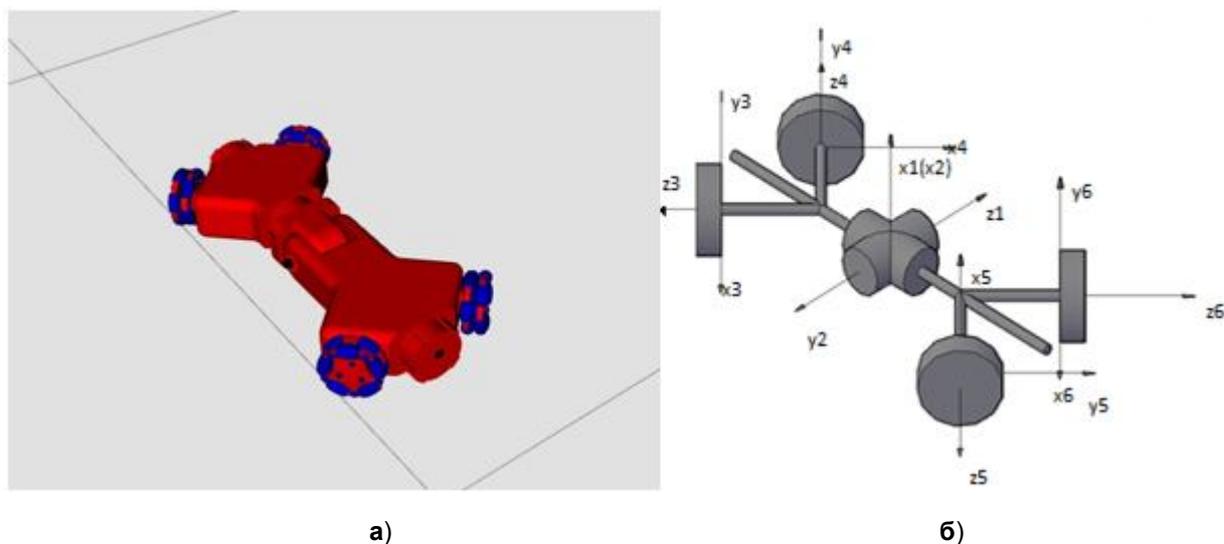
Отдельный модуль МАРС (рис. 1а) включает в себя колесную базу на все-направленных колесах и два вращательных сочленения, расположенных в середине модуля. Визуализация модели одного модуля и его структурная кинематическая схема представлены на рис. 1. Единичный модуль данной системы со-

стоит из двух вращательных сочленений, с которыми связаны системы отсчета  $X_1Y_1Z_1$  и  $X_2Y_2Z_2$ . При этом диапазон вращения первого сочленения составляет  $-90 < \theta_1 < 90$ , а второго  $-180 < \theta_2 < 180$ . Также в данной модели важным элементом являются колеса, поскольку благодаря им происходит контакт с поверхностью. С ними связаны системы отсчета  $X_3Y_3Z_3 - X_6Y_6Z_6$  (рис. 1б).

Рассмотрим кинематические структуры, которые можно получить с помощью МАРС. Для визуализации всех формаций был использован пакет RViz операционной системы Robot Operating System. Поскольку модули МАРС имеют собственную колесную базу, для формирования структуры «машина» можно отказаться от специальных модулей, выполняющих роль колес, и использовать колеса соединенных модулей. В таком случае модульная робототехническая система МАРС состоит из

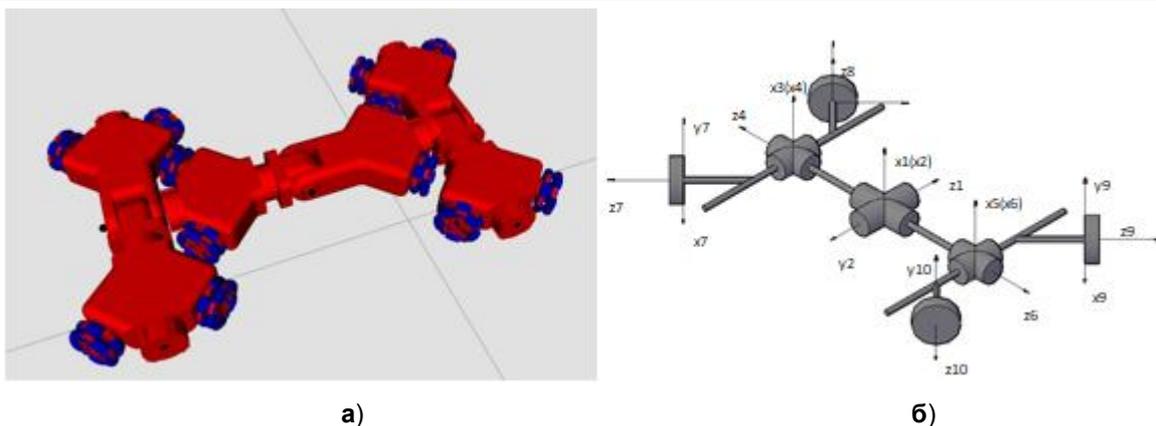
трех модулей, два из которых используют свои боковые колеса для движения, а третий соединяет их и приподнимает центральную часть формации в тех ситуациях, когда необходимо обеспечить повышенную проходимость (рис. 2а). Данная формация состоит из шести вращательных сочленений и четырех колес (рис. 2б).

На рис. 3а продемонстрирована формация «змея», состоящая из 10 модулей МАРС. Для передвижения данной формации используется колесная база модулей, а для маневрирования и преодоления препятствий – их подвижные сочленения, число которых составляет  $2 \cdot n$ , где  $n$  – число последовательно соединенных модулей. Рассмотренная модель имеет 40 колес и 20 подвижных сочленений. Структурная кинематическая схема данной формации представлена на рис. 3б.



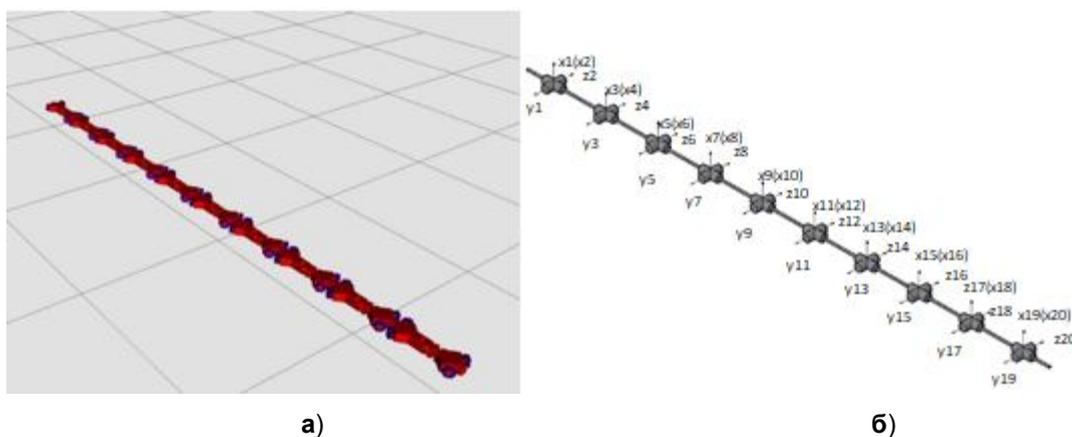
**Рис. 1.** Отдельный модуль МАРС: **а** – модель; **б** – структурная кинематическая схема

**Fig. 1.** One module of MARS: **a** – model; **b** – structural kinematic diagram



**Рис. 2.** Формация «машина» модульной робототехнической системы МАРС: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

**Fig. 2.** "Machine" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram



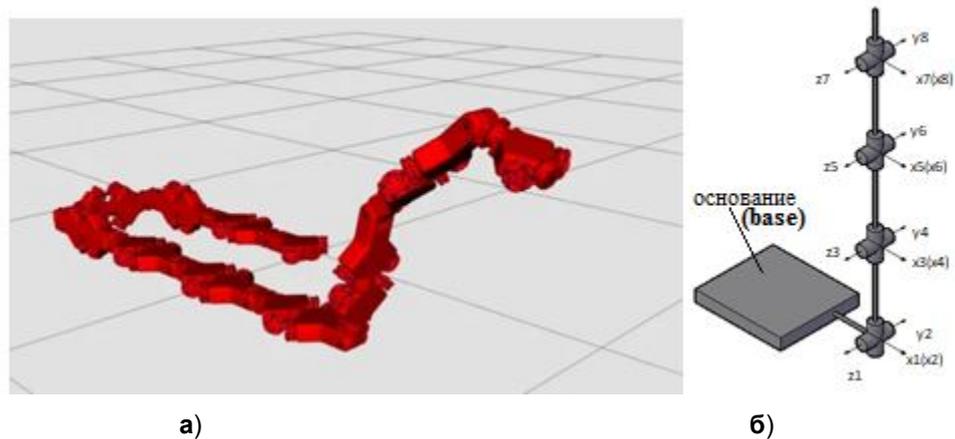
**Рис. 3.** Формация «змея» модульной робототехнической системы МАРС: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

**Fig. 3.** "Snake" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram

Формация «змея», не разделяясь, может перестроиться в формацию «манипулятор». Формация «манипулятор» МАРС представляет собой цепную структуру, закрепленную на неподвижном основании, составленном из других модулей. Число сочленений такой формации составляет  $2 \cdot n$ , где  $n$  – число последовательно соединенных модулей подвижной части. На рис. 4а представлена формация «манипулятор» модульной робототехнической системы МАРС с 8

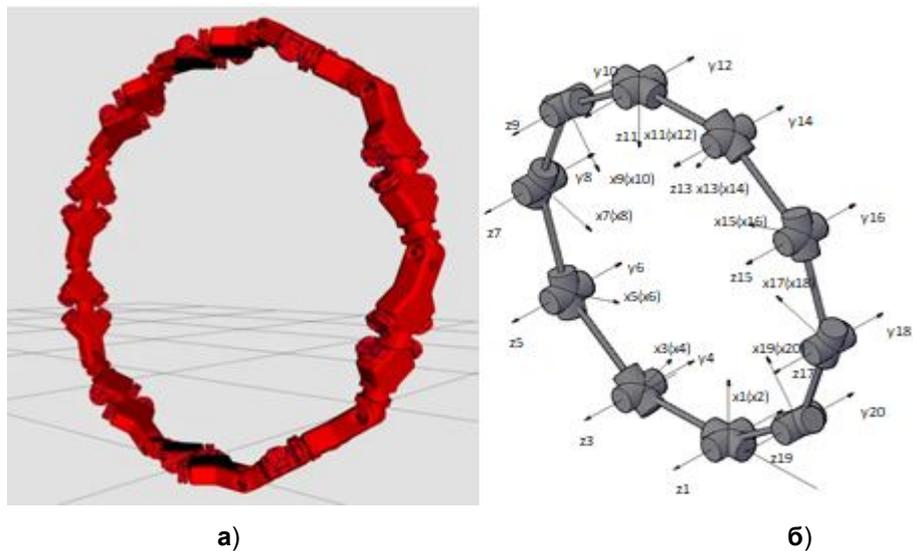
подвижными сочленениями. Структурная кинематическая схема данной формации представлена на рис. 4б.

Также, добавив дополнительную связь между концом и началом формации «змея», состоящей из 10 модулей, можно получить мобильную «перекатывающуюся» формацию «колесо» (рис. 5а). В таком случае данная структура будет иметь 20 подвижных сочленений и состоять из 10 модулей (рис. 5б).



**Рис. 4.** Формация «манипулятор» модульной робототехнической системы МАРС: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

**Fig. 4.** "Manipulator" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram

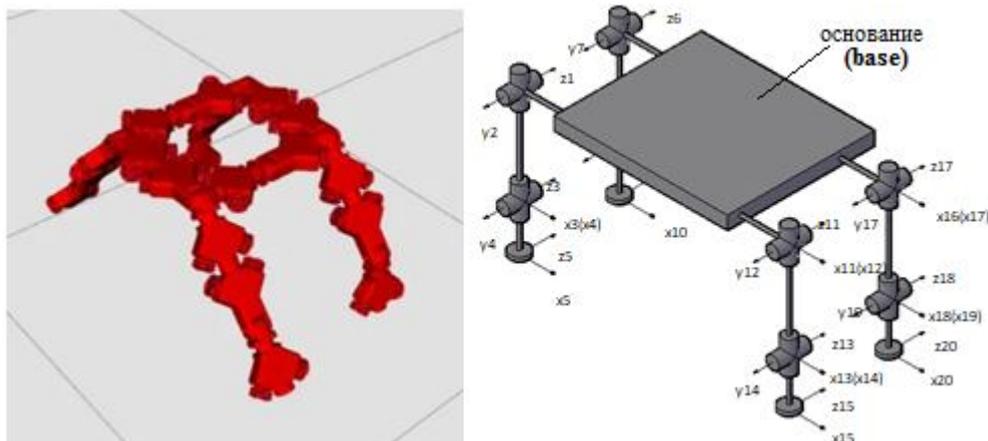


**Рис. 5.** Формация «колесо» модульной робототехнической системы МАРС: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

**Fig. 5.** "Wheel" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram

Наиболее сложной структурой модульной робототехнической системы МАРС является формация «квадропод». Она состоит из основания и четырех подвижных конечностей (ног), имеет решетчатую архитектуру и формируется из десяти модулей (рис. 6а). Каждая конечность состоит из двух модулей с четырьмя подвижными сочленениями.

Важным элементом данной схемы являются «ступни». Благодаря им происходит взаимодействие между робототехнической системой и окружающей средой, поэтому вводятся дополнительные системы отсчета:  $X_5Y_5Z_5$ ,  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ ,  $X_{15}Y_{15}Z_{15}$  и  $X_{20}Y_{20}Z_{20}$  (рис. 6б), которые связаны с окончанием каждой конечности.



**Рис. 6.** Формация «паук» модульной робототехнической системы МАРС: **а** – визуализация; **б** – структурная кинематическая схема

**Fig. 6.** "Spider" formation of a modular robotic system MARS: **a** – visualization; **b** – structural kinematic diagram

Сравнение структур, образуемых МАРС, с рассмотренными аналогами приведено в табл. 1. Символом «+» отмечена возможность образования определенной кинематической структуры дан-

ной модульной робототехнической системой, а символом «-» – данная модульная система не имеет возможности образовать конкретную формацию.

**Таблица 1.** Сравнение возможностей образования формация различных модульных робототехнических систем

**Table 1.** Comparison of Formation Possibilities of Various Modular Robotic Systems

Формации / Formation Модульная система / Modular system	«Машина» / «Machine»	«Змея» / «Snake»	«Манипулятор» / «Manipulator»	«Колесо», «сфера» / «Wheel», «orb»	«Квадропод», «паук», «сороконожка» / «Quadropod», «spider», «centipede»
Swarm-bot [9]	-	+	+	-	-
SMORES-EP [10]	+	+	+	+	+
Larva-bot [14]	-	-	+	-	+
Soldercubes [15]	+	+	+	-	+
Fable [16]	-	+	+	-	+
Hexamob [17]	-	+	+	+	+
СКБОТ [18]	-	+	-	+	-
Novel modular rolling robot [19]	-	-	-	+	-
MARS [6]	+	+	+	+	+

Основной особенностью модульной робототехнической системы МАРС является наличие у данной системы все-направленных колес. Это делает невозможным перемещение по мелкодисперсным поверхностям формаций, которые для передвижения используют колеса модулей. Также следует выделить формацию «машина». В данной формации за счет возможности перевозить грузы была существенно повышена маневренность. Формация «квадропод», которую могут образовать модули МАРС, является наиболее адаптируемой к различным типам поверхностей, затем за ней по степени адаптации к поверхности следуют формации «змея», «колесо», «машина». При этом стоит заметить, что шагающие формации имеют меньшую скорость передвижения по горизонтальным поверхностям по сравнению с формацией «машина». Также можно отметить, что формация «колесо» для передвижения и удержания равновесия требует управления всеми модулями, что усложняет систему управления, в то время как для перемещения формаций «машина», «змея» и «квадропод» требуется управлять сравнительно меньшим количеством модулей. Перемещение формации «манипулятор» возможно с помощью реконфигурации в, например, формацию «змея» или «квадропод» через промежуточные формации, при необходимости отключая или подключая модули. МАРС поддерживает возможность автономного расформирования текущей структуры и автономной сборки модулей, составляя различные формации.

## Выводы

В настоящей работе были рассмотрены наиболее часто используемые структуры модульных робототехнических систем. Наиболее адаптируемыми из них являются шагающие формации: «квадропод», «паук» и «сороконожка». Использование данных формаций сопровождается относительно низкой скоростью перемещения по сравнению с такими формациями, как «колесо», «машина» и «сфера», которые достигают на ровной поверхности больших скоростей. Для достаточно ограниченного рабочего пространства и поверхностей с переменными углами наклона (лестницы, узкие траншеи, трубы и шахты), а также пространств с перепадом высот (широкие ямы), наиболее подходящей структурой будет «змея». Подвид данной формации, «манипулятор», возможно также использовать для взаимодействия с объектами в рабочем пространстве. Исследование возможностей модульной робототехнической системы МАРС показало, что данная система обладает достаточной геометрией, чтобы с помощью ее модулей можно было реализовать все рассмотренные кинематические структуры модульных робототехнических систем. Кинематическая структура рассматриваемой системы способна изменяться в зависимости от типа поверхности передвижения, что обеспечивается способностью к самореконфигурации. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку системы управления для самореконфигурируемых роботов типа МАРС для решения задач кинематики, динамики и обеспечения плавности движения.

### Список литературы

1. Formation of modular structures with mobile autonomous reconfigurable system / N. Pavliuk, A. Saveliev, E. Cherskikh, D. Pykhov // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer, Singapore, 2020. 3. 383-395. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_31).
2. Roombots extended: Challenges in the next generation of self-reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture / S. Hauser, M. Mutlu, P. A. Léziart, H. Khodr, A. Bernardino, A. J. Ijspeert // Robotics and Autonomous Systems. 2020. Vol. 127. C. 103467. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103467>.
3. Current trends in reconfigurable modular robots design / A. Brunete, A. Ranganath, S. Segovia, J. P. de Frutos, M. Hernando, E. Gambao // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. Vol. 14. № 3. P. 1729881417710457. <https://doi.org/10.1177/1729881417710457>.
4. Self-reconfiguring modular robot learning for lower-cost space applications / A. B. Jones, T. Cameron, B. Eichholz, D. Loegering, T. Kray, J. Straub // 2019 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2019. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8742133>.
5. Modular Self-Reconfigurable Robots / M. Yim, P. J. White, M. Park, J. Sastra // 2009.
6. Pavliuk N. A., Krestovnikov K. D., Pykhov D. E. Mobile autonomous reconfigurable system // Problemele energeticii regionale. 2018. Vol. 1. C. 125-135. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1217296>.
7. Chennareddy S., Agrawal A., Karupiah A. Modular self-reconfigurable robotic systems: a survey on hardware architectures // Journal of Robotics. 2017. Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5013532>.
8. Dorigo M. et al. The swarm-bots project // International Workshop on Swarm Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. P. 31-44. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_4).
9. Mondada F. et al. The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2005. Vol. 12. №. 2. P. 21-28. <https://doi.org/10.1109/MRA.2005.1458313>.
10. Davey J., Kwok N., Yim M. Emulating self-reconfigurable robots-design of the SMORES system // 2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. IEEE, 2012. P. 4464-4469. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385845>.
11. Design and characterization of the ep-face connector / T. Tosun, J. Davey, C. Liu, M. Yim // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016. P. 45-51. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759033>.

12. An integrated system for perception-driven autonomy with modular robots / J. Daudelin, G. Jing, T. Tosun, M. Yim, H. Kress-Gazit, M. Campbell // *Science Robotics*. 2018. Vol. 3. №. 23. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat4983>.
13. An End-To-End System for Accomplishing Tasks with Modular Robots / G. Jing, T. Tosun, M. Yim, H. Kress-Gazit // *Robotics: Science and systems*. 2016. Vol. 2. P. 7.
14. The kinematics analysis of a novel self-reconfigurable modular robot based on screw theory / Y. Li, S. Zhu, Z. Wang, L. Zhang, X. Ma, Z. Cui // *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 2016. №. mime. <https://doi.org/10.12783/dtetr/mime2016/10196>.
15. Accomplishing high-level tasks with modular robots / G. Jing, T. Tosun, M. Yim, H. Kress-Gazit // *Autonomous Robots*. 2018. Vol. 42. №. 7. P. 1337-1354. <https://doi.org/10.1007/s10514-018-9738-1>.
16. Fable II: Design of a modular robot for creative learning / M. Pacheco, R. Fogh, H. H. Lund, D. J. Christensen // *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2015. P. 6134-6139. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140060>.
17. Patlolla S., Agrawal A., KR, A. HexaMob—a hybrid modular robotic design for implementing biomimetic structures // *Robotics*. 2017. Vol. 6. №. 4. P. 27. <https://doi.org/10.3390/robotics6040027>.
18. Sastra J., Chitta S., Yim M. Dynamic rolling for a modular loop robot // *The International Journal of Robotics Research*. 2009. Vol. 28. №. 6. P. 758-773. <https://doi.org/10.1177/0278364908099463>.
19. Wei X., Tian Y., Wen S. Design and locomotion analysis of a novel modular rolling robot // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 133. P. 23-43. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.004>.
20. Yuan Q., Wang J. Design and Experiment of the NAO Humanoid Robot's Plantar Tactile Sensor for Surface Classification // *2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. IEEE, 2017. P. 931-935. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.197>.
21. Rubtsova J. Approach to Image-Based Segmentation of Complex Surfaces Using Machine Learning Tools During Motion of Mobile Robots // *Electromechanics and Robotics*. Springer, Singapore, 2022. P. 191-200. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_17).
22. Connecting gripping mechanism based on iris diaphragm for modular autonomous robots / N. Pavliuk, P. Smirnov, A. Kondratkov, A. Ronzhin // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham, 2019. P. 260-269. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_25).

## References

1. Pavliuk N., Saveliev A., Cherskikh E., Pykhov D. Formation of modular structures with mobile autonomous reconfigurable system. *In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020; Springer, Singapore, pp. 383-395. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_31).
2. Hauser S., Mutlu M., Léziart P. A., Khodr H., Bernardino A., Ijspeert A. J. Roombots extended: Challenges in the next generation of self-reconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture. *Robotics and Autonomous Systems*. 2020; 127: 103467. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103467>.
3. Brunete A., Ranganath A., Segovia S., de Frutos J. P., Hernando, M., Gambao, E. Current trends in reconfigurable modular robots design. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017; 14(3): 1729881417710457. <https://doi.org/10.1177/1729881417710457>.
4. Jones A. B., Cameron T., Eichholz B., Loegering D., Kray T., Straub J. Self-reconfiguring modular robot learning for lower-cost space applications. *In 2019 IEEE Aerospace Conference*. 2019; pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8742133>.
5. Yim M., White P. J., Park M., Sastra J. Modular Self-Reconfigurable Robots. 2009.
6. Pavliuk N. A., Krestovnikov K. D., Pykhov D. E. Mobile autonomous reconfigurable system. *Problemele energeticii regionale*. 2018; 1: 125-135. DOI: 10.5281/zenodo.1217296.
7. Chennareddy S., Agrawal A., Karupiah A. Modular self-reconfigurable robotic systems: a survey on hardware architectures. *Journal of Robotics*, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/5013532>.
8. Dorigo M., Tuci E., Groß R., Trianni V., Labella T. H., Nouyan S., ... Gambardella, L. M. The swarm-bots project. *In International Workshop on Swarm Robotics*. 2004; Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 31-44. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_4).
9. Mondada F., Gambardella L. M., Floreano D., Nolfi S., Deneuborg J. L., Dorigo M. The cooperation of swarm-bots: Physical interactions in collective robotics. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2005; 12(2): 21-28. <https://doi.org/10.1109/MRA.2005.1458313>.
10. Davey J., Kwok N., Yim M. Emulating self-reconfigurable robots-design of the SMORES system. *In 2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. 2012; IEEE, pp. 4464-4469. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385845>.
11. Tosun T., Davey J., Liu C., Yim M. Design and characterization of the ep-face connector. *In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016; IEEE, pp. 45-51. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759033>.

12. Daudelin J., Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H., Campbell M. An integrated system for perception-driven autonomy with modular robots. *Science Robotics*. 2018; 3(23). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat4983>.
13. Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H. An End-To-End System for Accomplishing Tasks with Modular Robots. *In Robotics: Science and systems*. 2016; 2: p. 7.
14. Li Y., Zhu S., Wang Z., Zhang L., Ma X., Cui Z. The kinematics analysis of a novel self-reconfigurable modular robot based on screw theory. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 2016. DOI: 10.12783/dtetr/mime2016/10196.
15. Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H. Accomplishing high-level tasks with modular robots. *Autonomous Robots*. 2018; 42(7): 1337-1354. <https://doi.org/10.1007/s10514-018-9738-1>.
16. Pacheco M., Fogh R., Lund H. H., Christensen D. J. Fable II: Design of a modular robot for creative learning. *In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2015; IEEE, pp. 6134-6139. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140060>.
17. Patlolla S., Agrawal A., KR A. HexaMob—a hybrid modular robotic design for implementing biomimetic structures. *Robotics*. 2017; 6(4): 27. <https://doi.org/10.3390/robotics6040027>.
18. Sastra J., Chitta S., Yim M. Dynamic rolling for a modular loop robot. *The International Journal of Robotics Research*. 2009; 28(6): 758-773. <https://doi.org/10.1177/0278364908099463>.
19. Wei X., Tian Y., Wen S. Design and locomotion analysis of a novel modular rolling robot. *Mechanism and Machine Theory*. 2019; 133: 23-43. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.004>.
20. Yuan Q., Wang J. Design and Experiment of the NAO Humanoid Robot's Plantar Tactile Sensor for Surface Classification. *In 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. 2017; IEEE, pp. 931-935. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.197>.
21. Rubtsova J. Approach to Image-Based Segmentation of Complex Surfaces Using Machine Learning Tools During Motion of Mobile Robots. *In Electromechanics and Robotics*. 2022; Springer, Singapore, pp. 191-200. (in Press). [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_17).
22. Pavliuk N., Smirnov P., Kondratkov A., Ronzhin A. Connecting gripping mechanism based on iris diaphragm for modular autonomous robots. *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2019; Springer, Cham, pp. 260-269. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_25).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Савельев Антон Игоревич**, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: saveliev@iias.spb.su

**Anton I. Saveliev**, Senior Researcher and Head of Laboratory of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Russian Federation, e-mail: saveliev@iias.spb.su

**Блинов Дмитрий Владимирович**, магистр, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: d99b09@yandex.ru

**Dmitriy V. Blinov**, Master Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: d99b09@yandex.ru

**Ерашов Алексей Алексеевич**, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: erashov.a@iias.spb.su

**Aleksei A. Erashov**, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: erashov.a@iias.spb.su