

## Mobile Autonomous Reconfigurable System

Pavliuk N.A., Krestovnikov K.D., Pykhov D.E.

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences

SPIIRAS

St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The object of this study is a multifunctional modular robot able to assemble independently in a given configuration and responsively change it in the process of operation depending on the current task. In this work we aim at developing and examining unified modules for a modular robot, which can both perform autonomous movement and form a complex structure by connecting to other modules. The existing solutions in the field of modular robotics were reviewed and classified by power supply, the ways of interconnection, the ways of movement and the possibility of independent movement of separate modules. Basing on the analysis of the shortcomings of existing analogues, we have developed a module of mobile autonomous reconfigurable system, including a base unit, a set of magneto-mechanical connectors and two motor wheels. The basic kinematic scheme of the modular robot, the features of a single module, as well as the modular structure formed by an array of similar modules were described. Two schemes for placing sets of magneto-mechanical connectors in the basic module have been proposed. We described the principle of operation of a magneto-mechanical connector based on redirection of the magnetic flux of a permanent magnet. This solution simplifies the system for controlling a mechanism of connection with other modules, increases energy efficiency and a battery life of the module. Since the energy is required only at the moment of switching the operating modes of the connector, there is no need to power constantly the connector mechanism to maintain the coupling mode.

**Keywords:** modular robotics; servo drives; connector; magnetic circuit; magneto-mechanical connector.

DOI: 10.5281/zenodo.1217296

### Sistemul mobil autonom reconfigurabil

Pavliuc N. A., Crestovnicov C. D., Pihov D. E.

Institutul de Informatică și Automatizare din St Petersburg al Academiei de Științe din Rusia

SPIIRAS, Sankt-Petersburg, Federația Rusă

**Rezumat.** Obiectul acestui studiu este un robot modular multifuncțional, care este capabil să asambleze independent într-o configurație dată și să-l modifice în mod activ în procesul de operare, în funcție de sarcina curentă. În această lucrare ne propunem să dezvoltăm și să examinăm module unificate pentru un robot modular, care poate efectua atât mișcare autonomă, cât și o structură complexă prin conectarea la alte module. Soluțiile existente în domeniul roboticii modulare au fost revizuite și clasificate prin sursa de alimentare, căile de interconectare, căile de mișcare și posibilitatea de deplasare independentă a modulelor separate. Pe baza analizei deficiențelor analogilor existenți am dezvoltat un modul de sistem reconfigurabil autonom, care include o unitate de bază, un set de conectori magneto-mecanici și două roți motrice. Schema cinematică de bază a robotului modular, caracteristicile unui singur modul, precum și structura modulară formată dintr-o serie de module similare au fost descrise. Au fost propuse două scheme de plasare a seturilor de conectori magneto-mecanici în modulul de bază. Am descris principiul funcționării unui conector magneto-mecanic bazat pe redirecționarea fluxului magnetic al unui magnet permanent. Această soluție simplifică sistemul de control, crește eficiența energetică și durata de viață a bateriei întregului modul. Deoarece energia este necesară doar în momentul comutării regimurilor de funcționare ale conectorului, nu este nevoie să alimentăm în mod constant mecanismul conectorului pentru a menține modul de cuplare. Rezultatele unei serii de teste prototip au făcut posibilă determinarea caracteristicilor unui conector magneto-mecanic optim pentru utilizarea într-un sistem mobil reconfigurabil mobil.

**Cuvinte cheie:** robotica modulară; servodirecții; conector; circuit magnetic; conector magneto-mecanic.

### Мобильная автономная реконфигурируемая система

Павлюк Н.А., Крестовников К.Д., Пыхов Д.Э.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

СПИИРАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Объектом исследования является многофункциональный модульный робот, способный самостоятельно осуществлять реконфигурацию узлов и оперативно изменять их положение в процессе

работы в зависимости от текущей задачи. Целью работы является исследование и разработка гомогенных групп роботов, способных автономно передвигаться и формировать различные структуры путем соединения отдельных модулей между собой. В статье приводится обзор существующих решений в сфере модульной робототехники. В предложенной классификации существующие решения разделены на группы: по типу питания модулей, способам их соединения между собой, способам передвижения и осуществления самостоятельного перемещения отдельных модулей. Новизна работы заключается в особом методе применения магнитного поля постоянного магнита магнитно-механического коннектора, заключающемся в управлении его полярностью подачей кратковременных импульсов для переключения режимов работы коннектора, что обеспечивает высокую энергоэффективность, так как потребляет малое количество энергии и только во время переключения режимов работы. Разработанный магнитно-механический коннектор обеспечивает контроль позиционирования модулей мобильной автономной реконфигурируемой системы (МАРС) относительно друг друга на этапе сцепления и соединения в сложные конструкции. Передвижение модуля по поверхностям осуществляется при помощи мотор-колес, в которые встроена система сцепления модулей. Такой подход экономит пространство в робототехническом модуле и позволяет эффективно использовать его основную часть для расположения элементов питания и управляющих устройств. В работе предложены две схемы размещения наборов магнитно-механических коннекторов в базовом модуле: 1) для образования линейной структуры из последовательно соединенных модулей с шагом до двух модулей в сторону от основной цепи; 2) для формирования устойчивых массивов модулей для решения комплексных задач по перемещению и взаимодействию с окружающей средой.

**Ключевые слова:** модульная робототехника; сервоприводы; коннектор; магнитный контур; магнитно-механический коннектор.

## Введение

Среди современных прототипов малогабаритных модульных роботов большее развитие получили цепевидные, встроенные модули которых находятся в постоянном соединении и не предусматривают возможности самостоятельного передвижения [1]. В результате выход из строя одного из модулей цепи приводит к снижению работоспособности всего робота. Разработка полнофункционального автономного модуля, обладающего, в том числе, способностью самостоятельно передвигаться обеспечивает гибкость и реконфигурируемость модульного робота с возможностью перестроения структуры, замены вышедших из строя модулей [2]. В ходе представленного исследования были разработаны элементы конструкции и принципы функционирования автономной единицы модульного робота МАРС с использованием гибридного магнитно-механического механизма сцепления, встроенного в мотор-колесо модуля.

## I. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДУЛЬНЫХ РОБОТОВ И МОДУЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В настоящий момент разработчики модульных робототехнических средств решают проблемы, связанные со скоростью передвижения модулей. В связи с малыми габаритами модульных блоков отсутствует

возможность использовать мощные двигатели, из-за чего, помимо малой скорости, встает проблема синхронизации коннекторов. В таблице 1 рассмотрены четыре наиболее типовые модели современных модульных роботов, приведены способы их перемещения и соединения. Робот ChainFORM [3], разработанный в Массачусетском институте, оснащен сенсорной системой контроля касания, системой контроля углового наклона, сервоприводом для перемещений в стиле «ползания» или «карабка». В разрабатываемом роботе МАРС каждый отдельный модуль может перемещаться и функционировать как самостоятельная единица, используя два мотор-колеса, приводимых в движение сервоприводами, имеющими возможность работы в режиме электродвигателя постоянного тока.

Одной из разработок Массачусетского института является и робот m-Block [4]. Представленный ниже робот МАРС использует точный в управлении способ перемещения – мотор-колеса.

Разработанный специалистами из Национального центра исследований по робототехнике в Цюрихе и Федеральной политехнической школы в Лозанне робот Mofi описан в [5]. Описываемая в статье мобильная автономная реконфигурируемая система перемещается на мотор-колесах и может перемещаться как в составе структуры, так и как отдельный модуль.

M-TRAN – универсальный, гибкий 3D-печатный робот, самостоятельно меняющий свою конфигурацию и работает под управлением платы Arduino [6]. Модульный робот MAPC с магнитно-механическим коннектором не использует в своей

конструкции подвижных элементов и зацепов для стыковки модулей между собой, а точность позиционирования обеспечивается геометрическим ключом и его принципом действия.

Таблица 1.

Современные модульные роботы.

Модель	ChainFORM	M-Block	Mogi	M-TRAN
Вид питания	Внешнее	Аккумулятор	Внешнее	Аккумулятор
Перемещение модуля	Нет	Да	Да	Да
Способ передвижения	Червячное передвижение собранного робота	Инерционный	С помощью поворотных граней	Передвижение посредством сгиба и разгиба модуля
Тип стыковки модулей	Ручной	Магнитный	Ручной	Механический

Предлагаемый в работе [7] механизм обеспечивает эффективное и высокопрочное соединение благодаря бесконтактному приводу и специально разработанным зажимным профилям, которые позволяют модулям выдерживать большие нагрузки и самостоятельно отсоединять неисправные модули, таким образом, увеличивая универсальность и надежность всей роботизированной системы. Разработанный прототип магнитно-механического коннектора для мобильной автономной реконфигурируемой системы не использует подвижные детали для работы соединения.

В [8, 9] делается попытка упростить сравнение прототипов модульных роботов путем краткого изучения аппаратных архитектур модульных роботов, способных к самовосстановлению и реконфигурации, а также методов разработки модульных роботов, технологиях сопряжения. На начальном этапе разработки MAPC учитывались характеристики существующих решений и прототипов для последующего их применения в разрабатываемом прототипе.

Легкий реконфигурируемый модульный робот Evo-bot для изучения долгосрочных эволюционных процессов представлен в [10]. Разработанная модель магнитно-механического коннектора имеет высокую энергоэффективность, так как потребляет

малое количество энергии, равное 6 В и силе тока 0,17 А, и только в момент переключения режимов работы. Сила сцепления у разработанного прототипа составила 3,7 кг при сечении профиля контура в 0,01 м.

В статье [11] рассматривается механизм коннекторов для модульных роботов, который обеспечивает жесткое обратимое соединение, способное работать в трех независимых режимах. Разрабатываемый модульный робот MAPC обладает теми же режимами работы рассматриваемого коннектора, но обладает большим количеством степеней свободы и несколькими предлагаемыми наборами коннекторов, а также имеет большую функциональность.

Всесторонний обзор реконфигурируемых модульных роботов, который охватывает происхождение, историю, современное состояние, ключевые технологии, проблемы и приложения реконфигурируемых модульных роботов представлен в работе [12].

В [13] представлен HexaMob, предназначенный для использования в биомиметических структурах – системах, основанных на подражании эффективным механизмам живой природы. В [14] описывается магнитное соединение так называемых «мягких» модулей (Soft robotics). Разработанный магнитно-механический

коннектор позволяет увеличить силу сцепления модулей таких роботов и увеличить энергоэффективность системы в целом.

В статье [15] представлены алгоритмы стыковки мобильных саморемонтируемых роботов, оснащенных недорогими датчиками. За счет конструкции коннекторов и способу стыковки в предложенном модульном роботе МАРС необходимое количество дополнительных датчиков снижается.

В статье [16] рассмотрен модульный принцип построения функциональных блоков мобильных роботов, представлены основные идеи этого понятия и общая структура гетерогенного робота. Разработанное решение магнитно-механического коннектора позволяет внедрить коннектор для сопряжения блоков в малогабаритный разработанный модуль с диаметром колеса до 7 см<sup>2</sup>.

Автономная модульная роботизированная система Mecabot, способная модифицировать свою физическую конфигурацию в зависимости от типа местности и препятствий, с которыми она может столкнуться – пример системы для поисково-спасательных работ в условиях городской среды [17, 18]. Предлагаемый прототип модульного робота МАРС обладает большей скоростью перемещения как в виде отдельного модуля, так и в виде какой-либо структуры, за счет использования в качестве опоры мотор-колес, что позволяет в будущем применять его в данной области.

В работе [19] рассматривается проблема динамической реконфигурации на примере набора модулей ModRED на основе теории графов. Разработанная мобильная автономная реконфигурируемая система с магнитно-механическим коннектором предлагает более компактное решение для соединения роботов, нежели ModRED.

В [20] представлена разработка механического стыковочного устройства для гетерогенной самореконфигурируемой многомодульной системы. Предлагаемый магнитно-механический коннектор удерживает соединение магнитным контуром.

В [21] представлен проект модульного робота, способного реконфигурировать свою конструкцию в условиях неровной местности. Разрабатываемая мобильная автономная реконфигурируемая система МАРС может точно позиционироваться за счет принципа

работы магнитно-механического коннектора и специального геометрического ключа, разработанного для исключения воздействия боковых нагрузок.

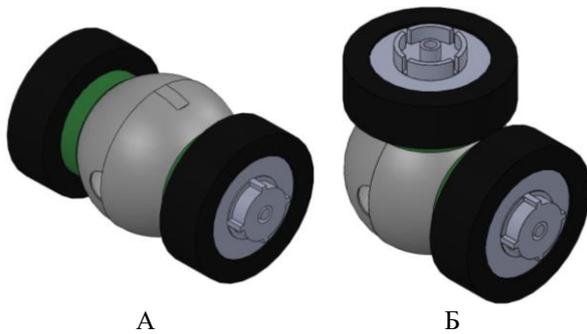
Из представленного обзора современных разработок в области малой модульной робототехники следует, что при разработке модульной робототехники часто жертвуют полезным функционалом в угоду отдельно разрабатываемой технологии или алгоритму работы, что в дальнейшем создает проблемы применения полученных решений модульных роботов. У некоторых приведенных в обзоре разработок не указана потенциальная сфера применения механизма. Представленный в статье модульный робот МАРС имеет магнитно-механический коннектор с высокой энергоэффективностью, потребляющим энергию только в момент переключения режимов работы.

## II. МОБИЛЬНАЯ АВТОНОМНАЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ СИСТЕМА

Концепция разрабатываемого робота основывается на построении робота на базе пары мотор-колес, базового блока с поворотным сервоприводом, ось которого стоит перпендикулярно осям мотор-колес. Внутри базового блока такого модуля установлен осевой сервопривод, отвечающий за поворот мотор-колеса на 90° в сторону от главной оси движения. При такой конструкции платформа способна совершать отклонение осей ведомого мотор-колеса в пределах 180°. На рисунке (рис. 1) показаны стандартное положение модульного робота, в котором он может передвигаться, используя мотор-колеса. Также показан один из вариантов смещения мотор-колеса с коннектором В-типа вокруг оси сервопривода базового блока относительно стандартного положения модуля. Внутри каждого мотор-колеса установлен сервопривод, способный как выполнять повороты на заданный угол, так и вращаться на 360° вокруг собственной оси. Это позволит каждому отдельно взятому блоку-модулю робота перемещаться быстрее, чем аналоги, разворачиваться на месте с нулевым радиусом разворота, а также позволит без разъединения изменять структуру, организованную из таких блоков.

Сервоприводы мотор-колес так же отвечают за позиционирование двух платформ относительно друг друга. При соединении они корректируют себя на угол,

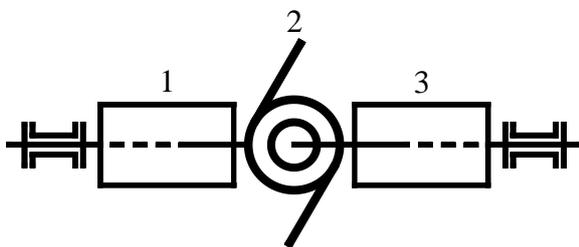
необходимый для точного позиционирования пазов «ключа» активной и ответной частей магнитно-механического коннектора на одной оси.



А стандартное положение модуля;  
Б. модуль со смещенным вокруг оси базового блока мотор-колесом с коннектором В-типа

**Рис. 1. Обобщенная модель отдельного блока-модуля.**

На рисунке ниже (рис. 2) показана базовая кинематическая схема модуля, состоящая из сервоприводов мотор-колес и осевого сервопривода базового блока. Конечное количество степеней свободы определяется количеством модулей в одной сцепке.



1, 3. сервоприводы мотор-колес;  
2- осевой сервопривод базового блока

**Рис. 2. Кинематическая схема блока-модуля.**

Разрабатываемый модуль обладает следующими особенностями:

- масса одного блока-модуля составляет не более 1 кг;
- ширина корпуса укладывается в 0,1 м, за исключением шин мотор-колес;
- кинематическая схема включает три привода;
- главный механизм соединения – магнитно-механический контур;
- корпусные элементы модульного робота будут предотвращать боковой отрыв коннектора А-типа одного модуля от коннектора В-типа другого;

- два типа контактных площадок, А и В. А – активная площадка с магнитным контуром, В – ответная часть магнитно-механического коннектора;

- контактные площадки каждого типа имеют специальную форму для точного и плотного контакта коннекторов;

- дополнительные контактные площадки типа В или А на базовом блоке, для формирования комплексных и замкнутых структур;

- механизм магнитно-механического коннектора удерживает до 3 кг на разрыв магнитного контура;

- Энергия будет требоваться механизму коннектора только для переключения режимов работы, для поддержания активного режима энергия не требуется.

- используется одна из двух схем контактных площадок: АВВВ, либо ААВВ, в зависимости от требований к структуре, которую должны формировать модули.

Модульная структура, которую должны формировать эти блоки, также будет иметь ряд особенностей:

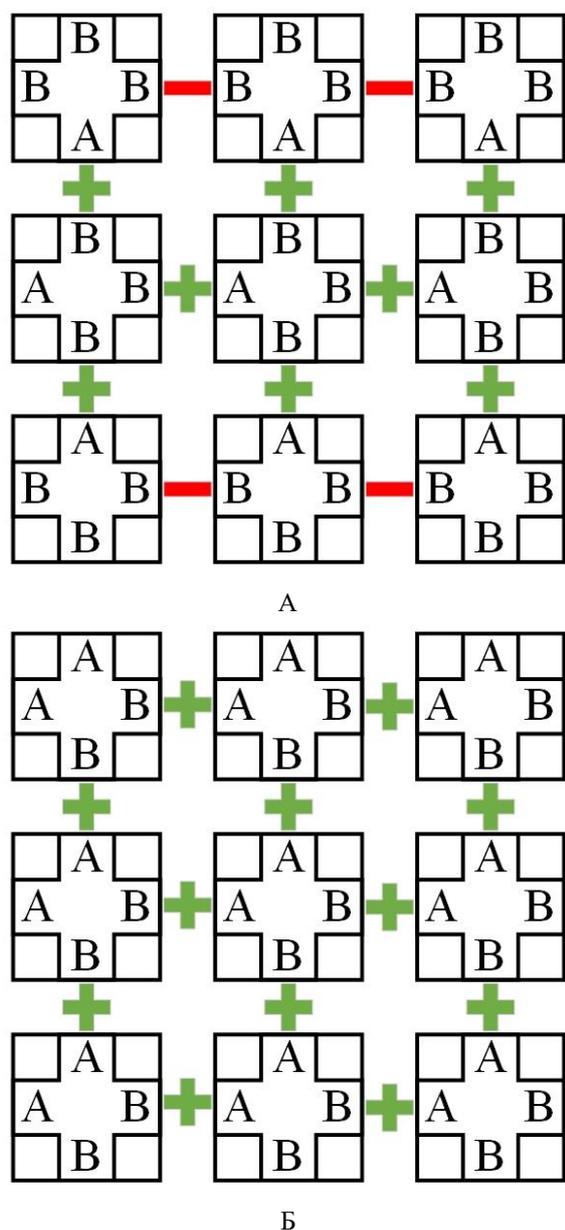
- структура сможет формироваться в манипулятор со множеством степеней свободы при любой из выбранных схем контактных площадок;

- аккумуляторы блоков-модулей соединяются последовательно для стабилизации питания в структуре;

- модули соединяются по схеме А+В, при необходимости меняя положение контактных площадок вокруг своей оси, либо разворачивая блок на месте.

Конструкции мотор-колес для коннекторов А и В различны, так как В – колесо ведомое и его конструкция не включает массивных и тяжелых элементов, для снижения нагрузки на осевой сервопривод во время движения. Основа коннектора В-типа – стальное кольцо специальной формы для уменьшения люфтов боковых сдвигов и нагрузок, приходящих на магнитный контур, выступающее как контактная площадка для активной части магнитно-механического соединения. В колесе с коннектором А-типа находится активный магнитно-механический коннектор, основной магнитный контур. Мотор-колесо А-типа фиксировано относительно базового блока, не перемещается вокруг оси сервопривода базового блока модуля для оптимальности кинематической схемы и

системы управления. Разработаны две схемы расположения коннекторов блока-модуля «АВВВ» и «ААВВ» (рис. 3), отличающиеся друг от друга особенностями реализации и возможностями формирования структурных образований.



А. схема коннекторов «АВВВ»;  
 Б. схема коннекторов «ААВВ»

**Рис. 3. Схемы расстановки коннекторов и возможное их применение в структуре.**

Схема АВВВ (рис. 3, А) легко применима в конструкции модуля, так как использует один активный магнитный контур и три ответных площадки в теле одного модуля. Схема подходит для образования линейной структуры из последовательно соединенных модулей с шагом до двух модулей в сторону от основной цепи, но при

такой схеме невозможно сформировать замкнутую структуру. Это означает, что схема АВВВ не позволит создать устойчивый массив модулей для решения комплексных задач по перемещению и взаимодействию с окружающей средой. Такая схема подойдет для формирования базовых механизмов, например, манипуляторов.

Схема ААВВ (рис. 3, Б) массивнее, так как необходимо разместить рядом два магнитных контура, что приведет к увеличению веса модуля и энергопотребления, для размещения в теле базового блока модуля требуется доработка коннектора А-типа. Однако при этом схема позволяет модулям собираться в замкнутую систему, где каждое устройство будет соединено минимум с двумя соседними. Таким образом получится формировать сложные модульные структуры разных конфигураций и назначения, используя лишь один тип модульных роботов.

Знаком «+» в схемах (рис. 4) обозначена возможности по соединению коннекторов между собой, знак «-» показывает невозможность соединения одного модуля с другим при таком положении относительно друг друга. Из схемы видно, что схема ААВВ предпочтительна, поскольку позволит создавать более многозадачные, чем в случае со схемой АВВВ, механизмы.

### III. МАГНИТНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ КОННЕКТОР

Предложенный механизм коннектора позволяет использовать систему управления, не требующую постоянного контроля со стороны блока управления, а также расходует энергию только во время соединения и разъединения модулей друг от друга, что значительно сокращает затраты энергии и увеличивает время автономной работы каждого модуля. Механизм состоит из двух частей: коннектора А-типа, выступающего как рабочий орган, состоящий из постоянного магнита, служащего основанием в стальном стакане с контактной площадкой на торце и с электромагнитом внутри, в полости стакана, включаемого на короткий промежуток времени, когда нужно ослабить магнитное поле и разъединить два модуля. Коннектор В-типа – ответная часть специальной формы для надежного контакта и исключения боковых движений и нагрузок на контур коннектора. Разработка подходящей конфигурации и конструкции прототипов велась, исходя из требований, предъявляемым к характеристикам магнитно-механического коннектора. Подходящий постоянный магнит подбирался исходя из того, что его

магнитодвижущая сила должна быть равна [22, стр. 19]:

$$F_{\text{ПМ}} = H_{\text{ПМ}} \times l_{\text{ПМ}}, \quad (1)$$

где  $l_{\text{ПМ}}$  длина постоянного магнита в направлении его намагниченности,  $H_{\text{ПМ}}$  коэрцитивная сила постоянного магнита, таким образом подошел неодимовый магнит с силой сцепления в 3,8 кг.

Напряженность магнитного поля в стали магнитопровода [23, стр. 104]:

$$H_{\text{СТ}} = \frac{B_{\text{СТ}}}{\mu_0 \times \mu_{\text{СТ}}}, \quad (2)$$

где  $\mu_{\text{СТ}}$  относительная проницаемость стали магнитопровода, а  $\mu_0$  магнитная постоянная, равная:

$$4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн} / \text{ м}, \quad (3)$$

Исходя из этого на данный момент было решено использовать обычные марки стали, применяемые в промышленности. Ввиду неидеального прилегания деталей магнитного захвата между активной и пассивной частями захвата возникает воздушный зазор, приводящего к ослаблению сцепного усилия захвата. При малой ширине воздушного зазора можно принять его сечение равным сечению магнитопровода. Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре сердечника магнитопровода [23, стр. 104]:

$$H_B = \frac{B_B}{\mu_0}, \quad (4)$$

Закон полного тока для магнитного поля магнитопровода с воздушным зазором [23, стр. 104]:

$$H_B \times l_B + H_{\text{СТ}} \times l_{\text{СТ}} = F_{\text{ПМ}}, \quad (5)$$

Исходя из 1, 2, 3 и 4 магнитная индукция в воздушном зазоре магнитопровода равна:

$$B_B = \frac{(F_{\text{ПМ}} - H_{\text{СТ}} l_{\text{СТ}}) \mu}{l_B}, \quad (6)$$

Тогда сцепное усилие магнитного захвата  $F$  может быть рассчитано с помощью

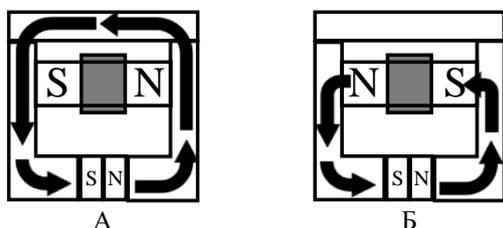
формулы Максвелла на основании анализа магнитного поля, действующего на поверхности полюсов [24, стр. 115]:

$$F = \frac{B_B^2 S}{2\mu_0}, \quad (7)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения магнитопровода.

Первый прототип магнитного захвата был реализован в виде двух полу-чашек, постоянного магнита, электромагнита управления и ответной части (рис. 4). Постоянный магнит установлен между стальных получашек, образуя незамкнутый контур, а управляющий электромагнит расположен над постоянным магнитом на расстоянии 0,01 мм, эта конструкция представляет собой рабочую, активную часть механизма магнитно-механического коннектора, коннектор А-типа. Пассивная ответная часть захвата представляет собой кольцо, по диаметру соответствующее полу чашкам активной части, коннектор В-типа. Таким образом механизм состоит из двух коннекторов, имеющих вид стакана и кольца, вместе образующих магнитно-механический коннектор. При силе сцепления, равной 5 кг, изменение усилия при подаче управляющего сигнала на электромагнит для переключения захвата в состоянии расцепления составляло менее 5 г. Подобного рода эксперименты с постоянными магнитами проводились и ранее [25, 26]. Форма коннекторов выбрана для размещения внутри интерфейсов электропитания и связи, для последовательного соединения модулей при образовании структуры. При разработке конструкции предполагалось, что магнитные линии постоянного магнита будут замыкаться по магнитопроводу через пассивную ответную часть захвата при подаче управляющего сигнала на электромагнит, ток которого индуцировал магнитное поле в сердечнике электромагнита встречное полю постоянного магнита (рис. 4, А). При таком управляющем импульсе захват переходит в состояние зацепления. При управляющем импульсе ток которого индуцирует в сердечнике электромагнита магнитный поток со направленный с магнитным потоком постоянного магнита (рис. 4, Б), магнитные линии постоянного магнита замыкаются через сердечник электромагнита, а контур

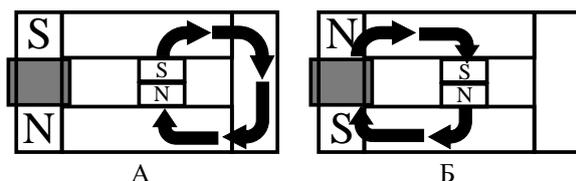
коннектора переходит в состояние расщепления. Полученные при проведении первых экспериментов, с прототипом магнитного контура, данные показали, что в такой конфигурации (рис. 4) работа магнитного контура не имеет требуемых характеристик.



А. состояние сцепления; Б. состояние расщепления

**Рис. 4. Первый прототип магнитного контура.**

На основе полученных данных была пересмотрена конфигурация и конструкция магнитного контура, разработан и изготовлен следующий прототип магнитного контура. Новый прототип, как и первый, основан на принципе перенаправления магнитного потока постоянного магнита. Принцип работы новой конструкции остался тем же что и в первом образце, но отличается тем, что управляющий электромагнит, соединенный магнитопроводом с постоянным магнитом, расположен с противоположной стороны от пассивной ответной части (Рис. 6). Постоянный магнит смещен в сторону ответной части захвата.



А. состояние сцепления; Б. состояние расщепления

**Рис. 5. Второй прототип магнитного контура.**

При подаче управляющего импульса, ток которого индуцирует в сердечнике электромагнита магнитный поток со направленный магнитному потоку постоянного магнита, магнитный поток замыкается по контуру, образованному сердечником электромагнита, после чего захват переходит в состояние расщепления (рис. 5, б). При токе, направленном в обратном направлении, захват переходит в состояние сцепления (рис. 5, а). Экспериментальные исследования нового

прототипа показали, что такие конфигурация и конструкция коннектора соответствуют требуемым характеристикам магнитно-механического коннектора.

При подаче управляющего импульса для перевода захвата в состояние сцепления, сила сцепления составляла от 3,7 до 7,3 кг, что подтверждается графиком результатов проведенных опытов (рис. 6). При подаче управляющего импульса для перевода захвата в состояние расщепления, сила сцепления составляет менее 20 г. В виду не полностью равномерного совмещения рабочей и ответной части контура, усилие сцепления изменялось от опыта к опыту. С учетом двух разработанных прототипов магнитно-механического коннектора было проведено 150 опытов, полученные результаты обработаны с использованием интервальной оценки случайной величины, после было отсеяна треть результатов экспериментов, в которых нарушалась повторяемость опыта или менялись условия проведения. Проведение серии экспериментов проходило с одинаковым по мощности управляющим импульсом, равным 6 В и силе тока 0,17 А. Также требуется учитывать то, что в проведенных экспериментах сила разрыва, приложенная к захвату направлена по нормали, при возникновении боковых, сдвигающих усилий на магнитный захват сцепное усилие снижается. На основе данных измерений построен статистический график для анализа работы магнитного контура (рис. 6). Сравнение отличий прототипа №1 и прототипа №2 приведено в таблице 2.

Таблица 2.

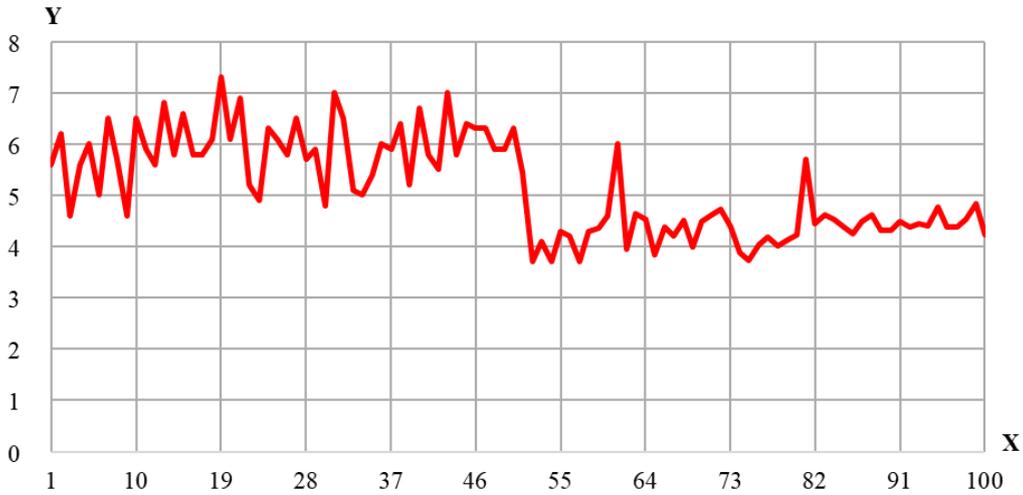
Сравнительные характеристики разработанных прототипов коннектора.

Порядковый номер прототипа	Усилие на разрыв в режиме сцепления, кг	Усилие на разрыв в режиме расщепления, кг	Мощность управляющего импульса, В; А
№1	3,7	0,02	6; 0,17
№2	3,7	3,7	6; 0,17

Действие этих эффектов снижается при использовании ответных частей коннектора со специальной геометрической формой «ключа» совмещения захвата. Разработав такой ключ, можно исключить возникновение

люфтов и последующих боковых сдвигающих сил. Для точности совмещения частей контура

на прилегающих плоскостях захвата вырезан сферический ключ.

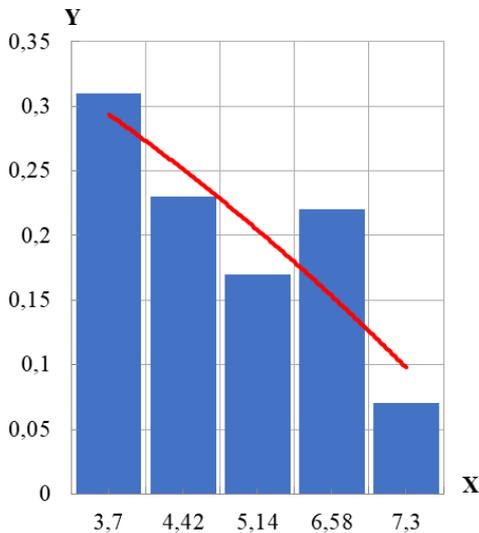


X. номер проведенного измерения;  
Y. усилие разрыва для магнитного контура

**Рис. 6. График результатов работы магнитного контура при проведении первой серии опытов по номеру измерения с использованием интервальной оценки случайной величины.**

Далее приведено разбиение результатов эксперимента на 5 интервалов приложенных сил для разрыва контура (рис. 7).

запасом обеспечивающая необходимое усилие сцепления магнитного контура, что вместе с ключом для исключения люфтов и нагрузок позволит одному коннектору удерживать до 3 кг полезной нагрузки.



X. усилие, приложенное для разрыва контура,  
Y. количество проведенных измерений

**Рис. 7. Гистограмма распределения усилий, приложенных для разрыва контура.**

Обработка результатов показала возможные минимальное и максимальное усилия разрыва магнитного контура, и позволила определить его среднее значение. По результатам первой серии экспериментов была разработана конструкция прототипа, с

Для практического использования магнитно-механического коннектора целесообразно использовать значение минимального сцепного усилия захвата, для его надежной и предсказуемой работы. Предлагаемая модель магнитно-механического коннектора имеет высокую энергоэффективность, так как потребляет малое количество энергии и только во время переключения режимов работы.

### Заключение

В работе проведен анализ существующих модульных робототехнических средств и их соединений. На основе выявленных достоинств и недостатков были сформированы следующие результаты:

1. Предложена модель гомогенных модульных роботов, которая включает в себя набор магнитно-механических коннекторов, два мотор-колеса и базовый блок модуля. Мотор-колеса двойного назначения предназначены как для движения, так и в качестве вспомогательного механизма соединения модулей между собой. Базовый блок модуля включает в себя осевой

сервопривод, вычислительный блок, модули связи и элементы питания.

2. Предложена модель и принцип работы магнитно-механического коннектора, основанный на перенаправлении магнитного потока постоянного магнита. Разработан прототип магнитно-механического коннектора, обеспечивающего соединение между модулями при помощи механического фиксирующего соединения, постоянного магнита для стыковки модулей друг с другом и электромагнита для разрыва соединения. Предлагаемая в статье модель магнитно-механического коннектора имеет высокую энергоэффективность, так как потребляет малое количество энергии, равное 6 В и силе тока 0,17 А, и только в момент переключения режимов работы. При этом сила сцепления у разработанного прототипа составила 3,7 кг.

3. Предложены две схемы размещения наборов магнитно-механических коннекторов, дающих разные возможности по формированию из множества модулей как базовых линейных конструкций, так и более комплексных структур различного типа и назначения.

Результаты исследования будут использованы при разработке механизмов соединений узлов антропоморфных роботов, в частности при разработке антропоморфного робота Антарес [27], для получения модульной и реконфигурируемой конструкции.

**Исследование выполнено при поддержке Федерального агентства научных организаций (№ АААА-А16-116033110095-0).**

#### Литература (References)

- [1] Ivanov A.A., Shmakov O.A.: An algorithm for defining the inner geometry of a snakelike manipulator in case of leading link movements along the incremental trajectory. *SPIIRAS Proceedings*. 49(6), 190-207 (2016). doi:10.15622/sp.49.10
- [2] Dashevskiy V.P., Budkov V.Yu., Ronzhin A.L. Survey of Modular Robots and Developed Embedded Devices for Constructive and Computing Components // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. – Springer, Cham, 2017. LNAI 10459. – pp. 50-58. doi: 10.1007/978-3-319-66471-2\_6
- [3] Nakagaki, K., Dementyev, A., Follmer, S., Paradiso, J. A., & Ishii, H. (2016, October). ChainFORM: A Linear Integrated Modular Hardware System for Shape Changing Interfaces. *In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 87-96). ACM. doi: 10.1145/2984511.2984587
- [4] Romanishin J. W., Gilpin K., Rus D. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots // *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 3-7 Nov. 2013, art. no. 6696971, pp. 4288-4295. doi: 10.1109/IROS.2013.6696971
- [5] Belke C. H., Paik, J. Mori: a modular origami robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5), 2153-2164. (2017).
- [6] Murata S., Yoshida E., Kamimura A., Kurokawa H., Tomita K., Kokaji S. M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Volume: 7, Issue: 4, Dec. 2002, pp. 431 – 441 doi: 10.1109/TMECH.2002.806220
- [7] Saab W., Ben-Tzvi P. Development of a Novel Coupling Mechanism for Modular Self-Reconfigurable Mobile Robots. In *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. V05BT08A007-V05BT08A007). (2015, August). doi: 10.1115/DETC2015-46659
- [8] Chennareddy, S., Agrawal, A., & Karuppiah, A. (2017). Modular Self-Reconfigurable Robotic Systems: A Survey on Hardware Architectures. *Journal of Robotics*, 2017. doi: 10.1155/2017/5013532
- [9] Saab W., & Ben-Tzvi, P. A Genderless Coupling Mechanism with Six-Degrees-of-Freedom Misalignment Capability for Modular Self-Reconfigurable Robots. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 8(6), 061014. (2016). doi: 10.1115/1.4034014
- [10] Escalera J. A., Mondada F., Groß R. Evo-bots: A modular robotics platform with efficient energy sharing. *In Modular and Swarm Systems Workshop at IROS*. (2014).
- [11] Moubarak P. M., Ben-Tzvi P. A tristate rigid reversible and non-back-drivable active docking mechanism for modular robotics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(3), 840-851. (2014). doi: 10.1109/TMECH.2013.2261531
- [12] Liu J., Zhang X., Hao G. Survey on research and development of reconfigurable modular robots. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(8), (2016). doi: 10.1177/1687814016659597
- [13] Reddy C. S. S., Patlolla S., Agrawal A., KR, A. HexaMob — A Hybrid Modular Robotic Design for Implementing Biomimetic Structures. *Robotics*, 6(4), 27. (2017). doi: 10.3390/robotics6040027
- [14] Lee J. Y., Cho, K. J. Development of magnet connection of modular units for soft robotics. *In Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*

- (URAI), 2017 14th International Conference on (pp. 65-67). IEEE. (2017, June). doi: 10.1371/journal.pone.0169179
- [15] Won P., Biglarbegan M., Melek, W. Development of an effective docking system for modular mobile self-reconfigurable robots using extended Kalman filter and particle filter. *Robotics*, 4(1), 25-49. (2015). doi: 10.3390/robotics4010025
- [16] Andreev V., Kim V. Control system and design of the motion module of a heterogeneous modular mobile robot. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 586-595. (2016).
- [17] Castillo R. A., Gómez D. J., Vargas G. A. Implementation and Assembly of a Robotic Module for the MECABOT-3 Reconfigurable System. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(21), 10681-10684. (2016).
- [18] Motienko A. I. et al. Proactive robotic systems for effective rescuing sufferers // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. – Springer, Cham, 2016. p. 172-180.
- [19] Baca J., Hossain S. G. M., Dasgupta P., Nelson C. A., Dutta A. Modred: Hardware design and reconfiguration planning for a high dexterity modular self-reconfigurable robot for extra-terrestrial exploration. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(7), p. 1002-1015. (2014). doi: 10.1016/j.robot.2013.08.008
- [20] Wenzel W., Cordes F., Kirchner F. A robust electro-mechanical interface for cooperating heterogeneous multi-robot teams. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 1732-1737). IEEE. (2015, September). doi:10.1109/IROS.2015.7353601
- [21] Kumar P., Saab W., Ben-Tzvi P. Design of a Multi-Directional Hybrid-Locomotion Modular Robot with Feedforward Stability Control. In *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. V05BT08A010-V05BT08A010). (2017, August). doi:10.1115/DETC2017-67436
- [22] Devochkin O.V., Lohnin V.V., Merkulov R.V., Smolin E.N. *Jeletricheskie apparaty: ucheb. posobie dlja stud. uchrezhdenij sred. prof. obrazovanija* [Electrical apparatus: training. allowance for stud. establishments of environments. prof. of education]. Moskva, 2010. - 240 s. (in Russian).
- [23] Lomonosov V.Ju., Polivanov K.M., Mihajlov O.P. *Jeletrotehnika* [Electrical Engineering]/ Moskva: Jenergoatomizdat, 1990., 400 s. (in Russian).
- [24] Devochkin O.V., Lohnin V.V., Merkulov R.V., Smolin E.N. *Jeletricheskie apparaty: ucheb. posobie dlja stud. uchrezhdenij sred. prof. obrazovanija* [Electrical apparatus: training. allowance for stud. establishments of environments. prof. of education]. Moskva, 2010. - 240 s. (in Russian).
- [25] Flynn C.J., Methods for controlling the path of magnetic flux from a permanent magnet and devices incorporating the same. US Patent No: US 6,246,561 B1, 2001.
- [26] Flynn J.C, Talsoe B. N. Childress J.J. (2006). Parallel Path Magnetic Technology for High Efficiency Power Generators and Motor Drives. doi:10.1063/1.2169303
- [27] Kodyakov A.S., Pavlyuk N.A., Budkov V.Yu., Prakapovich R.A. Stability Study of Anthropomorphic Robot Antares under External Load Action. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803 (2017) 012074. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012074

**Сведения об авторах.**



**Павлюк Никита Андреевич** – м.н.с., аспирант лаборатории «Автономных робототехнических систем» СПИИРАН. Область научных интересов: робототехника, мехатроника  
E-mail: [antei.hasgard@gmail.com](mailto:antei.hasgard@gmail.com)



**Пыхов Дмитрий Эдуардович** – программист лаборатории «Автономных робототехнических систем» СПИИРАН. Область научных интересов: робототехника, мехатроника  
E-mail: [dmitriy\\_pykhv@mail.ru](mailto:dmitriy_pykhv@mail.ru)



**Крестовников Константин Дмитриевич** – программист лаборатории «Автономных робототехнических систем» СПИИРАН. Область научных интересов: электроника, робототехника  
E-mail: [open56it@gmail.com](mailto:open56it@gmail.com)