

## Разработка устройства сопряжения для модульной сельскохозяйственной робототехнической платформы

**Константин Дмитриевич Крестовников**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su;  
**Алексей Алексеевич Ерашов**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: erashov.a@iias.spb.su;

**Юлия Геннадиевна Васюнина**,  
программист,  
e-mail: yuliya.vasunina@gmail.com;  
**Антон Игоревич Савельев**,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: saveliev@iias.spb.su

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что для создания многофункциональных робототехнических платформ сельскохозяйственного применения актуально использовать модульный принцип, который позволит устанавливать различное навесное оборудование в зависимости от задач, поставленных перед робототехническим средством. Отметили, что автономная реконфигурация снизит вмешательство человека в эксплуатацию и затраты на обслуживание. (*Цель исследования*) Разработать масштабируемое устройство сопряжения функциональных модулей с базовой сельскохозяйственной робототехнической платформой, которое сможет обеспечить механическую фиксацию, передачу энергии и информационный обмен. (*Материалы и методы*) Провели анализ исследовательских работ в направлении решений для сопряжения модулей в робототехнических комплексах, отметили их достоинства и недостатки. Создали структуру механизма сопряжения для обеспечения корректного взаимного положения и фиксации модуля с базовой платформой при возможности энергетического и информационного обмена. (*Результаты и обсуждение*) Вывели расчетные соотношения для устройства сопряжения, позволяющие вычислять допустимые линейные смещения и допустимое угловое отклонение сопрягаемых элементов механизма. Определили основные размеры прототипа устройства по заданным допустимым линейными отклонениями в диапазоне до 10-13 миллиметров и с допустимым угловым отклонением 20 градусов. Реализовали прототип устройства сопряжения с габаритными размерами: длина – 200 миллиметров, ширина – 130, высота – 58 миллиметров. Провели с ним эксперименты, изменяя линейные и угловые отклонения сопрягаемых элементов. (*Выводы*) Определили, что успешное сопряжение происходит в 98 процентах случаев при соблюдении допустимых расчетных смещений. Заключение, что предложенное устройство сопряжения позволит реализовать автономную замену модулей многофункциональных робототехнических платформ.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственная робототехника, модульная робототехническая платформа, модульная робототехника, устройство сопряжения, функциональные модули роботов.

**Для цитирования:** Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Васюнина Ю.Г., Савельев А.И. Разработка устройства сопряжения для модульной сельскохозяйственной робототехнической платформы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 78-88. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-78-88.

## Development of Interface Device for Modular Agricultural Robotic Platform

**Konstantin D. Krestovnikov**,  
junior researcher,  
e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su;  
**Aleksei A. Erashov**,  
junior researcher, e-mail: erashov.a@iias.spb.su;

**Yuliya G. Vasyunina**,  
software developer,  
e-mail: yuliya.vasunina@gmail.com;  
**Anton I. Savel'ev**,  
senior researcher, e-mail: saveliev@iias.spb.su

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** To create multifunctional robotic platforms for agricultural use, it is reasonable to use a modular principle that will allow installing various equipment depending on the tasks assigned to the robotic tool. Providing autonomous reconfiguration capabilities will reduce human interference and maintenance costs. (*Research purpose*) This work is aimed

at developing a scalable device for interfacing functional modules with the agricultural robotic base platform, which can provide mechanical fixation, energy transfer and information exchange. (*Materials and methods*) This article analyzes the previous research into the solutions for interfacing modules in robotic complexes and points out their benefits and drawbacks. Based on the analysis and own research, the interface mechanism structure was developed to ensure the correct mutual position and fixation of the module to the base platform under the assumption of possible energy and information exchange. (*Results and discussion*) In the course of the work, the design ratios for the interface device were derived, making it possible to calculate the permissible linear displacements and permissible angular deviation of the mechanism interfacing elements. Based on the permissible linear deviations up to 10-13 millimeters and a permissible angular deviation of 20 degrees, the main dimensions of the device prototype were obtained. A prototype interface device was operationalized with the dimensional specifications of 200 millimeters in length, 130 millimeters in width, 58 millimeters in height. Several experiments with the device prototype were carried out based on various linear and angular deviations of the interfacing elements. (*Conclusions*) It was found out that successful interfacing occurs in 98 percent of cases subject to admissible calculated displacements. It was concluded that the proposed interface device will allow for the autonomous replacement of modules of multifunctional robotic platforms.

**Keywords:** agricultural robotics, modular robotic platform, modular robotics, interface device, functional modules of robots.

**For citation:** Krestovnikov K.D., Erashov A.A., Vasyunina Yu.G., Savel'ev A.I. Razrabotka ustroystva sopryazheniya dlya modul'noy sel'skokhozyastvennoy robototekhnicheskoy platformy [Development of interface device for modular agricultural robotic platform]. *Sel'skokhozyastvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 78-88 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-78-88.

**М**одульный подход в робототехнике заключается в разделении структуры или архитектуры на функциональные модули. Это дает возможность для использования модулей различного функционала вследствие унификации соединительной части модуля и базовой платформы или базового модуля.

Модульная робототехника активно развивается: разрабатываются новые реконфигурируемые и самореконфигурируемые робототехнические системы (РС) с разным функционалом и многими способами реконфигурации [1-3].

Поскольку выращивание сельскохозяйственных культур на различных этапах требует применения оснастки, значительно отличающейся по конструкции, модульный подход к робототехническим средствам становится практичным и эффективным решением [4, 5]. Применение модульного подхода к построению РС в комплексе с возможностью самореконфигурации позволит создавать автономные многофункциональные платформы, не требующие внимания обслуживающего персонала при смене оснастки. При этом актуальна разработка соединений между базовой платформой и модулями с их автоматической установкой и заменой, с возможностью передавать данные и энергию. Кроме того, внедрение автономной реконфигурации позволит снизить общее вовлечение человека в эксплуатацию и повысить адаптивность системы к условиям функционирования.

Современную сельскохозяйственную технику по степени автоматизации выполняемых задач можно разделить на пилотируемую и беспилотную.

К первому типу относят разработки компании *John Deere*, функциональное оборудование которой сты-

куется с трактором при участии рабочего персонала. Некоторое оборудование характеризуется универсальностью в эксплуатации. Аналогичный список сельхозтехники имеет концерн *Claas*: тракторы со сменным оборудованием, зерноуборочная техника, техника для кормораздачи, опрыскиватели, погрузчики и т.д. Здесь обычно не предусмотрена автономная замена возможных функциональных устройств.

Беспилотная техника представлена такими роботизированными сельскохозяйственными системами, которые содержат несменные и сменные функциональные устройства. К первым можно отнести, например, робототехнические платформы *U-Go* и *Agri.q02* [4, 6]. Выбранная конструкция роботов не позволяет масштабировать и адаптировать РС к различным задачам.

Среди систем со сменными модулями можно выделить автономную агропромышленную платформу *OMNiPOWER*, которая имеет режим автоматической установки и замены функциональных модулей. Стыковочное устройство представляет собой конусовидную направляющую, для фиксации функциональных модулей используются крюки, угловое положение которых изменяется с помощью гидроприводов. Для выполнения различных сельскохозяйственных задач предназначен мобильный робот *Formica 01* [7]. Его минус – узкая специализация, не предполагающая переоборудования или дополнения различными модулями. Тот же недостаток имеют аналогичные сельскохозяйственные платформы [5, 8].

На базе автономной модульной сельскохозяйственной платформы *Thorvald II* можно сформировать различные виды привода и рулевого управления с любым количеством колес и функциональных элемен-

тов [9, 10]. Персонал вручную проводит реконфигурацию и замену модулей [11]. Механизм их сопряжения с базовой платформой не унифицирован.

Помимо робототехнических платформ, предназначенных для применения в агропромышленности, можно отметить потенциально подходящие для выполнения сельскохозяйственных задач мобильные модульные платформы. Например, компания *Fetch Robotics* представила платформы *Fetch* и *Freight* для работы в складских помещениях [12-15]. Шасси платформ имеет одинаковую конструкцию и программно-аппаратное обеспечение. К недостаткам можно отнести невозможность использования базового устройства платформы без других функциональных модулей, так как на ней уже есть навесное оборудование. Преимуществом конструкции модульной РС стала возможность установки модулей в местах, определяемых при сборке робота [16]. Однако данная система не позволяет устанавливать иное функциональное оборудование, как и платформы *Fetch* и *Freight* [15].

У рассмотренных модульных робототехнических платформ отсутствует возможность автономной реконфигурации: зачастую используется способ замены модулей с помощью персонала. Отмеченного недостатка лишены самореконфигурируемые модульные роботы. Так, с помощью модулей *CKBot* квадратной формы можно сформировать различные конфигурации модульной РС [17]. Модули соединяются посредством винтов или постоянных магнитов. Соединения располагаются на нескольких гранях модуля. На каждом модуле *Superbot* есть шесть разъемов для сопряжения с другими модулями и передачи энергии и данных [18]. Используемые разъемы допускают подключение модулей с угловым смещением между ними, кратным 90°. Аналогичным преимуществом обладает устройство сопряжения модуля *PolyBot* [19]. Конструкция с защелками позволяет передавать энергию и данные между модулями.

Возможно функциональное разделение устройства сопряжения на активные и пассивные составляющие [20-22]. В его активной части зачастую используют электродвигатели для создания удерживающего момента. Такие устройства обеспечивают лишь механическое сопряжение, данные могут передаваться беспроводным способом, при этом питание робота может быть автономным [21, 23]. Возможности по масштабированию устройств авторы не обсуждали.

В системе *I-BLOCKS* предусмотрено электрическое и механическое соединение между модулями [24]. В качестве основы самих блоков использованы детали *LEGO Duplo*. Для передачи питания есть отдельный блок. Аналогичным способом электрического соединения модулей пользуются авторы модульной РС *Molecube* [25, 26]. Модули данной РС электрически соединяются между собой посредством штыревого разъема «вилка – розетка» типа *PLS*.

Для сопряжения модулей используют и магниты, что уменьшает габариты конструкции, устраняя необходимость в приводах и других механических элементах [27, 28]. Более того, стыковка с использованием магнитов не требует точного наведения. Однако при существенных нагрузках надежность такого соединения значительно ниже по сравнению с механическим [29]. Оно требует также высокой точности и чистоты обработки поверхностей соединения.

Современная модульная робототехника представлена полностью независимыми модулями. Соединительные механизмы обеспечивают только физическое сопряжение и требуют достаточно высокой точности позиционирования сопрягаемых модулей. Кроме того, при необходимости информационного взаимодействия и передачи энергии зачастую требуется привлечение пользователя или рабочего персонала.

Для передачи энергии и информации между модулями чаще используют решения, основанные на разъемах и контактных парах [26, 30, 31]. Достаточно часто применяют и беспроводные системы передачи информации, особенно если нет необходимости в передаче энергии, однако, как правило, они отличаются большей стоимостью. Разъемы и контактные пары позволяют передавать питание между модулями и использовать любые стандартные шины передачи данных [32, 33]. В случае отдельных контактных пар контакты можно расположить в любом порядке и на произвольном расстоянии друг от друга, что позволит адаптировать и масштабировать такое электрическое соединение под возможности позиционирования модульной РС. Общим недостатком разъемов и контактных пар считается низкая защищенность от воздействия окружающей среды.

Описанные возможности автономного формирования различных структур посредством модулей ограничены отсутствием надежного механического соединения при возможных значительных нагрузках.

**Цель исследования** – разработать устройство сопряжения, которое позволит с заданной точностью автономно сопрягать модули РС с базовой платформой.

**Материалы и методы.** Конструктивно-кинематическая схема разработанного электромеханического устройства сопряжения имеет пассивную и активную части (рис. 1а).

Концепция устройства сопряжения основана на принципе фиксации активной частью захватного механизма кинематически не связанной с ним пассивной части с возможностью контактной передачи энергии и данных. Цель сопряжения – такое физическое зацепление пассивной части, при котором система отсчета в точке *P*, привязанная к нижней грани пассивной части, совмещается с системой отсчета в точке *O*, принадлежащей активной части (рис. 1б). Для этого необходимо, чтобы обе составляющие активной ча-

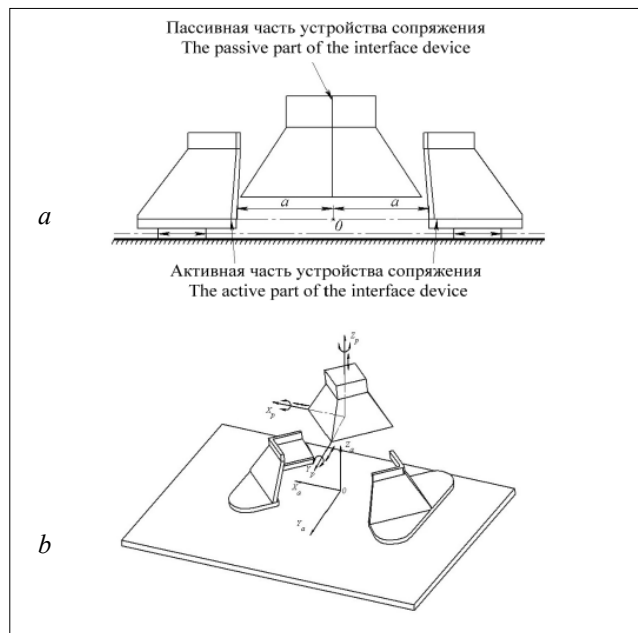


Рис. 1. Устройство сопряжения: а – конструктивно-кинематическая схема; б – привязка систем отсчета к пассивной и активной части

Fig. 1. Interface device: a – structural and kinematic diagram; b – binding the reference systems to the passive and active part

сти устройства сопряжения линейно перемещались на одинаковое расстояние  $a$  (рис. 1а). Это позволит зафиксировать пассивную часть с учетом заданных ограничений на начальные смещения. Решение разработано с учетом требований к ограниченной точности позиционирования РС.

Выбор представленных форм активной и пассивной частей обусловлен необходимостью дополнительных сил и моментов, которые направят бы пассивную часть к точке  $O$ . При этом допускается, что пассивная часть относительно системы координат активной части в точке  $O$  до начала процесса сопряжения может иметь определенные линейные и угловые отклонения по положению и ориентации, то есть пассивная часть имеет 6 степеней свободы относительно активной части. Для сопряжения необходимо определить ограничения на эти параметры.

Рассмотрим две проекции предлагаемого устройства сопряжения в системе координат с центром в точке  $O$  (рис. 2).

Допустимое линейное отклонение при сопряжении  $d_x$  вдоль оси  $X$  соответствует граничному положению при  $z_{\max}$ , которое определяется высотой губок:  $z_{\max} = h$ . В процессе сопряжения при  $z_{\max}$  для успешного сопряжения  $d_x$  будет наименьшим. При этом чем меньше расстояние между активной и пассивной частью захвата по оси  $Z$ , тем больше может быть  $d_x$ . Под успешным сопряжением подразумевается возможность достижения конечного положения, соответствующее достижению точки  $O$  пассивной частью устройства (рис. 2).

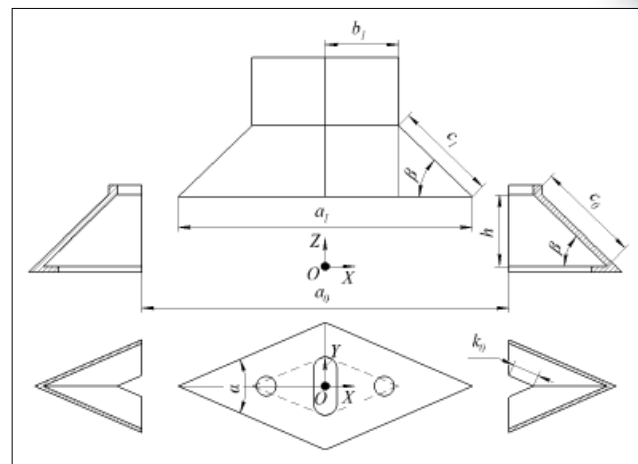


Рис. 2. Проекция элементов устройства сопряжения:  $a_0$  – максимальное расстояние, на которое могут быть разведены губки активной части устройства сопряжения;  $a_1$  – длина большей диагонали основания пассивной части устройства;  $b_1$  – размер крепежной площадки для крепления пассивной части устройства сопряжения к модулю системы;  $c_0$  – размер ребра губки активной части устройства;  $c_1$  – длина ребра пассивной части устройства;  $k_0$  – длина стороны угла верхней части губок, с которой пассивная часть контактирует при сопряжении;  $h$  – высота губок;  $\alpha$  – угол между ребрами как пассивной, так и активной части устройства;  $\beta$  – угол наклона ребра пассивной части и губки активной части

Fig. 2. Projections of the interface device elements:  $a_0$  – the maximum distance to which the jaws of the active part of the interface device can be spread;  $a_1$  – the length of the larger diagonal of the device passive part base;  $b_1$  – the size of the mounting platform for attaching the passive part of the interface device to the system module;  $c_0$  – the size of the jaw edge in the active part of the device;  $c_1$  – length of the edge in the device passive part;  $k_0$  – the length of the jaw angle side in the upper part where the passive part interfaces;  $h$  – the height of the jaws;  $\alpha$  – the angle between the edges of both the passive and active parts of the device;  $\beta$  – the tilt angle of the passive part edge and the active part jaw

Тогда допустимое линейное отклонение  $d_x$  вдоль оси  $X$ , исходящей из системы координат в точке  $O$ , должно удовлетворять условие (1):

$$\begin{cases} -\frac{a_0 - a_1}{2} < d_x < \frac{a_0 - a_1}{2} \\ a_0 > a_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a_0$  – максимальное расстояние, на которое могут быть разведены губки активной части устройства сопряжения, мм;

$a_1$  – длина большей диагонали основания пассивной части устройства, мм;

$d_x$  – допустимое линейное отклонение, мм.

При проектировании устройства сопряжения параметр  $a_1$  его пассивной части зависит от угла наклона губки активной части устройства  $\beta$  (рис. 2). Изменяя этот угол, можно уменьшать или увеличивать параметр  $a_1$ :

$$a_1 = 2 \cdot (c_1 \cos \beta + b_1), \quad (2)$$

где  $c_1$  – длина ребра пассивной части устройства, мм;  
 $b_1$  – размер крепежной площадки, мм;  
 $\beta$  – угол наклона ребра пассивной части и губки активной части, град.

Полученное значение входит в расчет отклонения в условии (1), поэтому, подставив выражение (2) в (1), можно определить диапазон допустимых отклонений вдоль оси  $X$ , варьируя параметр  $\beta$ . В соответствии с этим условие (1) приобретает следующий вид:

$$-\frac{a_0 - 2 \cdot (c_1 \cos \beta + b_1)}{2} < d_x < \frac{a_0 - 2 \cdot (c_1 \cos \beta + b_1)}{2}. \quad (3)$$

Для успешного сопряжения необходимо, чтобы линейное отклонение вдоль оси  $X$  находилось в диапазоне допустимых отклонений в соответствии с (3).

Допустимое линейное отклонение при сопряжении  $d_y$  вдоль оси  $Y$  относительно центра  $O$  также определяется при  $z_{\max} = h$ . Диапазон данных линейных отклонений можно вычислить в соответствии с неравенством (4):

$$-\left|k_0 \sin \frac{\alpha}{2}\right| < d_y < \left|k_0 \sin \frac{\alpha}{2}\right|, \quad (4)$$

где  $k_0$  – длина стороны угла верхней части губок, с которой пассивная часть контактирует при сопряжении, мм;

$\alpha$  – угол между ребрами как пассивной, так и активной части устройства, град.;

$d_y$  – линейное отклонение вдоль оси  $Y$ , мм.

Для успешного сопряжения необходимо, чтобы линейное отклонение  $d_y$  вдоль оси  $Y$  находилось между расчетными значениями в (4). Теоретически угол  $\alpha$  может иметь значения в диапазоне ( $0^\circ$ ;  $180^\circ$ ), однако практически рекомендуется выбирать значения из диапазона ( $45^\circ$ ;  $90^\circ$ ). Это обусловлено тем, что при больших значениях угла может ухудшиться свойство центрирования сопряжения, что снизит точность конечного положения активной и пассивной частей, а также потребует прикладывать значительную силу к губкам активной части устройства сопряжения.

Если выбирать значения угла меньше  $45^\circ$ , то это потребует большей точности позиционирования между активной и пассивной частями устройства для успешного сопряжения. Аналогичными причинами можно обосновать рекомендуемый диапазон значений угла  $\beta \in (25^\circ; 70^\circ)$ , теоретический диапазон которого ( $0^\circ$ ;  $180^\circ$ ).

Допустимое линейное отклонение  $d_z$  вдоль оси  $Z$  рассматривается с учетом отклонений  $d_x$  и  $d_y$ , при которых пассивная часть устройства сопряжения находится на такой высоте вдоль оси  $Z$ , чтобы активная часть устройства вошла в контакт с ней для дальнейшего сопряжения. Отклонение  $d_z$  зависит от угла  $\beta$  и длины  $c_1$  и для успешного сопряжения необходимо, чтобы выполнялось неравенство:

$$0 \leq d_z < c_0 \cos \beta, \quad (5)$$

где  $d_z$  – допустимое линейное отклонение вдоль оси  $Z$ , мм.

Допустимый диапазон углового отклонения относительно оси  $Z$  при сопряжении определяется при  $z_{\max}$ , что обусловлено необходимостью контакта ребра пассивной части устройства сопряжения с ребрами губок активной части:

$$-\left|atan\left(\frac{2\left(k_0 \sin \frac{\alpha}{2} - d_y\right)}{a_1}\right)\right| < \theta_z < \left|atan\left(\frac{2\left(k_0 \sin \frac{\alpha}{2} - d_y\right)}{a_1}\right)\right|, \quad (6)$$

где  $\theta_z$  – угловое отклонение относительно оси  $Z$ , град.

Таким образом, для успешного сопряжения необходимо, чтобы поворот пассивной и активной частей устройства сопряжения относительно друг друга вдоль оси  $Z$  находился в расчетном диапазоне (6).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Для апробации предложенной методики расчета были заданы исходные требования по допустимым отклонениям при сопряжении и необходимые размеры для будущего прототипа:  $a_1 = 57$  мм;  $b_1 = 14$  мм;  $\beta = 60$  град.;  $d_x = 10$  мм;  $d_y = 11$  мм;  $d_z = 13$  мм;  $\theta_z = 20$  град. Это предельно допустимые значения для успешного сопряжения.

С учетом исходных размеров и принятых допустимых отклонений необходимо выразить линейные размеры  $a_0$ ,  $c_0$  и  $k_0$ . Поскольку устройство сопряжения симметрично относительно точки  $O$ , то далее рассматриваются только неотрицательные отклонения  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$  и  $\theta_z$ .

Из (1) с учетом вышесказанного получается следующее неравенство:

$$a_0 > a_1 + 2d_x. \quad (7)$$

Подставив в (7) исходные данные, найдем, что  $a_0 > 77$  мм. Далее приняли, что  $a_0 = 78$  мм.

Ограничение величины  $c_0$  выражается из (5):

$$\begin{cases} c_0 > \frac{d_z}{\cos \beta} \\ 25^\circ < \beta < 70^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

Подставим исходные данные в (8), тогда  $c_0 > 26$  мм. Приняли, что  $c_0 = 27$  мм.

В соответствии с практической рекомендацией на ограничение угла  $\alpha$  выбрали значение  $\alpha = 85^\circ$ . Тогда из неравенства (4) можно получить ограничение для  $k_0$ :

$$k_0 > \frac{d_y}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (9)$$

В соответствии с (9) нашли, что  $k_0 > 16$  мм, выбрали  $k_0 = 17$  мм.

С учетом принятых в соответствии с (7)-(9) значениями и заданными параметрами в САПР определили новые размеры и реализовали модель электромеханического устройства сопряжения. Далее на модели визуализировали рассчитанные значения допустимых отклонений при сопряжении (рис. 3) и взаимное расположение пассивной и активной частей.

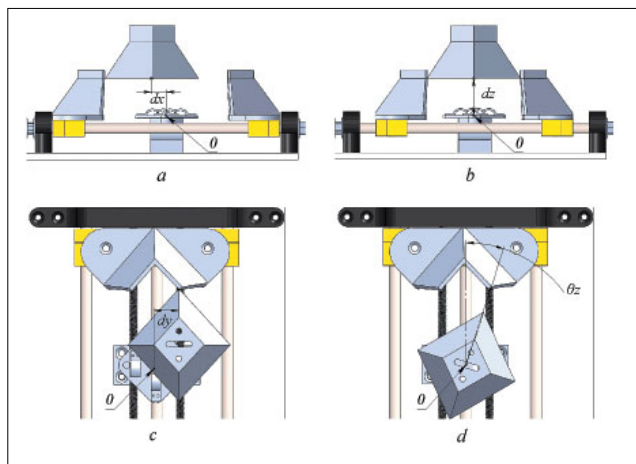


Рис. 3. Взаимное расположение пассивной и активной частей устройства сопряжения при максимально допустимых отклонениях: а – вдоль оси X; б – вдоль оси Z; с – вдоль оси Y; д – угловое отклонение относительно оси Z

Fig. 3. The mutual position of the passive and active parts on the interface device model with the maximum permissible deviations: a – dx deviation (along the X-axis); b – dz deviation (along the Z-axis); c – dy deviation (along the Y-axis); d –  $\theta_z$  deviation (angular deviation relative to the Z-axis)

При отклонениях, заданных при расчете, сопряжение потенциально должно пройти успешно. Использование граничных значений расчетных размеров и углов в деталях устройства сопряжения в совокупности с неточностями изготовления может снизить вероятность успешного сопряжения в реальном устройстве.

В соответствии с расчетными соотношениями предложенной структуры электромеханического устройства сопряжения был реализован экспериментальный прототип (рис. 4 и 5).

Сопряжение частей устройства осуществляется путем сведения губок захватного механизма.

Размеры устройства сопряжения зависят от необходимых значений подключаемых модулей и геометрических параметров платформы. Габаритные размеры прототипа составляют  $200 \times 130 \times 58$  мм.

В экспериментах оценивали успешность сопряжения в зависимости от углового и линейных отклонений. Сопряжение считалось успешным, если пассивная часть устройства расположена по центру и зафиксирована в активной части, а также установлен электрический контакт для передачи питания и информации. Для подтверждения электрического контакта использовали световую индикацию.

Эксперименты по сопряжению (демонстрация работы устройства сопряжения модулей РТК: [https://www.youtube.com/watch?v=i3kNkyfoLGE&ab\\_channel=LaboratoryofAutonomousRoboticSystems](https://www.youtube.com/watch?v=i3kNkyfoLGE&ab_channel=LaboratoryofAutonomousRoboticSystems)) проводились отдельно по каждому отклонению с разделением на две группы. Первая группа экспериментов заключалась в изменении одного параметра в рамках допу-

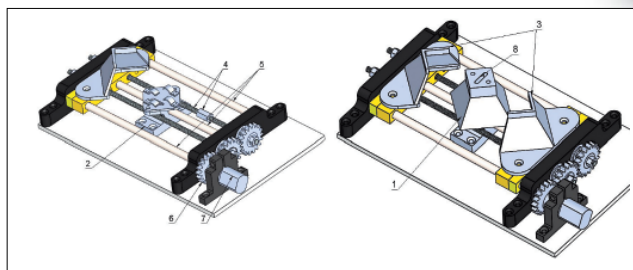


Рис. 4. 3D-модель прототипа устройства сопряжения: 1 – пассивная часть; 2 – основание активной части; 3 – захватные губки активной части механизма; 4 – передача «винт – гайка»; 5 – направляющие вала передачи «винт – гайка»; 6 – шестерни; 7 – электродвигатель; 8 – отверстие под контакты

Fig. 4. 3D model of the interface device prototype: 1 – passive part; 2 – the active part's base; 3 – gripping jaws of the mechanism's active part; 4 – "screw-nut" transmission; 5 – guide shafts of the "screw-nut" transmission; 6 – gears; 7 – electric motor; 8 – hole for contacts

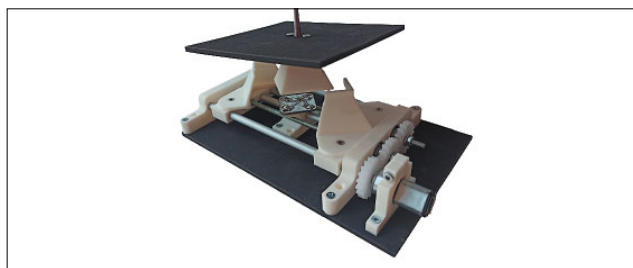


Рис. 5. Экспериментальный прототип устройства сопряжения

Fig. 5. An experimental prototype of the interface device

стимого диапазона, при этом остальные отклонения принимали равными 90% от максимально допустимого значения. Во второй группе изменяли одновременно три отклонения при фиксированном значении одного. Диапазон значений отклонений выбран близким к максимально допустимым, а для всех значений в выбранном диапазоне проводили по 10 экспериментов. При этом использовали оборудование, позволяющее устанавливать линейные отклонения с погрешностью 0,3 мм и угловое отклонение с погрешностью  $0,5^\circ$ .

Для оценки успешности сопряжения выбрали значения в диапазоне линейных отклонений вдоль оси X от 5 до 10 мм с шагом 1 мм (табл. 1).

При приближении отклонения к максимально допустимому значению снижается вероятность успешного сопряжения. Так, при смещении по оси X на 10 мм количество успешных сопряжений составило 90%. Ожидался более низкий показатель успешных сопряжений, однако выбор параметров в соответствии с неравенствами (7)-(9) позволил получить более широкий реальный диапазон допустимых отклонений (3)-(6). При изменении трех других отклонений и фиксированном  $d_x$  успешность сопряжения уменьшилась

Результаты экспериментов с отклонениями по оси X THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON DEVIATIONS ALONG THE X-AXIS													
Параметры / Parameters	Значение / Value												
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm: X	5	6	7	8	9	10	9						
Y	11						6	7	8	9	10	11	12
Z	12						7	8	9	10	11	12	13
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	18						8	10	12	14	16	18	20
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	80

на 20%. Это можно объяснить тем, что с увеличением  $d_y$  диапазон допустимого углового смещения  $\theta_z$  сужается.

Для оценки успешности сопряжения был выбран диапазон линейных отклонений вдоль оси Y от 3 до 11 мм с шагом 2 мм (табл. 2).

При отклонениях относительно оси Y, достигающих заданного допустимого значения, возможность успешного сопряжения может составить примерно 90%.

значение соответствует среднему по двум группам экспериментов.

При изучении углового отклонения относительно оси Z между пассивной и активной составляющими устройства сопряжения был принят диапазон от 4 до 20° с шагом 4° (табл. 4).

При  $\theta_z = 20^\circ$  все 10 сопряжений выполнены успешно. При этом 80% удачных попыток попыток зафиксированы, когда отклонения  $d_x$ ,  $d_y$  и  $d_z$  равны заданным допустимым значениям. Устройство сопряже-

Результаты экспериментов с отклонениями по оси Y THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON DEVIATIONS ALONG THE Y-AXIS												
Параметры / Parameters	Значение / Value											
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm: Y	3	5	7	9	11	11						
X	9						5	6	7	8	9	10
Z	12						8	9	10	11	12	13
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	18						10	12	14	16	18	20
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	90

Отклонения между активной и пассивной составляющими прототипа устройства вдоль оси Z выбраны в диапазоне от 5 до 13 мм с шагом 2 мм (табл. 3).

При отклонениях  $d_z = 13$  мм доля успешных сопряжений может составить приблизительно 90%. Это

спроектировано так, чтобы параметр  $d_x$  не сказывался на допустимом угловом смещении, которое должно оставаться в установленных пределах. Связь параметра  $\theta_z$  с отклонением  $d_y$  приведена в формуле (6).

Результаты экспериментов с отклонениями вдоль оси Z THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON DEVIATIONS ALONG THE Z-AXIS												
Параметры / Parameters	Значение / Value											
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm: Z	5	7	9	11	13	12						
X	9						5	6	7	8	9	10
Y	10						6	7	8	9	10	11
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	18						10	12	14	16	18	20
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	90

Таблица 4

Table 4

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С УГЛОВЫМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ Z**  
**THE RESULTS OF EXPERIMENTS BASED ON ANGULAR DEVIATIONS ALONG THE Z-AXIS**

Параметры / Parameters	Значение / Value										
Угловое отклонение, град. Angular deviation, degree	4	8	12	16	20	18					
Линейные отклонения по осям, мм: Linear deviations along the axes, mm:						5	6	7	8	9	10
X	9					5	6	7	8	9	10
Y	10					6	7	8	9	10	11
Z	12					3	5	7	9	11	13
Успешность сопряжения, % Interfacing success, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80

В работе неявным образом описано влияние параметра  $d_z$  на  $\theta_z$ , который был выведен из соображений протекания процесса сопряжения в начальные моменты времени. Особенности геометрических форм активной и пассивной частей устройства сопряжения обуславливают следующую закономерность: чем меньше  $d_z$ , тем больше допустимый диапазон для  $\theta_z$ . Однако в целях практического применения рекомендуется выбирать расчетный диапазон (6), при котором сопряжение будет потенциально успешным, что подтверждается результатами экспериментов.

Применение разработанного устройства сопряжения позволит создавать мобильные многофункциональные робототехнические платформы различного назначения, в том числе сельскохозяйственного, с возможностью автономной реконфигурации. Это даст возможность снизить вовлечение человека в эксплуатацию РС. Предложенное решение поможет расширить функционал базовой робототехнической платформы на произвольное число модулей и разместить их в практически любых местах платформы. Кроме того, свойство масштабирования устройства сопряжения позволит использовать модули с различными массогабаритными параметрами.

Представленная в данной работе структура устройства помогает реализовать обмен электрическими сигналами, что важно при информационном взаимодействии в распределенных системах управления РС модульной архитектуры [34-35].

**Выводы.** Создали прототип устройства сопряжения посредством формирования его структуры и определения расчетных соотношений. Выявили, что с помощью разработанного устройства возможно сопряжение модуля и базовой платформы при ограниченной точности взаимного позиционирования. При соблюдении заданных диапазонов допустимых осевых линейных отклонений и отклонений по углу между пассивной и активной частями устройства сопряжение проходит успешно в 98% и более случаев.

Дальнейшие исследования будут направлены на решение задач, связанных с конечным позиционированием базовой платформы относительно модуля и разработкой алгоритмов для оценки вероятности успешного сопряжения на основе сенсорной системы РС.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда: РНФ № 20-79-10325.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Chen I.-M., Yim M. Modular Robots. Springer Handbook of Robotics. 2016. 531-542.
- Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C. J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772.
- Yim M., Shen W.M., Salemi B., Rus D., Moll M., Lipson H., Chirikjian G.S. Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2007. N14(1). 43-52.
- Cantelli L., Bonaccorso F., Longo D., Melita C.D., Schillaci G., Muscato G. A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture. *AgriEngineering*. 2019. N1(3) 391-402.
- Tabile R.A., Godoy E.P., Pereira R.R., Tangerino G.T., Porto A.J., Inamasu R.Y. Projeto e desenvolvimento da arquitetura de um robô agrícola móvel. *Engenharia Agrícola*. 2011. N31(1). 130-142.
- Quaglia G., Visconte C., Scimmi L. S., Melchiorre M., Cavallone P., Pastorelli S. Robot arm and control architecture integration on a UGV for precision agriculture. *Advances in Mechanism and Machine Science*. 2019. 2339-2348.



7. Pecka A., Osadcuks V. Conceptual Design of Modular Multi Functional Agricultural Mobile Robot. *Research for rural development*. 2018. N1. 202-206.
8. Bawden O., Kulk J., Russell R., McCool C., English A., Dayoub F., Perez T. Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*. 2017. N34(6). 1179-1199.
9. Grimstad L., From P.J. Software components of the Thorvald II modular robot. *Modeling, Identification and Control*. 2018. N3. 157-165.
10. Grimstad L., From P.J. Thorvald II – a Modular and Re-configurable Agricultural Robot. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. N50(1). 4588-4593.
11. Grimstad L., From P.J. The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*. 2017. N6(4). 24.
12. Lee H.-Y., Murray C.C. Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. *International Journal of Production Research*. 2018. N57(18). 5821-5841.
13. Schulz T., Holthaus P., Amirabdollahian F., Koay K. L. Humans' perception of a robot moving using a slow in and slow out velocity profile. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. 2019. 594-595.
14. Chen Y., Leighton B., Zhu H., Ke X., Liu S., Zhao L. Sub-map-based indoor navigation system for the Fetch robot. *IEEE Access*. 2020. N8. 81479-81491.
15. Wise M., Ferguson M., King D., Diehr E., Dymesich D. Fetch and freight: Standard platforms for service robot applications. *Workshop on autonomous mobile service robots*. 2016.
16. Andreev V., Kim V. Control System and Design of the Motion Module of a Heterogeneous Modular Mobile Robot. *Annals of DAAAM & Proceedings*. 2016. N27. 0586-0594.
17. Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C. J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772.
18. Salemi B., Moll M., Shen W.M. SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2006. 3636-3641.
19. Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y., Eldershaw C., Homans S. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton Robot*. 2003. N14. 225-237.
20. Zhang T., Zhang W., Gupta M.M. An underactuated self-reconfigurable robot and the reconfiguration evolution. *Mechanism and Machine Theory*. 2018. N124. 248-258.
21. Liu Y., Wei R., Dong H., Zhu Y., Zhao J. A Designation of Modular Mobile Reconfigurable Platform System. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2020. N20(09). 2040006.
22. Sprowewitz A., Asadpour M., Bourquin Y., Ijspeert A.J. An active connection mechanism for modular self-reconfigurable robotic systems based on physical latching. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008. 3508-3513.
23. Sprowewitz A., Asadpour M., Billard A., Dillenbourg P., Ijspeert A. Roombots – modular robots for adaptive furniture. *IROS Workshop on Self-Reconfigurable Robots, Systems and Applications*. 2008.
24. Nielsen J., Lund H.H. Modular robotics as a tool for education and entertainment. *Computers in Human Behavior*. 2008. N24(2). 234-248.
25. Zykov V., Chan A., Lipson H. Molecubes: An open-source modular robotics kit. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2007. 3-6.
26. Zykov V., Phelps W., Lassabe N., Lipson H. Molecubes extended: Diversifying capabilities of open-source modular robotics. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2008. 22-26.
27. Zykov V., Mytilinaios E., Desnoyer M., Lipson H. Evolved and designed self-reproducing modular robotics. *IEEE Transactions on robotics*. 2007. N23(2). 308-319.
28. Romanishin J.W., Gilpin K., Rus D. M-Blocks: Momentum-Driven, Magnetic Modular Robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013. 4288-4295.
29. Lyder A., Stoy K., Garcíá R. F. M., Larsen J. C., Hermansen P. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics. *Intelligent Autonomous Systems*. 2012. 649-661.
30. Lyder A., Garcia R.F.M., Stoy K. Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008. 883-888.
31. Parrott C., Dodd T.J., Groß R. HiGen: A high-speed genderless mechanical connection mechanism with single-sided disconnect for self-reconfigurable modular robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. 3926-3932.
32. Jensen K., Nielsen S. H., Joergensen R. N., Boegild A., Jacobsen N. J., Joergensen O. J., Jaeger-Hansen C. L. A low cost, modular robotics tool carrier for precision agriculture research. *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture*. 2012.
33. White P.J., Kopanski K., Lipson H. Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. 2004. N3. 2888-2893.
34. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределенного управления в роботах с модульной архитектурой // *Труды СПИИРАН*. 2018. N57(2). С. 134-160.
35. Косенко В.В., Шаров В.В., Ценч Ю.С. Главные конструкторы Волгоградских тракторов. К 90-летию СТЗ-ВГТЗ // *История науки и техники*. 2020. N8. С. 85-97.



## REFERENCES

- Chen I.-M., Yim M. Modular Robots. Springer Handbook of Robotics. 2016. 531-542 (In English).
- Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C. J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772 (In English).
- Yim M., Shen W. M., Salemi B., Rus D., Moll M., Lipson H., Chirikjian G. S. Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2007. N14(1). 43-52 (In English).
- Cantelli L., Bonaccorso F., Longo D., Melita C. D., Schillaci G., Muscato G. A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture. *AgriEngineering*. 2019. N1(3) 391-402 (In English).
- Tabile R.A., Godoy E.P., Pereira R.R., Tangerino G.T., Porto A.J., Inamasu R.Y. Projeto e desenvolvimento da arquitetura de um robô agrícola móvel. *Engenharia Agrícola*. 2011. N31(1). 130-142 (In Spanish).
- Quaglia G., Visconte C., Scimmi L.S., Melchiorre M., Cavallone P., Pastorelli S. Robot arm and control architecture integration on a UGV for precision agriculture. *Advances in Mechanism and Machine Science*. 2019. 2339-2348 (In English).
- Pecka A., Osadcuks V. Conceptual Design of Modular Multi Functional Agricultural Mobile Robot. *Research for rural development*. 2018. N1. 202-206 (In English).
- Bawden O., Kulk J., Russell R., McCool C., English A., Dayoub F., Perez T. Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*. 2017. N34(6). 1179-1199 (In English).
- Grimstad L., From P.J. Software components of the Thorvald II modular robot. *Modeling, Identification and Control*. 2018. N3. 157-165 (In English).
- Grimstad L., From P.J. Thorvald II – a Modular and Re-configurable Agricultural Robot. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. N50(1). 4588-4593 (In English).
- Grimstad L., From P.J. The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*. 2017. N6(4). 24 (In English).
- Lee H.-Y., Murray C.C. Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems. *International Journal of Production Research*. 2018. N57(18). 5821-5841 (In English).
- Schulz T., Holthaus P., Amirabdollahian F., Koay K.L. Humans' perception of a robot moving using a slow in and slow out velocity profile. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. 2019. 594-595 (In English).
- Chen Y., Leighton B., Zhu H., Ke X., Liu S., Zhao L. Sub-map-based indoor navigation system for the Fetch robot. *IEEE Access*. 2020. N8. 81479-81491 (In English).
- Wise M., Ferguson M., King D., Diehr E., Dymesich D. Fetch and freight: Standard platforms for service robot applications. *Workshop on autonomous mobile service robots*. 2016 (In English).
- Andreev V., Kim V. Control System and Design of the Motion Module of a Heterogeneous Modular Mobile Robot. *Annals of DAAAM & Proceedings*. 2016. N27. 0586-0594 (In English).
- Yim M., Shirmohammadi B., Sastra J., Park M., Dugan M., Taylor C.J. Towards robotic self-reassembly after explosion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2007. 2767-2772 (In English).
- Salemi B., Moll M., Shen W.M. SUPERBOT: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2006. 3636-3641 (In English).
- Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y., Eldershaw C., Homans S. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton Robot*. 2003. N14. 225-237 (In English).
- Zhang T., Zhang W., Gupta M.M. An underactuated self-reconfigurable robot and the reconfiguration evolution. *Mechanism and Machine Theory*. 2018. N124. 248-258 (In English).
- Liu Y., Wei R., Dong H., Zhu Y., Zhao J. A Designation of Modular Mobile Reconfigurable Platform System. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2020. N20(09). 2040006 (In English).
- Sproewitz A., Asadpour M., Bourquin Y., Ijspeert A.J. An active connection mechanism for modular self-reconfigurable robotic systems based on physical latching. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008. 3508-3513 (In English).
- Sproewitz A., Asadpour M., Billard A., Dillenbourg P., Ijspeert A. Roombots – modular robots for adaptive furniture. *IROS Workshop on Self-Reconfigurable Robots, Systems and Applications*. 2008 (In English).
- Nielsen J., Lund H.H. Modular robotics as a tool for education and entertainment. *Computers in Human Behavior*. 2008. N24(2). 234-248 (In English).
- Zykov V., Chan A., Lipson H. Molecubes: An open-source modular robotics kit. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2007. 3-6 (In English).
- Zykov V., Phelps W., Lassabe N., Lipson H. Molecubes extended: Diversifying capabilities of open-source modular robotics. *IROS Self-Reconfigurable Robotics Workshop*. 2008. 22-26 (In English).
- Zykov V., Mytilinaios E., Desnoyer M., Lipson H. Evolved and designed self-reproducing modular robotics. *IEEE Transactions on robotics*. 2007. N23(2). 308-319 (In English).
- Romanishin J.W., Gilpin K., Rus D. M-Blocks: Momentum-Driven, Magnetic Modular Robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013. 4288-4295 (In English).
- Lyder A., Stoy K., Garcíá R. F. M., Larsen J. C., Hermansen P. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics. *Intelligent Autonomous Systems*. 2012. 649-661 (In English).
- Lyder A., Garcia R.F.M., Stoy K. Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008. 883-888 (In English).

31. Parrott C., Dodd T.J., Groß R. HiGen: A high-speed genderless mechanical connection mechanism with single-sided disconnect for self-reconfigurable modular robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. 3926-3932 (In English).
32. Jensen K., Nielsen S. H., Joergensen R. N., Boegild A., Jacobsen N. J., Joergensen O. J., Jaeger-Hansen C. L. A low cost, modular robotics tool carrier for precision agriculture research. *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture*. 2012 (In English).
33. White P.J., Kopanski K., Lipson H. Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. 2004. N3. 2888-2893 (In English).
34. Andreev V.P., Pletenev P.F. Metod informatsionnogo vzaimodeystviya dlya sistem raspredelennogo upravleniya v robotakh s modul'noy arkhitekturoy [Method of information interaction for distributed control systems of robots with modular architecture]. *Trudy SPIIRAN*. 2018. N57(2). 134-160 (In Russian).
35. Kosenko V.V., Sharov V.V., Tsench Yu.S. Glavnye konstruktory Volgogradskikh traktorov. K 90-letiyu STZ-VGTZ [Chief designers of Volgograd tractors. To the 90th anniversary of STZ-VGTZ]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2020. N8. C. 85-97 (In Russian).

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Заявленный вклад соавторов:**

Крестовников К.Д. – разработка конструктивно-кинематической схемы устройства, формирование общих выводов, проведение экспериментов.  
 Ерашов А.А. – разработка расчетных соотношений, литературный анализ, обработка результатов экспериментов.  
 Васюнина Ю.Г. – разработка конструктивно-кинематической схемы устройства, проектирование и реализация прототипа.  
 Савельев А.И. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, доработка текста.  
*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

**Coauthors' contribution:**

Krestovnikov K.D. – development of the device constructive-kinematic diagram, drawing general conclusions, conducting experiments.  
 Erashov A.A. – design ratios development, literature review, experiment results processing.  
 Vasyunina Yu.G. – the device constructive-kinematic diagram development, the prototype design and implementation.  
 Savel'ev A.I. – scientific supervision, overall research direction and planning, manuscript revision.  
*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
 The paper was accepted for publication on

01.02.2022  
 02.03.2022