

С. В. Манько, д-р техн. наук, проф., manko@mirea.ru, В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru,
Н. В. Крайнов, магистр, cpd@mirea.ru, А. Н. Малько, аспирант, malkorussia@gmail.com,
МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва

Алгоритмы интеллектуального управления реконфигурируемыми роботами в компоновке колеса и многоагентными системами на их основе

Проводится краткий анализ ключевых проблем развития мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой, оперативная реконфигурация которой осуществляется в автоматическом режиме в зависимости от особенностей выполняемой прикладной задачи и условий ее решения. Показано, что среди множества проблем развития мехатронно-модульных роботов такого типа одна из наиболее острых проблем связана с обеспечением функций внешнего осязания. Сформирован оригинальный подход к созданию перспективных образцов нового поколения реконфигурируемых робототехнических систем с расширенным набором сенсорных, моторно-двигательных и других свойств на основе комплексной интеграции мехатронно-модульных структур с ограниченным набором функциональных возможностей. Утверждается, что практическая реализация предложенного подхода допускает различные способы практического воплощения и, по существу, сводится к формированию многоагентной системы, объединяющей в единой компоновке взаимодействующие мехатронно-модульные структуры, движения которых должны быть синхронизированы. В качестве примера рассмотрены два принципиально различных варианта оснащения реконфигурируемого робота в компоновке колеса мехатронно-модульной шагающей "платформой", несущей средства технического зрения и способной перемещаться вдоль базовой кинематической структуры в противоход к ее движению. Разрабатываются алгоритмы автоматического формирования, реконфигурации и управления движением для мехатронно-модульных роботов в компоновке колеса с сенсорной шагающей платформой. Обсуждаются пути построения средств планирования поведения и координации взаимодействий автономных реконфигурируемых роботов с использованием механизмов доски объявлений. Приводятся результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования, подтверждающие работоспособность и эффективность представленных алгоритмов.

Ключевые слова: мехатронно-модульные реконфигурируемые роботы, многоагентные робототехнические системы, алгоритмы интеллектуального управления

Введение

Реконфигурируемые мехатронно-модульные роботы (РММР) представляют большой интерес для широкого спектра приложений. Актуальность тематики определяется возможностями разработки автономных робототехнических систем с уникальным набором свойств, включая многофункциональность, повышенную проходимость, надежность и самовосстанавливаемость, а также адаптивность кинематической структуры и ее реконфигурируемость в соответствии с особенностями текущей ситуации [1–4]. Создание перспективных образцов РММР сопряжено с необходимостью проведения исследований по целому ряду направлений, включая совершенствование конструкций типовых мехатронных модулей (ММ) и принципов построения интеллектуальных

систем управления с распределенной структурой, развитие средств и методов сетевой связи, самодиагностики и самообучения [2, 4–13]. Важнейшее место в этом ряду отводится вопросам интеграции мехатронно-модульных структур с ограниченным набором функциональных возможностей для формирования автономных роботов с расширенным спектром свойств, объединяемых в составе единой компоновки.

Развитие принципов построения реконфигурируемых мехатронно-модульных роботов на основе технологий группового управления

Среди множества проблем развития РММР одна из наиболее острых связана с обеспечением функций внешнего осязания. Попытки ее

решения, предпринятые в ряде разработок, привели к созданию специализированных ММ со встроенными средствами технического зрения (рис. 1, см. вторую сторону обложки) [3, 14, 15].

Естественно, что конструктивное исполнение ММ в каждом конкретном случае предусматривает те или иные способы их взаимного сопряжения с помощью стыковочных площадок. Тем не менее, наличие унифицированных интерфейсов отнюдь не всегда позволяет гарантировать возможность интеграции специализированного ММ с телекамерой в состав реконфигурируемых роботов даже для базовых компоновок (рис. 2). В связи с этим новые подходы к обеспечению адаптивных свойств и функциональных возможностей РММ представляют несомненный интерес.

Концепция создания реконфигурируемых робототехнических систем с расширенным набором сенсорных, моторно-двигательных и других свойств на основе комплексной интеграции мехатронно-модульных структур с ограниченным набором функциональных возможностей допускает различные способы своего практического воплощения.

Практическим подтверждением возможности реализации указанной концепции служат результаты исследований, которые проводятся в РТУ МИРЭА и наглядно иллюстрируются примером оснащения реконфигурируемого робота в компоновке колеса мехатронно-модульной шагающей "платформой", несущей средства технического зрения и способной перемещаться вдоль базовой кинематической структуры в противоход к ее движению. По существу, такой подход сводится к формиро-

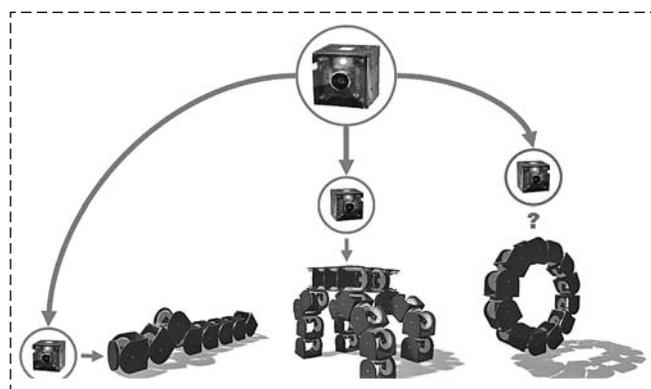


Рис. 2. Варианты размещения специализированного модуля со встроенной телекамерой в составе базовых компоновок реконфигурируемых роботов

Fig. 2. Options for placing a specialized module with built-in camera in the basic configurations of reconfigurable robots

ванию многоагентной системы с как минимум двумя взаимодействующими роботами, движения которых должны быть синхронизированы.

Алгоритмы интеллектуального управления многоагентной системой на базе реконфигурируемого робота в компоновке колеса с сенсорной шагающей платформой

Концептуальный облик многоагентной системы на базе РММР в компоновке колеса с сенсорной шагающей платформой показан на рис. 3 (см. вторую сторону обложки): общий вид представлен на рис. 3, а, конструкция и макетный образец типового мехатронного модуля, являющегося основным структурным элементом системы, показаны на рис. 3, б. Сенсорная шагающая платформа с двумя конечностями, виртуальная модель и кинематическая схема которой приведены на рис. 3, в, г, включает в свой состав специализированный модуль со встроенной системой технического зрения. Алгоритмическая реализация процесса поступательного движения РММР в компоновке колеса предполагает потактовую обработку каждым элементом замкнутой кинематической структуры того значения обобщенной координаты, которое соответствовало состоянию его предшественника в предыдущий момент времени.

При этом на контроллер каждого ММ возлагается ряд элементарных проверок, определяющих выбор необходимого значения обобщенной координаты:

$$\left. \begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } dir = 1 \text{ И } n \leq N - 1, \\ &\text{ТО } \varphi_n(t + 1) = \varphi_{n+1}(t); \\ &\text{ЕСЛИ } dir = 1 \text{ И } n = N, \\ &\text{ТО } \varphi_n(t + 1) = \varphi_1(t); \\ &\text{ЕСЛИ } dir = -1 \text{ И } 1 < n \leq N, \\ &\text{ТО } \varphi_n(t + 1) = \varphi_{n-1}(t); \\ &\text{ЕСЛИ } dir = -1 \text{ И } n = 1, \\ &\text{ТО } \varphi_n(t + 1) = \varphi_N(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $dir = (1, -1)$ — логическая переменная, определяющая прямое или обратное направления движения РММР в компоновке колеса; $n = (1, \dots, N)$ — порядковый номер ММ в составе кинематической цепи; $N \geq 6$ — общее число мехатронных модулей; $\varphi_n(t)$ — значение обобщенной координаты на такте t .

Анализ приведенного алгоритма показывает, что значение перемещения, совершаемого колесообразным роботом в течение одного такта, соответствует длине ММ. Эта особенность является принципиальной для разработки конструкции и алгоритма походки шагающей платформы, которая должна перемещаться вдоль кинематической цепи РММР в компоновке колеса. Значения обобщенных координат по ходу регулярного изменения положения конечностей шагающей платформы в процессе ее перемещения вдоль кинематической цепи движущегося в противоположном направлении "колеса" вычисляются из чисто геометрических соображений.

Будем считать, что реализуемая походка соответствует сценарию "приставного шага", а движение каждой из конечностей (состоящей из трех типовых ММ) осуществляется в течение одного такта. В этом случае продолжительность одного шага составляет два такта, за которые положение "колеса" изменится на расстояние $2L$, равное размеру двух ММ. Углы поворота сочле-

нений, обеспечивающие движение конечностей на очередном шаге, определяются параметрами равностороннего треугольника (рис. 4, см. третью сторону обложки) со сторонами, равными $2L$, и составляют $\alpha = 60^\circ$ и $\beta = 30^\circ$. Таким образом, алгоритм походки специализированной шагающей платформы может быть задан в виде последовательной смены состояний ее конечностей, показанной в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Алгоритм движения двуногой шагающей платформы с циклической сменой состояний конечностей
Movement algorithm of the bipedal walking platform with a cyclic change of states of the limbs

№ такта	t				$t + 1$				$t + 2$			
Состояние конечностей												
Модуль	1a	1b	2a	2b	1a	1b	2a	2b	1a	1b	2a	2b
Угол поворота	0°	0°	0°	0°	-30°	60°	30°	-60°	0°	0°	0°	0°

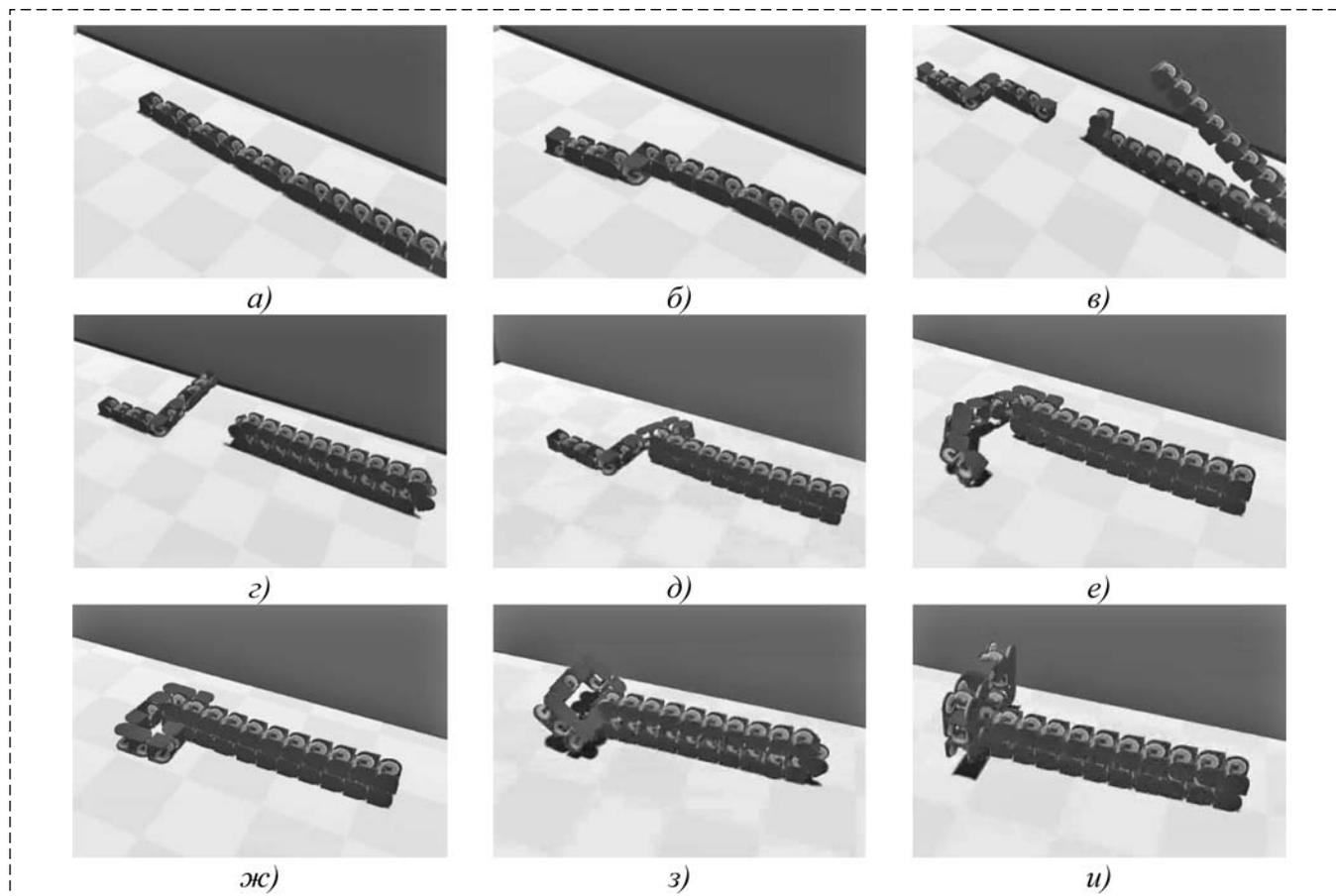


Рис. 5. Автоматическая трансформация мехатронно-модульного робота с переходом из линейной конфигурации в компоновку колеса с сенсорной шагающей платформой
Fig. 5. Automatic transformation of the mechatronic-modular robot from a linear configuration into composition of a wheel-configuration modular robot with walking sensory platform

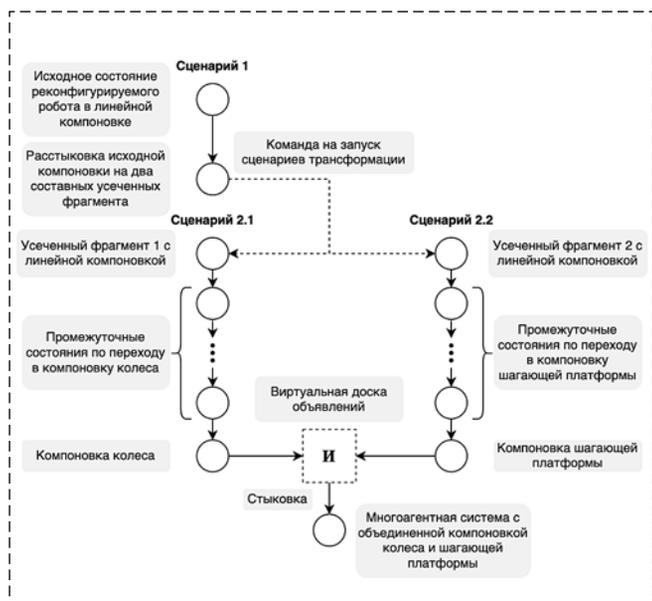


Рис. 6. Сценарные модели управления процессом автоматического формирования многоагентной системы с реконфигурируемыми роботами в компоновке колеса и сенсорной шагающей платформы

Fig. 6. Scenario models to control the process of automatic formation of the multi-agent system of a wheel-configuration modular robot with walking sensory platform

Ключевой аспект, определяющий целесообразность всей концепции создания РММР в компоновке колеса с сенсорной шагающей платформой, связан с автоматизацией процесса формирования такой системы. Один из способов ее автоматического синтеза предполагает разделение линейной мехатронно-модульной структуры на два фрагмента (рис. 5, а), поэтапно трансформируемых в конфигурации колеса и шагающей платформы (рис. 5, б— е), которые осуществляют взаимную стыковку (рис. 5, ж—и).

Сценарные модели управления процессом автоматического формирования многоагентной системы, объединяющей в своем составе два РММР — в компоновке колеса и сенсорной шагающей платформы, реализуются в виде соответствующих конечных автоматов, взаимодействие которых (рис. 6) обеспечивается привлечением механизмов доски объявлений для обмена данными о достижении необходимых состояний.

Модели и алгоритмы интеллектуального управления конфигурацией мехатронно-модульного робота в компоновке колеса

Адаптивные свойства автономного робота во многом определяются составом и эффек-

тивностью интеграции сенсорных, моторно-двигательных и поведенческих функций, реализуемых в его интеллектуальной системе управления. В связи с этим для мехатронно-модульного робота в компоновке колеса принципиально важным аспектом обеспечения адаптивности является возможность управления конфигурацией с учетом сенсорной информации об окружающей обстановке при движении в туннелях, катакомбах и т. д.

Примем для простоты, что мехатронно-модульная структура в компоновке колеса включает в свой состав четное число звеньев и имеет симметричную форму, определяемую углами φ и β , которые обеспечивают сопряжение боковых скатов и горизонтальных пролетов (рис. 7). Тогда, обозначив n_B и n_T — число модулей в боковых скатах и горизонтальных пролетах колеса соответственно, выражение для общего числа элементов структуры можно представить следующим образом:

$$N = 2M = 2(n_B + n_T), \quad (2)$$

где

$$M = n_B + n_T; n_B \geq 1, n_T \geq 1; \quad (3)$$

N — общее число модулей в составе кинематической структуры.

При этом значения обобщенных координат звеньев РММР в компоновке колеса должны определяться с учетом соответствующих ограничений:

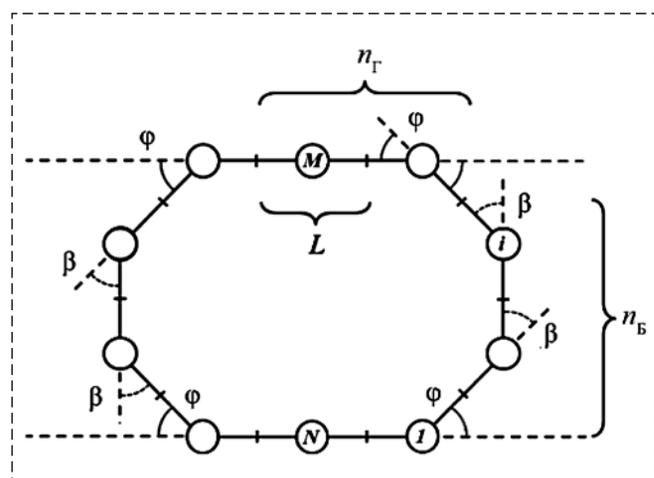


Рис. 7. Обобщенная кинематическая структура мехатронно-модульного робота в компоновке колеса

Fig. 7. Generalized kinematic structure of the mechatronic-modular robot in a wheel configuration

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{1Б} &= \varphi \text{ при } n_{Б} = 1; \\ \varphi_{1Б} &= \varphi \text{ и } \varphi_{n_{Б}} = 2\beta = 180^\circ - 2\varphi \text{ при } n_{Б} = 2; \\ \varphi_{1Б} &= \varphi, \varphi_{2Б} = \varphi_{n_{Б}} = \beta = 90^\circ - \varphi \text{ при } n_{Б} \geq 3; \\ \varphi_{3Б}, \dots, \varphi_{n_{Б}-1} &= 0^\circ \text{ при } n_{Б} > 3; \\ \sum_i^{n_{Б}} \varphi_{iБ} &= 180^\circ - \varphi; \\ \varphi_{1Г} &= \varphi; \varphi_{2Г}, \dots, \varphi_{n_{Г}} = 0^\circ \text{ при } n_{Г} > 1. \end{aligned} \right\} (4)$$

Очевидно, что конфигурация колесообразной компоновки будет характеризоваться распределением модулей между боковыми скатами и горизонтальными пролетами. Исходя из практических соображений (например, при оснащении мехатронно-модульного колеса шагающей платформой) протяженность горизонтального пролета $n_{Г}$ может быть ограничена заданным числом звеньев $n_{Г\min}$:

$$n_{Г\min} \leq n_{Г} \leq M - 1. \quad (5)$$

Это ограничение позволяет оценить возможные изменения числа звеньев в боковых скатах модульного колеса в ходе его трансформации:

$$1 \leq n_{Б} \leq M - n_{Г\min}. \quad (6)$$

В свою очередь, вертикальный размах мехатронно-модульного колеса определяется конфигурацией его бокового ската (рис. 8):

$$H = L(\sin \varphi_1 + \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \dots + \sin(\varphi_1 + \dots + \varphi_{n_{Б}})) = L \sum_{j=1}^{n_{Б}} \sin\left(\sum_{i=1}^j \varphi_i\right). \quad (7)$$

Выражение (7) может быть представлено в упрощенной форме:

$$H = (2 \sin \varphi + (n_{Б} - 2))L. \quad (8)$$

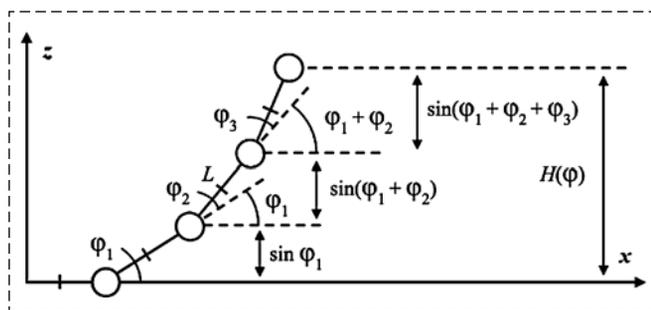


Рис. 8. Вычисление высоты бокового ската мехатронно-модульного робота в компоновке колеса
Fig. 8. Calculation of the side height for the mechatronic-modular robot in a wheel configuration

Решение уравнения (8) относительно числа звеньев в боковом скате модульного колеса с учетом ограничений (3)–(6) имеет следующий вид:

$$\text{ЕСЛИ } \text{Int}\left(\frac{H}{L}\right) < \frac{H}{L}, \text{ ТО}$$

$$n_{Б} = \begin{cases} \text{Int}\left(\frac{H}{L}\right) + 2 \text{ при } 0^\circ < \varphi < 30^\circ, \\ \text{Int}\left(\frac{H}{L}\right) + 1 \text{ при } \frac{H}{L} > 1, 30^\circ < \varphi < 90^\circ; \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{ЕСЛИ } \text{Int}\left(\frac{H}{L}\right) = \frac{H}{L}, \text{ ТО}$$

$$n_{Б} = \begin{cases} \text{Int}\left(\frac{H}{L}\right) + 1 \text{ при } \varphi = 30^\circ, \\ \text{Int}\left(\frac{H}{L}\right) \text{ при } \varphi = 90^\circ, \end{cases} \quad (10)$$

где $\text{Int}(x)$ — функция округления до меньшего целого.

Последующая реконфигурация кинематической структуры колеса предполагает пропорциональное перераспределение модулей в составе боковых скатов и горизонтальных пролетов, что наглядно иллюстрируется на примере, приведенном в табл. 2, 3 для 12-звенного об-

Таблица 2
Table 2

Возможные варианты конфигураций 12-звенного мехатронно-модульного робота в компоновке колеса
Possible configuration options for a 12-link mechatronic-modular robot in a wheel formation

1	2
3	4
5	6

Таблица 3
Table 3

Значения обобщенных координат для различных конфигураций 12-звенного мехатронно-модульного робота в компоновке колеса

Joint values for various configurations of a 12-link mechatronic-modular robot in a wheel formation

Конфигурация	Модуль											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	φ	φ	0°	0°	0°	0°	φ	φ	0°	0°	0°	0°
2	φ	2β	φ	0°	0°	0°	φ	2β	φ	0°	0°	0°
3	φ	β	β	φ	0°	0°	φ	β	β	φ	0°	0°
4	φ	β	0°	β	φ	0°	φ	β	0°	β	φ	0°
5	φ	β	0°	0	β	φ	φ	β	0°	0°	β	φ
6	φ	0°	0°	0°	0°	φ	φ	0°	0°	0°	0°	φ

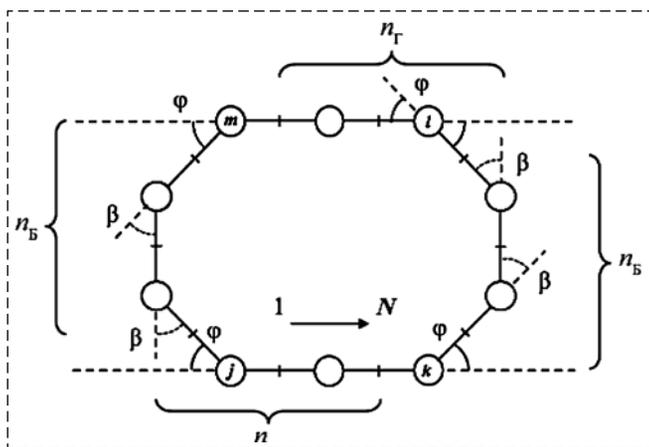


Рис. 9. Индексация модулей, разграничивающих боковые скаты и горизонтальные пролеты мехатронно-модульного колеса
Fig. 9. Indexing modules delimiting side slopes and horizontal spans of the mechatronic-modular robot in a wheel configuration

разца. Следует отметить, что, как показано на рис. 9, индексы модулей, обеспечивающих сопряжение боковых скатов и горизонтальных пролетов в составе каждой из половин замкнутой кинематической структуры модульного колеса (для рассматриваемого класса компонок), связаны следующими соотношениями:

$$l = \begin{cases} k + n_B & \text{при } (k + n_B) \leq N, \\ (k + n_B) - N & \text{при } (k + n_B) = N; \end{cases} \quad (11)$$

$$m = \begin{cases} l + n_T & \text{при } (l + n_T) \leq N, \\ (l + n_T) - N & \text{при } (l + n_T) = N; \end{cases} \quad (12)$$

$$j = \begin{cases} m + n_B & \text{при } (m + n_B) \leq N, \\ (m + n_B) - N & \text{при } (m + n_B) = N, \end{cases} \quad (13)$$

где k , m и l , j — индексы начальных звеньев боковых скатов и горизонтальных пролетов модульного колеса; k — индекс звена, ассоци-

ируемого с точкой отсчета и соответствующего первому боковому скату (по направлению возрастания индексации модулей вдоль замкнутой кинематической структуры).

Из анализа этих соотношений становится очевидным, что взаимосвязанное изменение числа модулей в составе боковых скатов n_B и горизонтальных пролетов n_T должно приводить к изменению индексов l и j , в то время как индекс m будет сохранять свое значение, что видно после подстановки (11) в (12) с учетом условия (3):

$$m = l + n_T = (k + n_B) + n_T = k + M. \quad (14)$$

Введение дискретного времени t позволяет представить алгоритм реконфигурации модульного колеса следующим набором правил:

$$\left. \begin{aligned} \text{ЕСЛИ } n_B(t) < n_B^{\text{зад}}, \text{ ТО} \\ n_B(t+1) &= n_B(t) + 1; \\ n_T(t+1) &= n_T(t) - 1; \\ l(t+1) &= l(t) + 1; \\ j(t+1) &= j(t) + 1; \\ \text{ЕСЛИ } l(t+1) &= N + 1, \text{ ТО } l(t+1) = 1; \\ \text{ЕСЛИ } j(t+1) &= N + 1, \text{ ТО } j(t+1) = 1; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ЕСЛИ } n_B(t) > n_B^{\text{зад}}, \text{ ТО} \\ n_B(t+1) &= n_B(t) - 1; \\ n_T(t+1) &= n_T(t) + 1; \\ l(t+1) &= l(t) - 1; \\ j(t+1) &= j(t) - 1; \\ \text{ЕСЛИ } l(t+1) &= -1, \text{ ТО } l(t+1) = N; \\ \text{ЕСЛИ } j(t+1) &= -1, \text{ ТО } j(t+1) = N, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $t = 0, 1, 2, \dots$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= \varphi_m = 90^\circ \text{ при } n_B = 1; \\ \varphi_k &= \varphi_m = \varphi \text{ и } \varphi_{k+1} = \varphi_{m+1} = 180^\circ - 2\varphi \\ &\text{при } n_B = 2; \\ \varphi_k &= \varphi_m = \varphi, \varphi_{k+1} = \varphi_{m+1} = \varphi_{l-1} = \varphi_{j-1} = \\ &= 90^\circ - \varphi \text{ при } n_B \geq 3; \\ \varphi_{k+2}, \dots, \varphi_{k+n_B-2} &= 0^\circ \text{ и } \varphi_{m+2}, \dots, \varphi_{m+n_B-2} = 0^\circ \\ &\text{при } n_B > 3; \\ \varphi_j &= \varphi_l = \varphi; \varphi_{l+1}, \dots, \varphi_{l+n_T-1} = \\ &= 0^\circ \text{ и } \varphi_{j+1}, \dots, \varphi_{j+n_T-1} = 0^\circ \text{ при } n_T > 1. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Таким образом, последовательная смена конфигураций робота в компоновке колеса будет сводиться к потактовому изменению индекса и обобщенных координат ММ, обеспечивающих сопряжение боковых скатов и

горизонтальных пролетов в соответствии с выражениями (15)— (17). Результаты модельных экспериментов (рис. 10, см. третью сторону обложки) полностью подтвердили эффективность алгоритмов интеллектуального управления и реконфигурации мехатронно-модульного робота в компоновке колеса с сенсорной шагающей платформой на примере задач преодоления препятствий типа "арка".

Алгоритмы интеллектуального управления многоагентной системой на базе реконфигурируемого робота в компоновке двухосевого колеса

Кинематическая схема и общий вид РММР в компоновке двухосевого колеса показаны на рис. 11. Ключевой принцип его построения предполагает объединение двух эквивалентных по своей структуре модульных колес, оси нормалей к плоскостям которых являются взаимно перпендикулярными, а точки сопряжения принадлежат общему диаметру.

С функциональной точки зрения главная отличительная особенность двухосевого колеса по отношению к одноосевому заключается в способности перемещения по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Движение такого робота, осуществляемое вдоль направления перемещения одного колеса, сопровождается вращением плоскости другого вокруг соответствующей оси (рис. 12, *a—d*, см. третью сторону обложки). При этом достижение плоскостью второго колеса вертикального состояния обеспечивает возможность смены направления движения робота (рис. 12, *e*). Важным является тот факт, что алгоритмы управления движением и

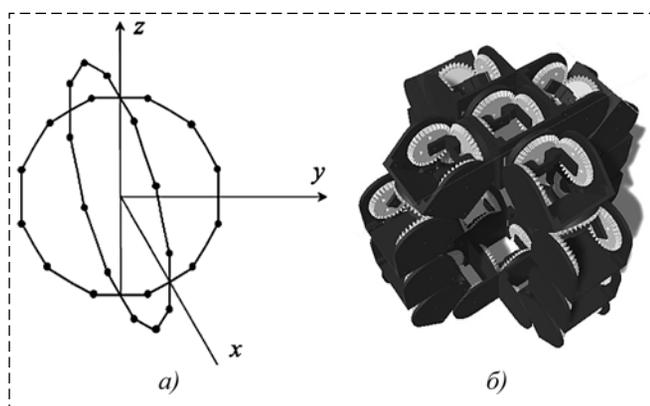


Рис. 11. Кинематическая схема (*a*) и виртуальная модель (*b*) двухосевого колеса

Fig. 11. Kinematic scheme (*a*) and virtual model (*b*) of a two-axis wheel

реконфигурацией двухосевого и одноосевого колес являются абсолютно идентичными.

Модульная структура реконфигурируемого робота с компоновкой двухосевого колеса допускает вариант его функционирования в качестве многоагентной системы. Состав такой системы образуется одноосевым колесом, в горизонтальных пролетах которого по боковым граням ММ перемещаются скаты второго колеса, выступающие в роли устройств шагающего типа. При движении многоагентной системы с подобной компоновкой шагающие боковые скаты сохраняют свою вертикальную ориентацию. Именно эта особенность обуславливает целесообразность использования специализированных ММ со встроенной системой технического зрения в качестве конструктивных элементов боковых скатов. В силу симметричности своего размещения встроенные телекамеры боковых скатов будут представлять стереопару, способную контролировать обстановку по ходу движения. Управление походкой бокового ската может быть основано на потактовом переключении состояний его концевых модулей, обеспечивающем стыковку и расстыковку каждого из них с верхним и нижним горизонтальными пролетами движущегося колеса, и может осуществляться в противофазе. Этап стыковки бокового ската с верхним горизонтальным пролетом мехатронно-модульного колеса показан на рис. 13, *a* (см. четвертую сторону обложки), этап одновременной стыковки и расстыковки бокового ската соответственно с нижним и верхним горизонтальными пролетами мехатронно-модульного колеса — на рис. 13, *b* (см. четвертую сторону обложки), а рис. 13, *b*, *z* (см. четвертую сторону обложки) иллюстрируют обработку очередных тактов перемещения мехатронно-модульного колеса.

Алгоритм переключения состояний концевых стыковочных модулей бокового ската и синхронизации его походки с движением одноосевого колеса может быть представлен с помощью набора продукционных правил или эквивалентного им конечного автомата, задаваемого табл. 4 переходов и выходов, где x_0 — исходное состояние автомата, отражающее соответствие текущей компоновки конфигурации двухосевого колеса; x_B, x_H — состояния автомата, отражающие стыковку бокового ската соответственно с верхним или нижним горизонтальными пролетами колеса; y_0 — выходной символ, подтверждающий переход автомата в состояние x_0 ; y_B, y_H — выходные символы,

Таблица 4
Table 4

Таблица переходов и выходов конечного автомата, определяющего алгоритм стыковки-расстыковки бокового ската с верхним и нижним горизонтальными пролетами движущегося колеса

Transition table of the state machine defining the docking-undocking algorithm of the side slope with the upper and lower horizontal spans of a moving wheel

Вход	Состояния		
	x_0	x_B	x_H
u_{Π}	x_B	x_H	x_B
u_3	x_0	x_0	x_0
Выход	y_0	y_B	y_H

подтверждающие переход автомата в состояния x_B , x_H и регламентирующие запуск очередного шага движения колеса. Диаграмма переходов состояний автомата, определяющего алгоритм походки бокового ската вдоль одноосевого колеса, показана на рис. 14.

На рис. 15 (см. четвертую сторону обложки), представлены фрагменты модельных экспериментов, подтверждающих работоспособность алгоритмов управления движением многоагентной робототехнической системы в компоновке двухосевого колеса.

Важной особенностью мехатронно-модульной системы с компоновкой двухосевого колеса является простота ее трансформации в кон-

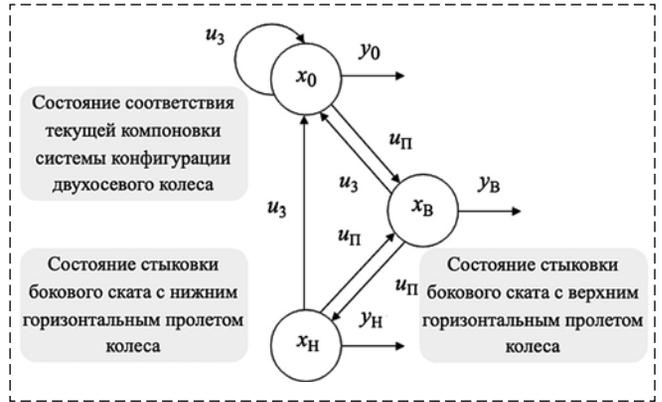


Рис. 14. Диаграмма переходов конечного автомата, определяющего алгоритм стыковки-расстыковки бокового ската с верхним и нижним горизонтальными пролетами движущегося колеса

Fig. 14. Transition diagram of the state machine defining the docking-undocking algorithm of the side slope with the upper and lower horizontal spans of a moving wheel

фигурацию шагающей платформы (рис. 16) (и наоборот) с потенциальной возможностью использования любой из опорных конечностей в качестве манипулятора.

В свою очередь, конфигурация шагающей платформы может быть сформирована путем поэтапного преобразования линейной мехатронно-модульной структуры с разомкнутой кинематической схемой, как показано на рис. 17. Взаимная интеграция этих двух сценариев позволяет обеспечить автоматическое формирование компоновки двухосевого колеса.

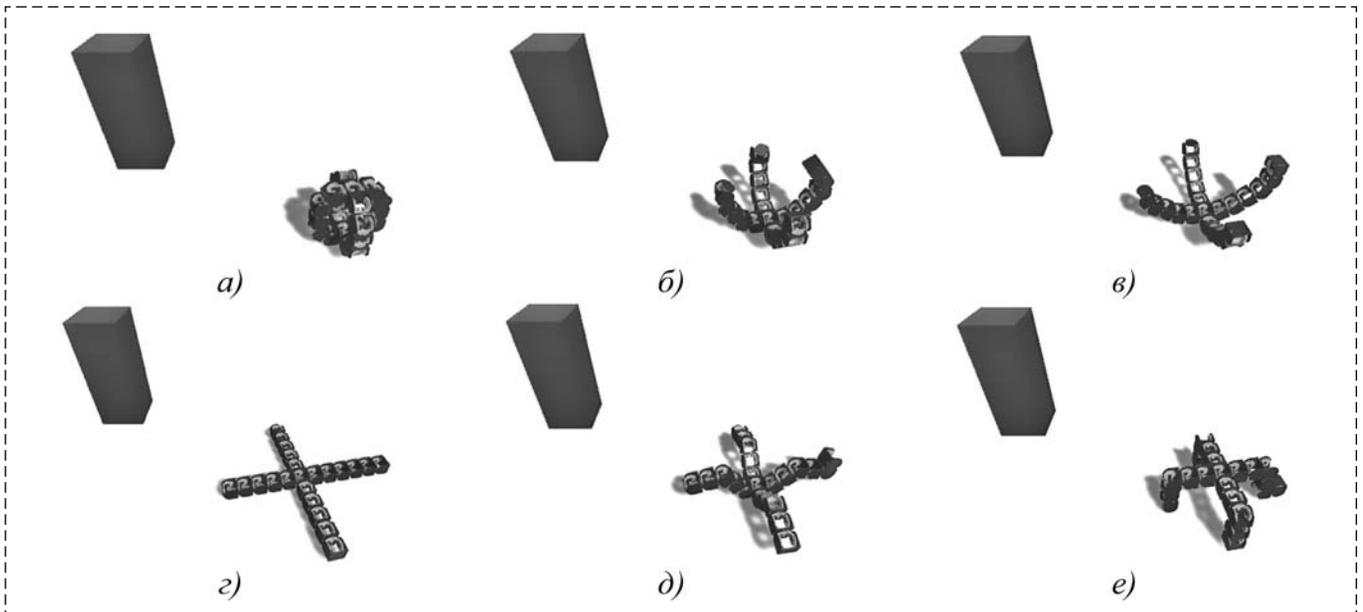


Рис. 16. Фрагменты моделирования процесса автоматической трансформации мехатронно модульной системы с компоновкой двухосевого колеса в конфигурацию шагающей платформы

Fig. 16. Simulation fragments of the automatic transformation process of the mechatronic-modular system from the two-axis wheel configuration to the configuration of a walking platform

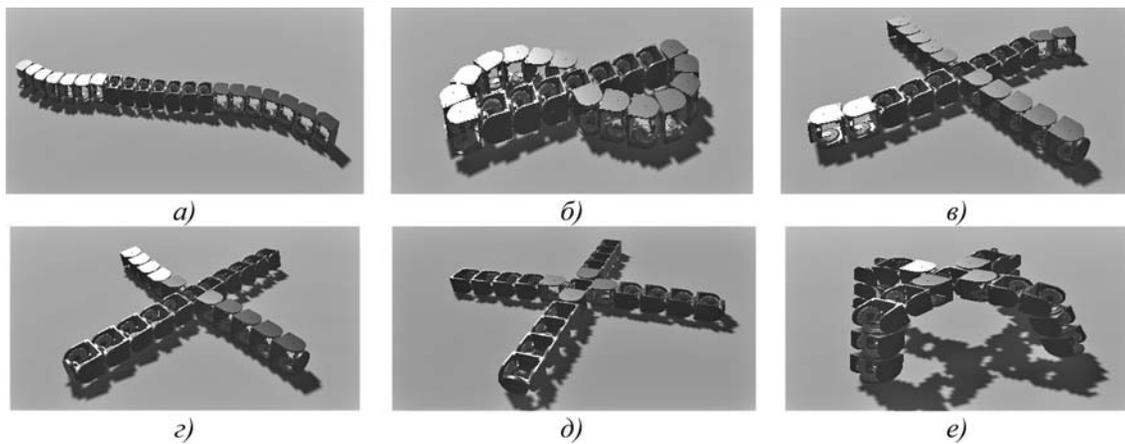


Рис. 17. Поэтапное преобразование линейной мехатронно-модульной структуры с разомкнутой кинематической схемой в конфигурацию шагающей платформы

Fig. 17. Step-by-step transformation from the linear mechatronic-modular structure with an open-loop kinematic to the configuration of a walking platform

Заклучение

В статье предложен оригинальный подход к созданию реконфигурируемых робототехнических систем с расширенным набором сенсорных, моторно-двигательных и других свойств на основе комплексной интеграции мехатронно-модульных структур с ограниченным набором функциональных возможностей. Показано, что его практическая реализация допускает различные способы своего практического воплощения и, по существу, сводится к формированию многоагентной системы, объединяющей в единой компоновке взаимодействующие мехатронно-модульные структуры, движения которых должны быть синхронизированы. В качестве примера приводятся варианты оснащения реконфигурируемого робота в компоновке колеса мехатронно-модульной шагающей "платформой", несущей средства технического зрения и способной перемещаться вдоль базовой кинематической структуры в противоход к ее движению. Разработанные алгоритмы обеспечивают решение задач автоматического формирования, реконфигурации и управления движением для обоих мехатронно-модульных компоновок.

Список литературы

1. Yim M., Shen W. M., Salemi B., Rus D., Moll M., Lipson H., Klavins E., Chirikjian G. S. Modular self-reconfigurable robot systems: challenges and opportunities for the future // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2007. Vol. 14. P. 43–52.
2. Ahmadzadeh H., Masehian E., Asadpour M. Modular robotic systems: Characteristics and applications // *J. Intell. Robot. Syst.* 2016. Vol. 81. P. 317–357.
3. Yim M., White P., Park M., Sastra J. *Modular Self-Reconfigurable Robots* // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer: New York, NY, USA, 2009. P. 5618–5631.

4. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В. и др. Технологии обработки знаний в задачах управления автономными мехатронно-модульными реконфигурируемыми роботами // Приложение к журналу Информационные технологии. 2010. № 8. 32 с.

5. Saab W., Racioppo P., Ben-Tzvi P. A review of coupling mechanism designs for modular reconfigurable robots // *Robotica*. 2019. Vol. 37, N. 2. P. 378–403.

6. Yoshida E., Murata S., Kamimura A., Tomita K. Self-Reconfigurable Modular Robots-Hardware and Software Development in AIST // *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*. Hunan, China (2003). P. 339–346.

7. Wei H., Li D., Tan J., Wang T. The Distributed Control and Experiments of Directional Self-Assembly for Modular Swarm Robots // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Taipei, Taiwan, 2010. P. 4169–4174.

8. Fitch R., McAllister R. Hierarchical Planning for Self-reconfiguring Robots Using Module Kinematics // *Distributed autonomous robotic systems – the 10th international symposium. DARS 2010. Lausanne, Switzerland, November 1–3. 2010. Vol. 83. Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer, Berlin. P. 477–490.

9. Fitch R., Rus D., Vona M. A basis for self-repair robots using self-reconfiguring crystal modules // *Intell. Auton. Syst.* 2000. Vol. 6. P. 903–910.

10. Yoshida E., Murata S., Kamimura A., Tomita K., Kurokawa H., Kokaji S. Evolutionary Motion Synthesis for a Modular Robot using Genetic Algorithm // *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2003. Vol. 15, N. 2. P. 227–237.

11. Манько С. В., Шестаков Е. И. Автоматический синтез сценариев походки реконфигурируемых мехатронно-модульных роботов в модификации шагающей платформы // *Российский технологический журнал*. 2018. Т. 6, № 4. С. 26–41.

12. Kuo V., Fitch R. C. Scalable multi-radio communication in modular robots // *Robotics Auton. Syst.* 2014. Vol. 62. P. 1034–1046.

13. Möckel R., Jaquier C., Drapel K., Dittrich E., Upegui A., Ijspeert A. J. YaMoR and Bluemove – An Autonomous Modular Robot with Bluetooth Interface for Exploring Adaptive Locomotion // *Proc. 8th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2005)*. P. 685–692.

14. Shirmohammadi B., Yim M., Sastra J., Park M., Taylor C. J. Using Smart Cameras to Localize Self-Assembling Modular Robots // *Proc. ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras*. 2007. Vienna, Austria, P. 76–80.

15. Parrott C. *A Hybrid and Extendable Self-Reconfigurable Modular Robotic System*. PhD thesis, University of Sheffield, 2016. 168 p.

Algorithms for Intelligent Control of Reconfigurable Robots in a Wheel Configuration and Multi-Agent Systems Based on them

S. V. Manko, manko@mirea.ru, V. M. Lokhin, cpd@mirea.ru,
N. V. Kraynov, cpd@mirea.ru, A. N. Malko, malkorussia@gmail.com,
MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Malko Alexey N.**, PhD Student,
MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation,
e-mail: malkorussia@gmail.com

Accepted on April 04, 2022

Abstract

The article provides a brief analysis of the key challenges in the development of mechatronic-modular robots with adaptive kinematic structure, which operational reconfiguration is performed in an automatic mode, depending on the characteristics of the problem and conditions for its solution. It is shown that among the many problems in the development of such robots, one of the most important is in the provision of external sensory functions. The original approach is proposed to create promising samples of the new generation reconfigurable robotic systems with expanded capabilities in sensory, locomotor and other functions based on a complex integration of the mechatronic-modular structures of limited functionality. It is claimed that practical implementation of the proposed approach allows for various ways of its physical implementation and essentially boils down to formation of the multiagent system that combines interacting mechatronic-modular structures, whose movement must be synchronized, in a single composition. As an example, two fundamentally different equipment options of the wheel-configuration modular robot with mechatronic-modular walking "platform" carrying technical vision and being able to move in the opposite to the wheel rotation direction are considered. The algorithms for automatic formation, reconfiguration and motion control for a wheel-configuration mechatronic-modular robot with walking sensory platform are being developed. The approaches of using bulletin board mechanisms to develop the means of behavior planning and interaction coordination of the autonomous self-reconfigurable robots are being discussed. The results of experimental research and computer simulation are presented, confirming the efficiency of the presented algorithms.

Keywords: mechatronic modular self-reconfigurable robots, multi-agent robotic systems, intelligent control algorithms

For citation:

Manko S. V., Lokhin V. M., Kraynov N. V., Malko A. N. Algorithms for Intelligent Control of Reconfigurable Robots in a Wheel Configuration and Multi-Agent Systems Based on them, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 8, pp. 420–429.

DOI: 10.17587/mau.23.420-429

References

1. Yim M., Shen W. M., Salemi B., Rus D., Moll M., Lipson H., Klavins E., Chirikjian G. S. Modular self-reconfigurable robot systems: challenges and opportunities for the future, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14, 2007, pp. 43–52.
2. Ahmadzadeh H., Masehian E., Asadpour M. Modular robotic systems: Characteristics and applications, *J. Intell. Robot. Syst.*, 2016, vol. 81, pp. 317–357.
3. Yim M., White P., Park M., Sastra J. Modular Self-Reconfigurable Robots, *In Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, New York, NY, USA, 2009, pp. 5618–5631.
4. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V. et al. The Knowledge Processing Technologies in an Autonomous Modular Mechatronic Configurable Robot's Control System, *Information Technologies magazine supplement*, 2010, no. 8, 32 p. (in Russian).
5. Saab W., Racioppo P., Ben-Tzvi P. A review of coupling mechanism designs for modular reconfigurable robots, *Robotica*, 2019, vol. 37, no. 2, pp. 378–403.
6. Yoshida E., Murata S., Kamimura A., Tomita K. Self-Reconfigurable Modular Robots—Hardware and Software Development in AIST, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, Hunan, China (2003), pp. 339–346.
7. Wei H., Li D., Tan J., Wang T. The Distributed Control and Experiments of Directional Self-Assembly for Modular Swarm Robots, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 4169–4174.
8. Fitch R., McAllister R. Hierarchical Planning for Self-reconfiguring Robots Using Module Kinematics, *Distributed autonomous robotic systems — the 10th international symposium, DARS 2010*, Lausanne, Switzerland, November 1–3, 2010, vol. 83 of Springer Tracts in Advanced Robotics, Springer, Berlin, pp. 477–490.
9. Fitch R., Rus D., Vona M. A basis for self-repair robots using self-reconfiguring crystal modules, *Intell. Auton. Syst.*, 2000, vol. 6, pp. 903–910.
10. Yoshida E., Murata S., Kamimura A., Tomita K., Kurokawa H., Kokaji S. Evolutionary Motion Synthesis for a Modular Robot using Genetic Algorithm, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2003, vol. 15, no. 2, pp. 227–237.
11. Manko S. V., Shestakov E. I. Automatic synthesis of gait scenarios for reconfigurable mechatronic modular robots in the modification of the walking platform, *Russian Technological Journal*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 26–41 (in Russian).
12. Kuo V., Fitch R. C. Scalable multi-radio communication in modular robots, *Robotics Auton. Syst.*, 2014, vol. 62, pp. 1034–1046.
13. Möckel R., Jaquier C., Drapel K., Dittrich E., Upegui A., Ijspeert A. J. YaMoR and Bluemove — An Autonomous Modular Robot with Bluetooth Interface for Exploring Adaptive Locomotion, *Proc. 8th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2005)*, 2005, pp. 685–692.
14. Shirmohammadi B., Yim M., Sastra J., Park M., Taylor C. J. Using Smart Cameras to Localize Self-Assembling Modular Robots, *Proc. ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras*, 2007, Vienna, Austria, pp. 76–80.
15. Parrott C. A Hybrid and Extendable Self-Reconfigurable Modular Robotic System. PhD thesis, University of Sheffield, 2016. 168 p.