

**Сергеев Николай Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: nesergeev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371550; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

**Мунтян Евгения Ростиславна** – e-mail: ermuntyan@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; старший преподаватель.

**Самойлов Алексей Николаевич** – e-mail: asamoylov@sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

**Целых Алексей Александрович** – e-mail: tselykh@sfedu.ru; тел.: +7863431743; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; к.т.н.; доцент.

**Sergeev Nikolai Evgenievich** – Southern Federal University; e-mail: nesergeev@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371550; the department of computer engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Muntyan Evgenia Rostislavna** – e-mail: ermuntyan@sfedu.ru; the department of computer engineering; senior lecturer.

**Samoylov Alexey Nikolaevich** – e-mail: asamoylov@sfedu.ru; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Tselykh Alexey Alexandrovich** – e-mail: tselykh@sfedu.ru; phone: +7863431743; the department of information security systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК. 681.51

DOI 10.23683/2311-3103-2017-3-121-130

**А.А. Скляр, Т.Е. Похилина**

### **СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ НА КОЛЕСАХ ИЛОНА\***

*Демонстрируется новый подход к нелинейному управлению мобильной робототехнической платформой на колесах Илона. В качестве объекта управления выбран мобильный робот на колесах Илона, так как среди прочих наземных транспортных средств он является наиболее маневренным и предназначенным для работы в условиях ограниченного пространства, рассчитан на выполнение задач в складских помещениях. Платформа имеет форму треугольника, так как колеса расположены под углом 120 градусов, оси которых проходят через центр транспортного средства, что позволяет данной конструкции перемещать грузы в ограниченном пространстве. Для учета нелинейных характеристик объекта управления в статье рассмотрены вопросы анализа математической модели мобильной робототехнической платформой на колесах Илона. Также, приводится обзор современных методов и подходов к управлению робототехнической платформой на колесах Илона. Выделяются проблемы управления Платформой, в частности, применение методов и подходов основанных на применении методов линеаризации системы, что делает робототехническую систему с данными законами управления ограниченной определенными локальными алгоритмами управления. Поэтому в работе приводится обоснование использования новых нелинейных подходов к управлению мобильными роботами, в частности синергетической теории управления. Основным методом, в рамках данной теории, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который позволяет синтезировать законы управления для сложных нелинейных систем большой размерности без применения процедур линеаризации или других упрощений, поэтому для синтеза синергетического закона управления мобильного робота применяется именно этот метод. Полученный закон пространственного управления учитывает нелинейные свойства модели мобильной робототехнической платформы на колесах Илона, поэтому*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-08-00875А).

*указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы, и четкое исполнение заданных инвариантов. Для апробации полученной системы используется компьютерное моделирование. Результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления мобильным роботом на колесах Илона обеспечивается передвижение к заданной точке рабочей плоскости с заданным углом ориентации платформы.*

*Робототехническая платформа; колеса Илона; мобильный робот; синергетическая теория управления; всенаправленное движение.*

**A.A. Sklyarov, T.E. Pohilina**

### **THE NONLINEAR CONTROL SYSTEM DESIGN FOR ROBOTIC OMNI-WHEEL DRIVE PLATFORM**

*This paper presents a new approach to the nonlinear control system design for robotic omni-wheel drive platform. The omni-wheel drive platform is chosen as controlled object because among the others this type of unmanned vehicle is the most maneuverable, designed to work in closed spaces such as warehouses, hangars and etc. The platform has the shape of a triangle. The wheels of platform are located at an angle of 120 degrees, whose axes pass through the center of the vehicle. The design allows moving loads in a closed space. The paper gives an overview of modern methods and approaches to the control of the omni-wheels robotic platform. The problems of platform control are highlighted; in particular showed is that the application of methods and approaches based on linearization methods of the nonlinear system makes the robotic system limited to certain local control algorithms. Therefore, the paper provides an explanation of using new non-linear approaches to the management of mobile robots, in particular, the synergetic control theory. The main method of the synergetic control theory is the method of analytical construction of aggregated regulators (ACAR), which allows synthesizing control laws for complex nonlinear systems of large dimension without the use of linearization procedures or other simplifications; therefore, this method is used to synthesize the synergetic control law of a mobile robot. The resulting control law takes into account the non-linear properties of the model of the mobile omni-wheels robotic platform, so this control strategy ensures the asymptotic stability of the close-loop system. The verification of the obtained system was made by computer simulation. The simulation results confirm that in the synthesized close-loop system, movement of the mobile robot to a given point of the working plane with a given orientation angle of the platform is provided.*

*Robotic platform; Omni-wheel drive; Mobile robot; Synergetic control theory; Omni-directional movement.*

**Введение.** Возможность двигаться в любом направлении является несомненным преимуществом для любого наземного транспортного средства, в особенности если решается задача маневрирования в пределах ограниченных складских помещений. К таким транспортным средствам можно отнести вилочные погрузчики, платформы для поддержки и обслуживания авиационной техники, моторизованные тележки и грузовики. Возможность передвигаться в любом направлении на плоскости без изменения ориентации корпуса транспортного средства позволила приобрести широкую популярность мобильным роботам на колесах Илона [1–6]. Так одной из самых известных компаний, разрабатывающих и внедряющих робототехнические платформы на колесах Илона, является фирма KUKA [6]. Конструкция и особенности движения подобных роботов дают ряд преимуществ [2]. За счет особенного строения колес Илона, мобильный робот имеет возможность в любой момент времени изменить направление движения на новый заданный угол без осуществления дополнительного разворота для выхода на новую траекторию [2]. Также поступательное движение можно сочетать с вращательным, так что робот будет подъезжать к месту назначения под заданным углом [3].

Основная идея движения мобильного транспортного робота на колесах Илона заключается в следующем: поступательное движение робота оптимально совершать тем колесом, ось вращения которого образует наибольший угол с заданным направлением движения, а колесо, которое образует наименьший угол, будет целесообразно остановить, т.к. его влияние на движение робота не значительно. Чтобы достичь минимального сопротивления на периферии колеса устанавливаются ролики, направление вращения которых перпендикулярно направлению движения колеса. На рис. 1 и 2 представлены примеры колеса Илона и всенаправленной трехколесной платформы, соответственно.



Рис. 1. Пример колеса Илона



Рис. 2. Трехколесный всенаправленный робот

В настоящее время большое количество работ посвящено исследованию динамики колесных роботов [7–14]. В частности, рассматриваются преимущества различных видов конструкций, количества и типов колес, а также их кинематических моделей [9]. В частности, задачи оптимального планирования траектории предложены в работах [10] и [11]. В [12] на основе линейной модели построены пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы (ПИД-регуляторы) для управления движением центра масс и ориентацией платформы робота. В [13] построены ПИ и ПД регуляторы для управления скоростью платформы и углом ее поворота. В [14] построены нелинейные динамические модели робота и разработаны интегральные управления на основе метода линеаризации системы вдоль заданной траектории.

Однако в большинстве рассмотренных работ, в частности основанных на применении методов линеаризации системы [12–14], учетом нелинейных свойств системы пренебрегают, что делает робототехническую систему с данными законами управления ограниченной определенным конечным множеством рабочих ситуаций. Данный факт объясняется сложностью математических моделей мобильных роботов на колесах Илона – большим количеством нелинейных составляющих и высоким порядком уравнений, описывающих динамику их движения в пространстве. Поэтому, в настоящее время, существует необходимость создания системы управления мобильным роботом на колесах Илона, которая бы учитывала нелинейные свойства объекта управления для повышения устойчивости системы в рамках доступных режимов функционирования.

**Цель управления.** В настоящее время, для решения задач синтеза законов нелинейного управления объектами высокой размерности, применяется синергетическая теория управления (СТУ) [15], разработанная профессором А.А. Колесниковым. Основным методом, в рамках данной теории, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который позволяет синтезировать законы управления для сложных нелинейных систем большой раз-

мерности без применения процедур линеаризации или других упрощений. Основная идея СТУ заключается в том, что управление системой должно быть организовано таким образом, чтобы в пространстве состояний системы образовывались предельные множества – аттракторы, отвечающие целям функционирования, т.е. обеспечивали необходимое поведение системы [15]. Синергетический подход базируется на таких понятиях как принцип инвариантности и принцип расширения – сжатия фазового объема в диссипативных динамических системах, к которым, в частности, относятся мильные роботы. Поэтому для синтеза нелинейного закона управления мобильной робототехнической платформой на колесах Илона в статье предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления, в частности метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов.

**Математическая модель всенаправленной платформы.** В качестве объекта управления в статье рассматривается трехколесный робот на колесах Илона (рис. 3), который имеет треугольную форму, при этом колеса расположены под углом 120 градусов, оси которых проходят через центр платформы.

Описание динамики и кинематики мобильного робота можно найти в работах [16–24]. Для создания заданного движения мобильным роботом на колесах Илона необходимо управлять скоростью вращения каждого исполнительного привода. Для оптимизации работы приводов мобильного робота необходимо принять во внимание следующие особенности:

- ♦ для заданного движения мобильного робота на колесах Илона необходимо выдерживать определенное соотношение угловых скоростей приводов, при этом для увеличения общей скорости необходимо прямо пропорционально увеличивать угловые скорости приводов[
- ♦ для колеса Илона, вращающегося с определенной скоростью, необходимо добавлять или вычитать поровну скорости каждого привода;
- ♦ исполнительные приводы мобильного робота ограничены физическими свойствами обмоток ротора, поэтому при формировании управляющего воздействия необходимо убедиться, что они не работают на пределе своей мощности.

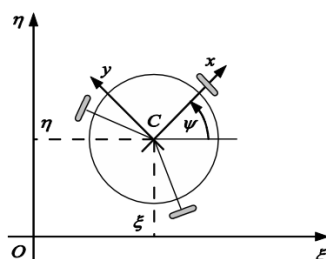


Рис. 3. Схема движения мобильного робота на колесах Илона

Для решения задачи синтеза закона управления в статье используется метод АКАР [15, 25]. В данном методе цели задачи управления выступают в виде инвариантных многообразий, а учет нелинейной динамики системы достигается путем применения асимптотического перехода от одного инвариантного многообразия к другому с последовательным понижением размерности многообразий. При таком подходе к задаче управления нет необходимости строгого соответствия параметров реального объекта параметрам заложенной в регулятор модели, нужно лишь обеспечить попадание замкнутой системы в область притяжения инвариантных многообразий, на которых, в свою очередь, поддерживается желаемое конечное состояние объекта управления.

В данной работе инвариантные многообразия выбираются таким образом, чтобы достичь желаемого режима движения мобильного робота на колесах Илона. Поэтому основная задача синтеза состоит в том, чтобы подобрать такие законы управления, которые обеспечат переход системы из начального состояния в окрестность инвариантного многообразия  $\Psi(x) = 0$ , а затем их дальнейшее устойчивое движение вдоль инвариантных многообразий вплоть до попадания на аттракторы.

Для решения задачи методом АКАР запишем математическую модель мобильного робота на колесах Илона в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \frac{\sin x_6 u_1 + \sin(x_6 + k_1)u_2 + \sin(x_6 + k_2)u_3 - hx_1 - m_d x_3 x_2}{m}, \\ \dot{x}_2(t) = \frac{-\cos x_6 u_1 - \cos(x_6 + k_1)u_2 - \cos(x_6 + k_2)u_3 - hx_2 + m_d x_3 x_1}{m}, \\ \dot{x}_3(t) = \frac{-a(u_1 + u_2 + u_3) - 2a^2 h x_3}{I}, \\ \dot{x}_4(t) = x_1, \\ \dot{x}_5(t) = x_2, \\ \dot{x}_6(t) = x_3. \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_1$  – линейная скорость мобильного робота по координате  $\xi$ ;  $x_2$  – линейная скорость мобильного робота по координате  $\eta$ ;  $x_3$  – угловая скорость мобильного робота;  $x_4$  – координата  $\xi$  рабочей плоскости робота;  $x_5$  – координата  $\eta$  рабочей плоскости робота;  $x_6$  – угол  $\Psi$  ориентации мобильного робота,  $m$  – масса робота,  $I$  – момент инерции робота,  $m_d$  – составляющая массо-инерционных параметров системы,  $a$  – расстояние от центра платформы до центра каждого колеса,  $k_1$  и  $k_2$  – конструктивные коэффициенты мобильного робота  $\left(k_1 = \frac{2\pi}{3}, k_2 = \frac{4\pi}{3}\right)$ .

**Задача синтеза регулятора.** Требуется найти такой вектор управляющих воздействий, который бы позволил осуществить движение мобильного робота на колесах Илона в заданные координаты рабочей плоскости  $x_4 = x_4^*$ ,  $x_5 = x_5^*$  с заданным углом ориентации  $x_6 = x_6^*$ .

Поскольку модель объекта содержит три канала управления, то в соответствии с СТУ необходимо использовать синтез векторных регуляторов на основе параллельно-последовательной совокупности инвариантных многообразий [15, 25]. Для решения данной задачи необходимо ввести следующие макропеременные:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= x_1 - \varphi_1, \\ \Psi_2 &= x_2 - \varphi_2, \\ \Psi_3 &= x_3 - \varphi_3. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  – внутренние управления. Таким образом первая совокупность инвариантных многообразий будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= x_1 - \varphi_1 = 0, \\ \psi_2 &= x_2 - \varphi_2 = 0, \\ \psi_3 &= x_3 - \varphi_3 = 0.\end{aligned}\tag{3}$$

На пересечении инвариантных многообразий (3) можно наблюдать эффект динамического «сжатия» фазового пространства или декомпозиция системы. При условии выполнения инвариантного соотношения (3) декомпозированная модель исходной системы (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}x_4 &= \varphi_1, \\ x_5 &= \varphi_2, \\ x_6 &= \varphi_3.\end{aligned}\tag{4}$$

Согласно методу АКАР для системы уравнений (4) введем следующие макропеременные:

$$\begin{aligned}\psi_4 &= x_4 - x_4^*, \\ \psi_5 &= x_5 - x_5^*, \\ \psi_6 &= x_6 - x_6^*,\end{aligned}\tag{5}$$

где  $x_4^*$  – желаемое положение по координате  $\xi$ ,  $x_5^*$  – желаемое положение по координате  $\eta$ ,  $x_6^*$  – желаемый угол поворота робота вокруг своей оси.

Макропеременные (5) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений:

$$\begin{aligned}T_1\dot{\psi}_1(t) + \psi_1 &= 0, \\ T_2\dot{\psi}_2(t) + \psi_2 &= 0, \\ T_3\dot{\psi}_3(t) + \psi_3 &= 0.\end{aligned}\tag{6}$$

где  $T_1, T_2, T_3$  – некоторые положительные константы, влияющие на скорость переходных процессов системы.

Макропеременные (4) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений:

$$\begin{aligned}T_4\dot{\psi}_4(t) + \psi_4 &= 0, \\ T_5\dot{\psi}_5(t) + \psi_5 &= 0, \\ T_6\dot{\psi}_6(t) + \psi_6 &= 0.\end{aligned}\tag{7}$$

где  $T_4, T_5, T_6$  – некоторые положительные константы.

После нахождения внутреннего управления системы  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , можно найти внешнее управление системы.

**Компьютерное моделирование.** Проведем компьютерное исследование синтезированной замкнутой системы управления мобильной робототехнической платформой на колесах Илона. Параметры платформы представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры синтезированного регулятора**

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Масса мобильной платформы	$m$	кг	20
Составляющая массо-инерционных параметров системы	$m_d$	кг	3
Расстояние от центра платформы до центра каждого колеса	$a$	м	0,2
Постоянная, определяемая коэффициентом момента противоэлектродвижущей силы	$h$	Н·с/м	1,6

Моделирование проводится с помощью математического пакета MATLAB. Зададим целевые координаты мобильной робототехнической платформы на колесах Илона следующим образом:  $x_4 = 1$  м,  $x_5 = 2$  м, и угол ориентации  $x_6 = 0$  рад. В качестве начальных условий системы выбираются  $x_1 = 0,1$  м/с;  $x_2 = 0,1$  м/с;  $x_3 = 0,1$  рад/с;  $x_4 = 0,1$  м;  $x_5 = 0,1$  м;  $x_6 = 0,1$  рад.

Результаты моделирования представлены на рис. 4–7.

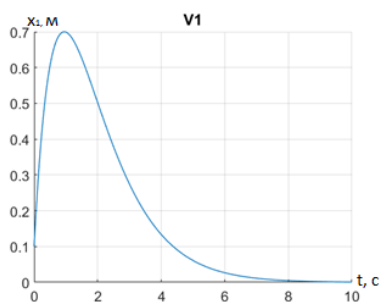


Рис. 4. Изменение линейной скорости по оси  $\xi$

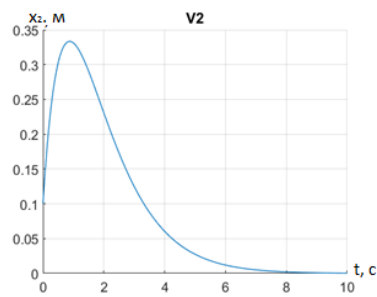


Рис. 5. Изменение линейной скорости по оси  $\eta$

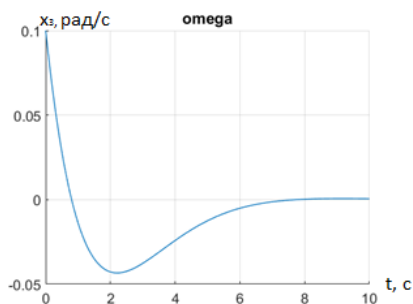


Рис. 6. Изменение угловой скорости

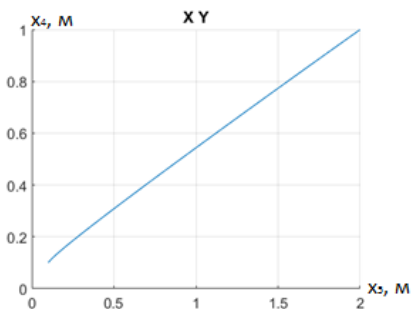


Рис. 7. Траектория движения мобильного робота

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления мобильным роботом на колесах Илона (1)–(7) обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов (2) и (5), а именно, передвижение к заданной точке рабочей плоскости с заданным углом ориентации платформы.

**Заключение.** Таким образом, в статье представлен важный научный результат – разработана процедура аналитического синтеза стратегии векторного управления мобильным роботом на колесах Илона с использованием полной нелинейной модели движения. Указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы, и четкое исполнение заданных инвариантов. Также, следует отметить, что представленный метод синтеза нелинейных законов управления хорошо коррелирует с «законом необходимого разнообразия» Уильяма Росса Эшби, который гласит, что «...разнообразии (энтропии) системы можно понизить не более чем на величину количества информации в управляющей системе об управляемой, которое равно разнообразию (энтропии) управления за вычетом потери информации от неоднозначного управления...». Другими словами, данный закон перефразировал Роджер Конант «...каждый хороший регулятор системы должен быть моделью этой системы...», что полностью соответствует принципу применения метода АКАР и общей синергетической теории управления.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алисейчик А.П.* Механика и управление движением: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.01. – М.: Инст. прикл. мат. им. М.В. Келдыша Рос. акад. наук, 2013. – 18 с.
2. *Павловский В.Е., Шишканов Д.В.* Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2006. – № 12. – 28 с.
3. *Diegel O., Badve A., Bright G.* Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots // Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation (ARAA-2002). – Auckland. – 2002. – P. 117-121.
4. *Hillery M.* Omni-Directional Vehicle (ODV) by the U.S. Navy. – URL <http://www.arrickrobotics.com/robomenu/odv.html> (дата доступа: 10.05.2016).
5. Orlando Business Journal article Omnic's wheel of fortune rolls into production by Chad Eric Watt, 31 May 2002.
6. KUKA Roboter GmbH KUKA OMNIMOVE. – Режим доступа: URL <http://www.kuka-omnimove.com/en/> (дата доступа: 10.05.2016).
7. *Мартыненко Ю.Г., Формальский А.М.* О движении мобильного робота с роликонесущими колесами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 6. – С. 142-149.
8. *Борисов, А.В., Кулин А.А., Мамаев И.С.* Тележка с омниколесами на плоскости и сфере // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 785-801.
9. *Кампион, Г., Бастен Ж., Д'Андреа-Новель Б.* Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 733-769.
10. *Nagy T.K., D'Andrea R., Ganguly P. [et. al.]*. Near-optimal dynamic trajectory generation and control of an omnidirectional vehicle // Robotics and Autonomous Systems. – 2004. – Vol. 47 (1). – P. 47-64.
11. *Nagy T.K., Ganguly P., D'Andrea R.* Real-time trajectory generation for omni-directional vehicle // Proceedings of the American Control Conference. – 2002. – P. 286-291.
12. *Samani H.A., Abdollahi A., Ostadi H. [et. al.]*. Design and development of a comprehensive omni directional soccer player robot // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2004. – Vol. 1 (3). – P. 191-200.
13. *Watanabe K., Shiraishi Y. [et. al.]*. Feedback control of an omnidirectional autonomous platform for mobile service robots // J. Intelligent and Robotic Systems. – 1998. – Vol. 22. – P. 315-330.
14. *Liu Y., Zhu J.J., Williams R.L. II [et. al.]*. Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization // Robotics and autonomous systems. – 2008. – Vol. 56. – P. 461-479.
15. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
16. *Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э.* Системы управления движением колесных роботов. Серия «Анализ и синтез нелинейных систем». – СПб.: Наука, 2001. – 227 с.



17. Klilir, P.F., Neunan C.P. Kinematic modeling of wheeled mobile robots // J. Robotic Systms. – 1987. – No. 4. – P. 340.
18. Velasco-Villa, M., del-Muro-Cuellar B., Alvarez-Aguirre A. Smith-predictor compensator for a delayed omnidirectional mobile robot // Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on control & Automation, Athene-Greece, 2007.
19. Vazques J.A., Velasco-Villa M. Path-Tracking Dynamical Model Based Control of an Omnidirectional Mobile Robot // Proceedings of the 17th World Congress “The International Federation of Automatic Control”, 2008. – P. 5365-5373.
20. Huang H.C., Tsai C.C. Adaptive Trajectory Tracking and Stabilization for Omnidirectional Mobile Robot with Dynamic Effect and Uncertainties // Proceedings of the 17th World Congress “The International Federation of Automatic Control”. – 2008. – P. 5383-5388.
21. Зобова А.А., Татаринов Я.В. Динамика экипажа с роликонесущими колесами // Прикладная математика и механика. – 2009. – Т. 73. – С. 13-22.
22. Нгуен Н.М. Разработка математической модели погрузочно-разгрузочного устройства с всенаправленными колесами // Труды МАИ. – 2012. – № 58. – 22 с.
23. Андреев А.С., Кудашова Е.А., Раков С.Ю. Синтез непрерывного и кусочно-постоянного управления движением колесного мобильного робота // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 97-100.
24. Андреев А.С., Кудашова Е.А. О моделировании структуры управления для колесного робота с оми-колесами // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 2. – С. 114-121.
25. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.

#### REFERENCES

1. Aliseychik A.P. Mekhanika i upravlenie dvizheniem: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Mechanics and traffic control: autoabstract cand. of eng. sc. diss.]: 01.02.01. Moscow: Inst. prikl. mat. im. M.V. Keldysha Ros. akad. nauk, 2013, 18 p.
2. Pavlovskiy V.E., Shishkanov D.V. Issledovanie dinamiki i sintez upravleniya kolesnymi apparatami s izbytochnoy podvizhnost'yu [The study of dynamics and control synthesis wheeled vehicles with excessive movement], *Preprint IPM im. M.V. Keldysha RAN* [Preprint IPM im. MV Keldysh], 2006, No. 12, 28 p.
3. Diegel O., Badve A., Bright G. Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots, *Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation (ARAA-2002)*. Auckland, 2002, pp. 117-121.
4. Hillery M. Omni-Directional Vehcile (ODV) by the U.S. Navy. Available at: <http://www.arrickrobotics.com/robomenu/odv.html> (accessed 10 May 2016).
5. Orlando Business Journal article Omnic's wheel of fortune rolls into production by Chad Eric Watt, 31 May 2002.
6. KUKA Roboter GmbH KUKA OMNIMOVE. Available at: URL <http://www.kuka-omnimove.com/en/> (accessed 10 May 2016).
7. Martynenko Yu.G., Formal'skiy A.M. O dvizhenii mobil'nogo robota s rolikonesushchimi kolesami [On the motion of a mobile robot with wheels relicensure], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2007, No. 6, pp. 142-149.
8. Borisov, A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S. Telezhka s omnikolesami na ploskosti i sfere [Truck with animalname on a plane and a sphere], *Nelineynaya dinamika* [Nonlinear dynamics], 2011, Vol. 7, No. 4, pp. 785-801.
9. Kampion, G., Basten Zh., D'Andrea-Novell' B. Strukturnye svoystva i klassifikatsiya kinemateskikh i dinamicheskikh modeley kolesnykh mobil'nykh robotov [Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots], *Nelineynaya dinamika* [Nonlinear dynamics], 2011, Vol. 7, No. 4, pp. 733-769.
10. Nagy T.K., D'Andrea R., Ganguly P. [et. al.]. Near-optimal dynamic trajectory generation and control of an omnidirectional vehicle, *Robotics and Autonomous Systems*, 2004, Vol. 47 (1), pp. 47-64.
11. Nagy T.K., Ganguly P., D'Andrea R. Real-time trajectory generation for omni-directional vehicle, *Proceedings of the American Control Conference*, 2002, pp. 286-291.

12. Samani H.A., Abdollahi A., Ostadi H. [et. al.]. Design and development of a comprehensive omni directional soccer player robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2004, Vol. 1 (3), pp. 191-200.
13. Watanabe K., Shiraishi Y. [et. al.]. Feedback control of an omnidirectional autonomous platform for mobile service robots, *J. Intelligent and Robotic Systems*, 1998, Vol. 22, pp. 315-330.
14. Liu, Y., Zhu J.J., Williams R.L. II [et. al.]. Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization, *Robotics and autonomous systems*, 2008, Vol. 56, pp. 461-479.
15. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
16. Burdakov S.F., Miroshnik I.V., Stel'makov R.E. Sistemy upravleniya dvizheniem kolesnykh robotov. Seriya «Analiz i sintez nelineynykh sistem» [The motion control system of wheeled robots. Series "Analysis and synthesis of nonlinear systems"]. Saint Petersburg: Nauka, 2001, 227 p.
17. Klilir P.F., Neiunan C.P. Kinematic modeling of wheeled mobile robots, *J. Robotic Systems*, 1987, No. 4, pp. 340.
18. Velasco-Villa, M., del-Muro-Cuellar B., Alvarez-Aguirre A. Smith-predictor compensator for a delayed omnidirectional mobile robot, *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on control & Automation, Athene-Greece, 2007*.
19. Vazques J.A., Velasco-Villa M. Path-Tracking Dynamical Model Based Control of an Omnidirectional Mobile Robot, *Proceedings of the 17th World Congress "The International Federation of Automatic Control"*, 2008, pp. 5365-5373.
20. Huang H.C., Tsai C.C. Adaptive Trajectory Tracking and Stabilization for Omnidirectional Mobile Robot with Dynamic Effect and Uncertainties, *Proceedings of the 17th World Congress "The International Federation of Automatic Control"*, 2008, pp. 5383-5388.
21. Zobova A.A., Tatarinov Ya.V. Dinamika ekipazha s rolíkonesushchimi kolesami [The dynamics of the crew relicensing wheels], *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 2009, No. 73, pp. 13-22.
22. Nguen N.M. Razrabotka matematicheskoy modeli pogruzochno-razgruzochnogo ustroystva s vsenapravlennymi kolesami [Development of a mathematical model of loading and unloading devices with Omni-directional wheels], *Trudy MAI* [Transactions of the Moscow aviation Institute], 2012, No. 58, 22 p.
23. Andreev A.S., Kudashova E.A., Rakov S.Yu. Sintez nepreryvnogo i kusochno-postoyannogo upravleniya dvizhenie kolesnogo mobil'nogo robota [Synthesis of continuous and piecewise constant control the movement of wheeled mobile robot ], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical Volga region Bulletin], 2014, No. 5, pp. 97-100.
24. Andreev A.S., Kudashova E.A. O modelirovanii struktury upravleniya dlya kolesnogo robota s omni-kolesami [On modeling control structure for a wheeled robot with Omni-wheels], *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of control processes], 2015, No. 2, pp. 114-121.
25. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya kontseptsiya sistemnogo sinteza: edinstvo protsessov samoorganizatsii i upravleniya [Synergetic concept of system synthesis: the unity of the processes of self-organization and management], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya of TSURE], 2006, No. 6 (61), pp. 10-38.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

**Скляр Андрей Анатольевич** – Южный федеральный университет; e-mail: aasklyarov@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, к. 403; тел.: +79612957403; кафедра синергетики и процессов управления; доцент.

**Похилина Татьяна Евгеньевна** – e-mail: leonowa.lt@yandex.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Александровская, 38, кв. 10; тел.: +79895026969; студент.

**Sclyarov Andrey Anatolevich** – Southern Federal University; e-mail: aasklyarov@sfedu.ru; 2, Chehov street, ap. 403, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79612957403; the department of synergy and control processes; associate professor.

**Pokhilina Tatiana Evgenievna** – e-mail: leonowa.lt@yandex.ru; 10, Alexandrovskaya street, ap. 38, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79895026969; student.