

## Раздел III. Автоматизация и управление

УДК 681.51

DOI 10.23683/2311-3103-2018-5-152-162

**Г.Е. Веселов, А.А. Скляр, Мириам Никадо Гарсия**

### **НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ РОБОТОВ ВСЕНАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ\***

*Освещается проблема синтеза нелинейных законов группового управления движением мобильных роботов. В качестве агента группы выбран мобильный робот на колесах всенаправленного движения, так как среди прочих наземных транспортных средств он является наиболее маневренным и предназначенным для работы в условиях ограниченного пространства, данный тип шасси рассчитан на выполнение задач в складских помещениях. Для учета нелинейных характеристик объекта управления рассмотрены вопросы анализа математической модели мобильной робототехнической платформой. Также, приводится обзор современных методов и подходов к групповому управлению, в частности, рассматривается применение методов оптимизации коллективного поведения, искусственных потенциалных полей, эвристические методы, основанные на распознавании ситуации и выработки соответствующих действий и методы на основе применения нечеткой логики. В работе показано, что при применении данных методов значительную сложность представляет проблема исследования устойчивости полученной замкнутой системы управления. Изходя из обзора современных методов выделяются основные условия, предъявляемыми к синтезируемому закону группового управления роботами. Этими условиями являются адаптивность к внешней среде и асимптотически устойчивое движение мобильных роботов к заданной точке пространства с заданным типом строя. 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, который позволяет синтезировать законы управления для сложных нелинейных систем большой размерности без применения процедур линеаризации или других упрощений, поэтому для синтеза синергетического законов группового управления применяется именно этот метод. Применение метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов позволяет решить проблему исследования устойчивости полученной замкнутой системы управления, за счет последовательной декомпозиции исходной системы, что и показано в процедуре аналитического синтеза стратегии группового управления мобильными роботами с использованием полных нелинейных моделей движения.*

*Групповое управление; математическая модель; синергетическая теория управления.*

**G.E. Veselov, A.A. Sklyarov, Miriam Nicado Garcia**

### **NON-LINEAR CONTROL FOR A GROUP OF OMNI-WHEEL ROBOTS**

*The paper presents a solution of the problem of non-linear control law design for a group of mobile robots. A mobile robot on omni-directional wheels was chosen as an agent of the swarm, because this kind of mobile robot is the most maneuverable and designed to work in closed spaces. The type of chassis is designed to perform tasks in warehouses. To take into account the nonlinear characteristics of this type of mobile robot chassis, the analysis of the mathematical model of a mobile robotic platform was considered. The paper also provides a survey of modern methods and*

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

*approaches to group control, discusses the use of methods for optimizing collective behavior, artificial potential fields, heuristic methods based on the recognition of the situation and the development of appropriate actions and methods based on the use of fuzzy logic. It is shown that when applying these methods, the problem of analyzing the stability of the obtained closed-loop control system is complex. From the survey of modern methods, the basic conditions imposed on the synthesized law of group control of robots are highlighted. These conditions are adaptability to the external environment and asymptotically stable movement of mobile robots to a given point in space with a given type of order. Therefore, the paper presents a reasons for the use of new non-linear approaches to the control of mobile robots' swarm, in particular, synergetic control theory. The main method, within the framework of this theory, is the method of analytical design of aggregated regulators, which allows to synthesize control laws for complex non-linear systems of large dimensions without applying linearization procedures or other simplifications, therefore this method is used to synthesize synergetic laws of group control. The application of the method of analytical design of aggregated regulators allows us to solve the problem of studying the stability of the resulting closed-loop control system, due to the sequential decomposition of the original system, which is shown in the analytical synthesis procedure of the group control strategy of mobile robots using full non-linear motion models.*

*Group control; omni-wheel robot; non-linear mathematical model; synergetic control theory.*

**Введение.** В настоящее время мощностей одного, отдельно взятого мобильного робота, не достаточно для решения таких технологических задач, как зондирование и исследование больших по площади поверхностей, сборка нетривиальных конструкций в экстремальных условиях космоса или под водой, выполнение тушения пожара или других масштабных действий [1]. Очевидно, что для решения подобных задач необходимо задействовать большое количество автономных мобильных роботов [1–4]. При этом задача управления такой группой роботов по достижению глобальной цели называется групповое управление.

Существует множество подходов к организации группового управления мобильными роботами. Из основных методов можно выделить: метод оптимизации коллективного поведения [5, 6], метод искусственных потенциальных полей [7–11], эвристические методы [12–14], основанные на распознавании ситуации и выработки соответствующих действий и методы на основе применения нечеткой логики [15–18].

Метод оптимизации коллективного поведения, согласно работам [5, 6], основываются на проведении итерационной процедуры оптимизации коллективных действий агентов группы, причем и роботы, и среда, в которой они функционируют, представляет собой единую дискретную динамическую систему. Из основных недостатков данного подхода можно выделить процесс формирования адекватных оценок эффективности действий роботов группы, при котором должны быть учтены технические характеристики роботов, характеристика среды, а также особенности технологических задач выполняемых группой роботов. Однако, при наличии уже сформированных оценок эффективности действий каждого робота дальнейший алгоритм решения задачи значительно упрощается [6].

Применение метода потенциальных полей позволяет создавать не только системы управления одиночными мобильными роботами в среде с препятствиями [10], но системы группового управления мобильными роботами [7–9]. За счет того, что все объекты рабочей среды (препятствия, непроходимые участки и других роботов) наделяются виртуальными полями или искусственными потенциальными полями (объекты, которые должны сблизится наделяются «зарядами» противоположных знаков, объекты, которые не должны наделяются «зарядами» одного знака), то движение роботов группы определяется влиянием результирующих «сил»

искусственными потенциальными полями. К недостаткам данного метода можно отнести необходимость аппроксимирования препятствия выпуклыми многоугольниками или окружностями [10], что в реальных условиях работы группы роботов может оказаться трудно реализуемым и негативно сказаться на общей эффективности формирования строя. Несмотря на недостатки, метод потенциальных полей, в настоящее время, активно развивается как в нашей стране, так и за рубежом [7–11]. Это обусловлено необходимостью небольшого количества вычислительной мощности бортового ЭВМ мобильного робота группы (относительно аналогичных алгоритмов) для реализации группового управления.

Для управления группой мобильных роботов в условиях недетерминированной среды применяются методы, основанные на распознавании ситуации и выработки соответствующих действий [12–14]. Для возможности эффективной реализации данных методов в памяти каждого робота группы должен храниться конечный набор рабочих ситуаций, а также соответствующий им набор поведенческих сценариев робота для достижения общей глобальной цели. Основным достоинством, такого «поведенческого» подхода является то, что он позволяет обеспечивать управление группой мобильных роботов в динамически изменяющейся рабочей среде. Недостатком, же данного подхода, является тот факт, что каждый робот группы должен распознавать текущую ситуацию и реализовать соответствующий ей сценарий действий, что возможно лишь в средах, где возникают лишь заранее изученные ситуации.

Для решения трудно формализуемых задач применяются методы и подходы, основанные на применении нечеткой логики. Задача формирования строя группой мобильных роботов не стала исключением. Нечеткая логика для формирования законов группового управления широко применяется в [15–18]. Следует отметить, что нечеткая логика применяется как для распределения задач между роботами, так и для синтеза законов управления агентов группы [17, 18].

Методы на основе нечеткой логики могут применяться при реализации централизованного подхода к групповому управлению, в частности стратегии управления «ведущий-ведомый» [15, 14]. При таком подходе формирование тактических стратегий для группы роботов возлагается на одного, ведущего робота, в то время как поведение остальных, ведомых, мобильных роботов группы (МРГ) определяется поведением ведущего. При централизованном подходе к групповому управлению мощным комплексом технических средств достаточно оснастить только ведущего мобильного робота, ведомые комплектуются минимальным набором оборудования, которое необходимо для выполнения задач, сформированных ведущим МРГ.

Основными недостатками применения нечеткой логики при формировании стратегии управления «ведущий-ведомый» является необходимость обработки большого объема исходной информации. На практике создание правил поведения для нечетких регуляторов осуществляется на интуитивной основе и, чаще всего, по аналогии с известными примерами. Значительную сложность представляет и проблема исследования устойчивости полученной замкнутой системы управления. Для анализа устойчивости системы управления с нечетким регулятором в большинстве случаев используется компьютерное моделирование.

**Цель управления.** В качестве мобильных роботов группы, в данной работе, рассматриваются мобильные транспортные роботы всенаправленного движения (рис. 1).

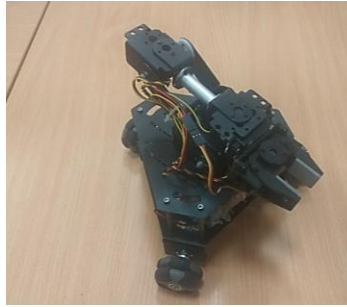


Рис. 1. Трехколесный робот всенаправленного движения

Так как роботы всенаправленного движения являются достаточно непростыми объектами управления [19, 20], то основной проблемой, возникающей при создании групповой стратегии управления, является осуществление устойчивого передвижения группы роботов в заданную точку пространства. Данная задача является многомерной, так как включается в себя множество поведений мобильных роботов, а если учесть, что робот является нелинейным объектом управления [19], то общая модель поведения группы роботов дополняется нелинейными составляющими динамики как самих МРГ, так и функциональных отношений между ними.

В настоящее время, в связи с необходимостью решения многомерных нелинейных задач формируется новая интегральная наука – синергетика. Данная наука изучает процессы самоорганизации и охватывает современные знания о косной и живой природе, экономические и в особенности технические науки. Базируясь на новых знаниях о природе происходящих процессов в сложных нелинейных системах, была сформирована новая прикладная синергетическая теория управления [21–30], основанная на принципе направленной самоорганизации. В рамках данной теории был разработан метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [21], позволяющий синтезировать законы управления для расширенных математических моделей объектов управления без линеаризации или других упрощений. 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. Поэтому для реализации группового управления мобильными роботами в данной работе предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления [21–26]:

$$\begin{aligned} \dot{x}^k &= V_x^k; \quad \dot{y}^k = V_y^k; \quad \dot{\psi}^k = \omega_\psi^k; \\ \dot{V}_x^k &= \frac{\sin \psi^k u_1^k + \sin(\psi^k + k_1) u_2^k + \sin(\psi^k + k_2) u_3^k - h V_x^k - m_d \omega_\psi^k V_y^k}{m}; \\ \dot{V}_y^k &= \frac{-\cos \psi^k u_1^k - \cos(\psi^k + k_1) u_2^k - \cos(\psi^k + k_2) u_3^k - h V_y^k + m_d \omega_\psi^k V_x^k}{m}; \\ \dot{\omega}_\psi^k &= \frac{-a(u_1^k + u_2^k + u_3^k) - 2a^2 h \omega_\psi^k}{I}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x^k, y^k$  – координаты центра масс  $k$ -го робота группы;  $V_x^k, V_y^k$  – проекции вектора линейной скорости  $k$ -го робота;  $\psi^k$  – угол рыскания  $k$ -го робота,  $\omega_\psi^k$  – угловая скорость рыскания  $k$ -го робота;  $u_1^k, u_2^k, u_3^k$  – каналы управления  $k$ -ым МРГ;  $m$  – масса робота;  $I$  – момент инерции вокруг оси  $Z$ .

В качестве основной задачи управления выберем асимптотически устойчивое передвижение группы роботов в заданную позицию с удержанием заданного угла рыскания.

**Процедура синтеза.** В СТУ совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Следуя централизованному подходу группового управления в качестве первых инвариантов системы необходимо выбрать перемещение центра масс первого ( $k = 1$ ) или ведущего МРГ в точку с заданными координатами  $x^*, y^*$ , а также задать удержание угла ориентации  $\psi^1$  в заданном направлении  $\psi^*$ . Таким образом, подмножество целей для ведущего МРГ будет иметь вид:

$$\Sigma_1^1 = \{x^1 = x^*, \quad y^1 = y^*, \quad \psi^1 = \psi^*\}. \quad (2)$$

В свою очередь ведомые МРГ ( $k = 2, 3, \dots, n$ , где  $n$  – количество МРГ) должны выполнять задачу следящей системы, поэтому подмножества целей управления ведомых МРГ будут иметь следующий вид:

$$\Sigma_1^k = \{x^k = x^1 + \Delta_x^k, \quad y^k = y^1 + \Delta_y^k, \quad \psi^k = \psi^1 + \Delta_\psi^k\}, \quad (3)$$

где  $\Delta_x^k, \Delta_y^k, \Delta_\psi^k$  – коэффициенты смещения ведомых МРГ относительно ведущего,  $k$  – номер ведомого МРГ.

Для осуществления синтеза методом АКАР [21] выразим подмножества целей управления ведущего МРГ (2) через определенные совокупности макропеременных.

$$\begin{aligned} \Psi_1^1 &= V_x^1 - V_{x_{\max}}^1 \tanh(x^* - x^1); \\ \Psi_2^1 &= V_y^1 - V_{y_{\max}}^1 \tanh(y^* - y^1); \\ \Psi_3^1 &= \omega_\psi^1 - k_1^1(\psi^* - \psi^1), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $V_{\max}^1 = [V_{x_{\max}}^1, V_{y_{\max}}^1]$  – вектор максимально допустимой скорости движения ведущего МРГ,  $k_1^1$  – положительная константа. Согласно методу синергетического синтеза законов управления, исходная задача разбивается на несколько иерархически связанных подзадач, в данном случае на задачу перемещения робота в пространстве и задачу стабилизации угла поворота платформы. Система макропеременных (4) при этом должна удовлетворять решению  $\Psi_i^1 = 0$  ( $i = 1, 2, 3$ ) системы функциональных уравнений:

$$\dot{\Psi}_i^1 + \lambda_i^1 \Psi_i^1 = 0, \quad \text{при } i = \overline{1,3}. \quad (5)$$

где  $\lambda_i^1, i = \overline{1,3}$  – положительные константы.

Из данной системы уравнений (5) определяется «внешние» законы управления ведущего МРГ  $u_1^1, u_2^1, u_3^1$ .

Далее, для осуществления слежения за ведущим МРГ, выразим подмножество целей управления ведомых МРГ (3) через следующие совокупности макропеременных:

$$\begin{aligned}
 \Psi_1^k &= V_x^k - V_x^1 - V_{x_{\max}}^k \tanh(x^1 + \Delta_x^k - x^k); \\
 \Psi_2^k &= V_y^k - V_y^1 - V_{y_{\max}}^k \tanh(y^1 + \Delta_y^k - y^k); \\
 \Psi_3^k &= \omega_\psi^k - \omega_\psi^1 - k_1^k (\psi^1 + \Delta_\psi^k - \psi^k),
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $V_{\max}^k = [V_{x_{\max}}^k, V_{y_{\max}}^k]$  – вектор максимально допустимой скорости движения ведомых МРГ,  $k_1^k$  – положительные константы.

Согласно СТУ [15–18] система макропеременных (6) должны удовлетворять решению  $\Psi_i^k = 0$  ( $i = 1, 2, 3$ ) системы функциональных уравнений:

$$\dot{\Psi}_i^k + \lambda_i^k \Psi_i^k = 0, \text{ при } i = \overline{1,3}. \tag{7}$$

Решением системы функциональных уравнений (7) являются «внешние» законы управления ведомых МРГ  $u_1^k, u_2^k, u_3^k$ , которые обеспечивают перевод изображающей точки замкнутой системы в окрестность пересечения многообразий  $\Psi_i^k = 0$  ( $i = 1, 2, 3$ ), в результате которого происходит динамическая декомпозиция исходной системы (1). В итоге поведение группы мобильных роботов на пересечении инвариантных многообразий  $\Psi_i^1 = 0$  и  $\Psi_i^k = 0$  ( $i = 1, 2, 3$ ) будет описываться следующей системой:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}^1 &= V_{x_{\max}}^1 \tanh(x^* - x^1); & \dot{x}^k &= V_x^1 + V_{x_{\max}}^k \tanh(x^1 + \Delta_x^k - x^k); \\
 \dot{y}^1 &= V_{y_{\max}}^1 \tanh(y^* - y^1); & \dot{y}^k &= V_y^1 + V_{y_{\max}}^k \tanh(y^1 + \Delta_y^k - y^k); \\
 \dot{\psi}^1 &= k_1^1 (\psi^* - \psi^1); & \dot{\psi}^k &= \omega_\psi^1 + k_1^k (\psi^1 + \Delta_\psi^k - \psi^k).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Для того чтобы замкнутая система (8) была асимптотически устойчива необходимо чтобы коэффициенты  $k_1^1 > 0$ ,  $k_1^k > 0$  и проекции вектора максимально допустимой скорости движения для ведущего и ведомых МРГ вычислялись следующим образом:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= x^* - x^1; & X_k &= x^1 + \Delta_x^k - x^k; \\
 Y_1 &= y^* - y^1; & Y_k &= y^1 + \Delta_y^k - y^k; \\
 n_1 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}; & n_k &= \sqrt{X_k^2 + Y_k^2}; \\
 V_{x_{\max}}^1 &= \frac{\text{sign}(X_1) X_1 V_0^1}{n_1}; & V_{x_{\max}}^k &= \frac{\text{sign}(X_k) X_k V_0^k}{n_k}; \\
 V_{y_{\max}}^1 &= \frac{\text{sign}(Y_1) Y_1 V_0^1}{n_1}; & V_{y_{\max}}^k &= \frac{\text{sign}(Y_k) Y_k V_0^k}{n_k},
 \end{aligned}$$

где  $V_0^1$  и  $V_0^k$  – желаемая скорость перемещения ведущего и ведомого МРГ соответственно.

Таким образом, с учетом математической модели мобильного робота (1) и «внешних» управлений ведущего МРГ  $u_1^1, u_2^1, u_3^1$  и ведомых МРГ  $u_1^k, u_2^k, u_3^k$ , можно получить стратегии группового управления реализующие централизованное поведение, слаженное движение ведомых МРГ относительно главного ведущего МРГ, перемещающегося в заданную точку рабочего пространства.

**Компьютерное моделирование.** Проведем компьютерное исследование синтезированной замкнутой системы группового управления роботами. Предположим, что задачу группового построения в пространстве выполняют один ведущий и два ведомых ( $k = 3$ ) робота. Ограничим скорость перемещения ведущего МРГ

порогом в  $V_0^1 = 0,3$  м/с. Зададим целевые координаты ведущего МРГ следующим образом:  $x^* = 15$  м,  $y^* = 0$  м и угол  $\psi^* = 0$  рад. Зададим ограничение скорости перемещения ведомых МРГ порогом в  $V_0^k = 0,8$  м/с.

Предположим, что начальные условия проекций векторов линейной и угловой скоростей ведущего и ведомых МРГ являются нулевыми ( $V_x^k(0) = V_y^k(0) = 0$ ,  $\omega_\psi^k(0) = 0$ ). В качестве начальных значений положения роботов в рабочем пространстве возьмём следующие значения:

$$\begin{aligned} x^1(0) &= 0, & y^1(0) &= 0, & \psi^1(0) &= 0; \\ x^2(0) &= -10, & y^2(0) &= 0, & \psi^2(0) &= 0; \\ x^3(0) &= -5, & y^3(0) &= 0, & \psi^3(0) &= 0. \end{aligned}$$

На рис. 2–4 представлены переходные процессы изменения координат полученной замкнутой системы. Обозначения на рис.: 1 – ведущий МРГ; 2, 3 – ведомые МРГ.

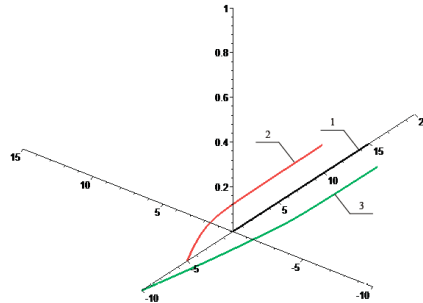


Рис. 2. Траектория движения группы мобильных роботов

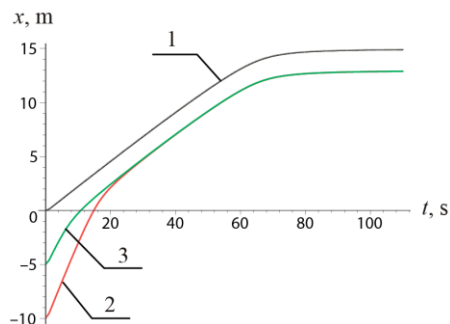


Рис. 3. Изменение проекции вектора перемещения группы роботов на ось X

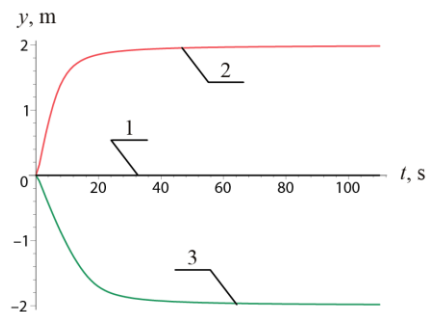


Рис. 3. Изменение проекции вектора перемещения группы роботов на ось Y

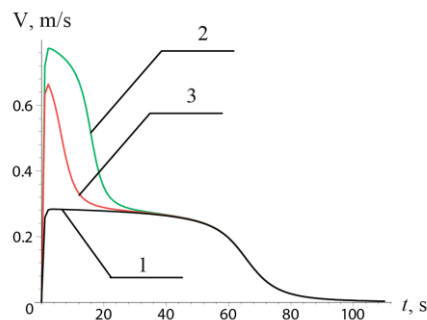


Рис. 4. Изменение вектора линейной скорости мобильных роботов группы

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления группой роботов, с учетом (1) обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов: передвижение ведущего МРГ к заданной точке в трехмерном пространстве (рис. 2), выдерживание ведомыми МРГ заданного смещения относительно ведущего МРГ (рис. 4), а также выполнения всеми МРГ ограничения по максимальной скорости перемещения (рис. 5).

**Заключение.** Таким образом, в статье представлен важный научный результат – разработана процедура аналитического синтеза стратегии группового управления мобильными роботами с использованием полных нелинейных моделей движения. Указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутых систем, и четкое исполнение заданных инвариантов. Использование нелинейных составляющих при синтезе законов группового управления позволяет точно выдерживать требуемое смещение ведомых роботов относительно положения ведущего. Вариация смещений ведомых МРГ позволяет формировать различные типы строя группы роботов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Avanzini P.P., Royer E., Thuilot B., and Durutin J.-P.* Using monocular visual SLAM to manually convoy a fleet of automatic urban vehicles // in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Karlsruhe, Germany, 2013. – P. 3219-3224.
2. *Petrov P.* A mathematical model for control of an autonomous vehicle convoy // Trans. syst. Control. – 2008. – Vol. 3, No. 9. – P. 835-848.
3. *Antonelli G., Arrichiello F., Caccavale F., and Marino A.* Decentralized centroid and formation control for multi-robot systems // in IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Karlsruhe, Germany, 2013. – P. 3511-3516.
4. *Kitts C.A. and Mas I.* Cluster space specification and control of mobile multirobot systems // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. – Apr. 2009. – Vol. 14, No. 2. – P. 207-218.
5. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
6. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. – М.: Янус-К, 2002. – 292 с.
7. *Барбашова Т.Ф., Кирильченко А.А., Колганов М.А.* Некоторые аспекты использования метода потенциалов при управлении мобильными роботами. – М.: Изд-во ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2004. – 23 с.
8. *Рыжова Т.П.* Управление коллективом мобильных роботов // Труды международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". – 2011. – С. 281-287.
9. *Gazi V.* Swarm Aggregations Using Artificial Potentials and Sliding Mode Control // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. – Maui, Hawaii, 2003. – P. 2041-2046.
10. *Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А.* Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы // Препринт института прикладной математики имени М.В. Келдыша. – 2001. – № 1. – С. 1-32.



11. *Bennet Derek J., McInnes Colin R.* Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2010. – № 58. – P. 256-264.
12. *Fierro R., Das A., Spletzer J., Esposito J., Kumar V., Ostrowski J. et al.* A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination // *Intern. J. of Robotics Research*. – 2002. – Vol. 21, No. 10-11. – P. 977-995.
13. *Nicolescu M., Mataric M.* Experience-based representation construction: learning from human and robot teachers // *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. – 2001. – Vol. 2. – P. 740-745.
14. *Parker L.* Alliance: An Architecture for Fault Tolerant Multi-Robot Cooperation // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1998. – Vol. 14, No. 2. – P. 220-240.
15. *Bazoula A., Djouadi M., Maaref H.* Formation Control of Multi-Robots via Fuzzy Logic Technique // *Intern. J. of Computers, Communications & Control*. – 2008. – Vol. 3. – P. 179-184.
16. *Bazoula A., Maaref H.* Fuzzy Separation Bearing Control for Mobile Robots Formation // *Intern. J. of Aerospace and Mechanical Engineering*. – 2007. – P. 14-19.
17. *Benbouabdallah K., Qi-dan Z.* A Fuzzy Logic Behavior Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment // *Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 5 (14). – P. 3835-3842.
18. *Bemian S., de Oliveira M., Edan Y., Jamshidi M.* Hierarchical Fuzzy Behavior-Based Control of a Multi-Agent Robotic System // *Proc. of the 71 Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED)*. – 1999. – P. 2024-2032.
19. *Скляр А.А., Похилина Т.Е.* Синтез нелинейного закона управления мобильной робототехнической платформой на колесах Илона // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 3 (188). – С. 121-130.
20. *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.
21. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
22. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // *Известия ТРТУ*. 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
23. *Колесников А.А.* Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // *Известия ТРТУ*. – 2006. – № 6 (51). – С. 10-38.
24. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Мушенко А.С. и др.* Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – М.: КомКнига, 2006. – 304 с.
25. *Веселов Г.Е.* Синергетический подход к синтезу иерархических систем управления // *Известия ТРТУ*. – 2006. – № 6 (61). – С. 73-84.
26. *Веселов Г.Е.* Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления // *Известия ТРТУ*. – 2006. – № 5 (60). – С. 66-76.
27. *Веселов Г.Е., Скляр А.А., Скляр С.А.* Синергетический подход к управлению беспилотным летательным аппаратом // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 5 (142). – С. 65-70.
28. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A.* Synergetic control of asynchronous electric traction drives of locomotives // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – July 2014. – Vol. 53, Issue 4. – P. 587-600.
29. *Kolesnikov A.A.* Introduction of synergetic control // *Proc. American Control Conference (ACC-2014), Portland, OR, USA, 4-6 June 2014*. – P. 3013-3016. Doi: 10.1109/ACC2014.6859397.
30. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S.* Adaptive Power Saving Control for Traction Asynchronous Electrical Drive: Synergetic Approach // *Proc. IEEE International Energy Conference (EnergyCon 2014), Dubrovnik, Croatia, 13-16 May 2014*. – P. 1446-1453. Doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850613.

## REFERENCES

1. *Avanzini P.P., Royer E., Thuilot B., and Durutin J.-P.* Using monocular visual SLAM to manually convoy a fleet of automatic urban vehicles, in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Karlsruhe, Germany, 2013*, pp. 3219-3224.

2. Petrov P. A mathematical model for control of an autonomous vehicle convoy, *Trans. syst. Control*, 2008, Vol. 3, No. 9, pp. 835-848.
3. Antonelli G., Arrichiello F., Caccavale F., and Marino A. Decentralized centroid and formation control for multi-robot systems, in *IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Karlsruhe, Germany, 2013*, pp. 3511-3516.
4. Kitts C.A. and Mas I. Cluster space specification and control of mobile multirobot systems, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Apr. 2009, Vol. 14, No. 2, pp. 207-218.
5. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 278 p.
6. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Raspredelennye sistemy planirovaniya deystviy kollektivov robotov [Distributed systems for planning actions of robot teams]. Moscow: YAnus-K, 2002, 292 p.
7. Barbashova T.F., Kiril'chenko A.A., Kolganov M.A. Nekotorye aspekty ispol'zovaniya metoda potentsialov pri upravlenii mobil'nymi robotami [Some aspects of using the method of potentials in the management of mobile robots]. Moscow: Izd-vo IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2004, 23 p.
8. Ryzhova T.P. Upravlenie kollektivom mobil'nykh robotov [Management team of mobile robots], *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Ekstremal'naya robototekhnika"* [Proceedings of the international scientific and technical conference "Extreme robotics"], 2011, pp. 281-287.
9. Gazi V. Swarm Aggregations Using Artificial Potentials and Sliding Mode Control, *Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control*. Maui, Hawaii, 2003, pp. 2041-2046.
10. Platonov A.K., Kiril'chenko A.A., Kolganov M.A. Metod potentsialov v zadache vybora puti: istoriya i perspektivy [The method of potentials in the problem of path selection: history and prospects], *Preprint instituta prikladnoy matematiki imeni M.V. Keldysha* [Preprint of Keldysh Institute of applied mathematics], 2001, No. 1, pp. 1-32.
11. Bennet Derek J., McInnes Colin R. Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields, *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, No. 58, pp. 256-264.
12. Fierro R., Das A., Spletzer J., Esposito J., Kumar V., Ostrowski J. et al. A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination, *Intern. J. of Robotics Research*, 2002, Vol. 21, No. 10-11, pp. 977-995.
13. Nicolescu M., Mataric M. Experience-based representation construction: learning from human and robot teachers, *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2001, Vol. 2, pp. 740-745.
14. Parker L. Alliance: An Architecture for Fault Tolerant Multi-Robot Cooperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, Vol. 14, No. 2, pp. 220-240.
15. Bazoula A., Djouadi M., Maaref H. Formation Control of Multi-Robots via Fuzzy Logic Technique, *Intern. J. of Computers, Communications & Control*, 2008, Vol. 3, pp. 179-184.
16. Bazoula A., Maaref H. Fuzzy Separation Bearing Control for Mobile Robots Formation, *Intern. J. of Aerospace and Mechanical Engineering*, 2007, pp. 14-19.
17. Benbouabdallah K., Qi-dan Z. A Fuzzy Logic Behavior Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment, *Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, Vol. 5 (14), pp. 3835-3842.
18. Bemian S., de Oliveira M., Edan Y., Jamshidi M. Hierarchical Fuzzy Behavior-Based Control of a Multi-Agent Robotic System, *Proc. of the 71 Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED)*, 1999, pp. 2024-2032.
19. Sklyarov A.A., Pokhilina T.E. Sintez nelineynogo zakona upravleniya mobil'noy robototekhnicheskoy platformoy na kolesakh Ilona [Synthesis of nonlinear control law for a mobile robot platform on wheels Ilona], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3 (188), pp. 121-130.
20. 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.
21. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.

22. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya: kontseptsii, metody, tendentsii razvitiya [Synergetic control theory: concepts, methods, and tendencies of development], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2001, No. 5 (23), pp. 7-27.
23. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya kontseptsiya sistemnogo sinteza: edinstvo protsessov samoorganizatsii i upravleniya [Synergetic concept of system synthesis: unity of self-organization and management processes], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 6 (51), pp. 10-38.
24. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Mushenko A.S. i dr.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: mekhanicheskie i elektromekhanicheskie sistemy [Synergetic methods of control of complex systems: mechanical and Electromechanical systems]. Moscow: KomKniga, 2006, 304 p.
25. *Veselov G.E.* Sinergeticheskiy podkhod k sintezu ierarkhicheskikh sistem upravleniya [A synergistic approach to the synthesis of hierarchical control systems], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 6 (61), pp. 73-84.
26. *Veselov G.E.* Prikladnaya teoriya sinergeticheskogo sinteza ierarkhicheskikh sistem upravleniya [Applied theory of synergetic synthesis of hierarchical control systems], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 5 (60), pp. 66-76.
27. *Veselov G.E., Sklyarov A.A., Sklyarov S.A.* Sinergeticheskiy podkhod k upravleniyu bespilotnym letatel'ny'm apparatom [A synergetic approach to control an unmanned aerial vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5 (142), pp. 65-70.
28. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A.* Synergetic control of asynchronous electric traction drives of locomotives, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, July 2014, Vol. 53, Issue 4, pp. 587-600.
29. *Kolesnikov A.A.* Introduction of synergetic control, *Proc. American Control Conference (ACC-2014), Portland, OR, USA, 4-6 June 2014*, pp. 3013-3016. Doi: 10.1109/ACC2014.6859397.
30. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S.* Adaptive Power Saving Control for Traction Asynchronous Electrical Drive: Synergetic Approach, *Proc. IEEE International Energy Conference (EnergyCon 2014), Dubrovnik, Croatia, 13-16 May 2014*, pp. 1446-1453. Doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850613.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Веселов Геннадий Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: gev@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634360450; директор Института компьютерных технологий и информационной безопасности; д.т.н.; доцент.

**Склярков Андрей Анатольевич** – e-mail: aasklyarov@sfedu.ru; тел.: +79612957403; кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; доцент.

**Мириам Никадо Гарсия** – Университет компьютерных наук; e-mail: rector@uci.cu; Сан-Антонио-де-лос-Баньос, Км. 2 ½. Торренс, Ла-Лиза, г. Гавана, Куба; тел.: +5378372548; ректор Университета информационных наук; профессор; доктор наук.

**Veselov Gennady Evgen'evich** – Southern Federal University; e-mail: gev@sfedu.ru; 2, Chekhov Street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634360450; Institute of computer technology and informational security; director; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Sklyarov Andrey Anatolevich** – e-mail: aasklyarov@sfedu.ru; phone: +79612957403; the department synergy and control processes; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Miriam Nicado Garcia** – University of Informatics Sciences; e-mail: rector@uci.cu; Road to San Antonio de los Baños, Km. 2 ½. Torrens, La Lisa, Havana, Cuba; phone: +5378372548; rector of University of Informatics Sciences; professor; dr. of sc.