

УДК 621.865.8

## РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

О. В. ДАРИНЦЕВ<sup>1, 2</sup>, А. Б. МИГРАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ovd.imech@gmail.com, <sup>2</sup>abm.imech.anrb@mail.ru

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН (ИМех УНЦ РАН)

Поступила в редакцию 28.03.2017

**Аннотация.** В статье показаны результаты исследований по применению распределенных облачных технологий в системах управления группами мобильных роботов. Разработана схема доступа к виртуальным информационным ресурсам, а также механизм распределения узлов облачной вычислительной системы при линейной декомпозиции поставленной задачи. В качестве информационной платформы использована архитектура открытой системы на основе модели сервера приложений и сети Internet. В условиях повышенных требований к быстродействию бортовых систем управления предлагаемые в статье подходы позволяют эффективно разделять между отдельными членами группы высокопроизводительные вычислительные ресурсы, распределенные в облаке.

**Ключевые слова:** распределенные системы; облачные системы; облачные технологии; группа мобильных роботов.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования, проводимые в последнее время в УГАТУ и ИМех УНЦ РАН в области робототехники, ориентированы на решение проблем группового управления мобильными роботами, что соответствует общемировому тренду большей части теоретических и практических исследований: одновременное и согласованное использование мобильных роботов, объединенных в группы, позволяет реализовать сложные, распределенные в пространстве технологические операции, использовать в ходе работы большее количество функций (инструментов), а также улучшить фактические показатели результативности выполнения заданий с учетом имеющихся ограничений по качественным и количественным характеристикам роботов-агентов.

Однако при реализации группового управления возникает ряд специфических задач, связанных с организацией взаимодействия роботов внутри группы, проблемами управления в нестационарной и недетерминированной окружающей среде, механизмами парирования дефицита ресурсов [1–3]. Решение большинства задач возможно при расширении функциональ-

ных возможностей бортовых систем роботов за счет использования технологий распределенных вычислений, что позволит:

- использовать интеллектуальные алгоритмы и создать прототип «мобильного» искусственного интеллекта;
- повысить эффективность управления группой за счет контролируемых разделения и декомпозиции решаемых задач.

Практическая реализация поведенческих алгоритмов работы роботов предъявляет высокие требования к быстродействию бортовых систем управления, которое на текущем этапе развития электроники ограничено. Поэтому актуальным является применение технологий интенсификации вычислений, создание высокопроизводительных распределенных вычислительных ресурсов, синтез методик эффективного разделения ресурсов (потоков) между отдельными агентами группы. Модель предоставления повсеместного и удобного доступа к общему пулу вычислительных ресурсов наиболее часто строится на базе облачных вычислений. Облачные вычисления могут использоваться в качестве площадки для управления, а также для создания инфраструктуры распределенной системы управления группами мобильных роботов [4].

Основной целью и сопутствующими задачами проведенной работы являлись описание

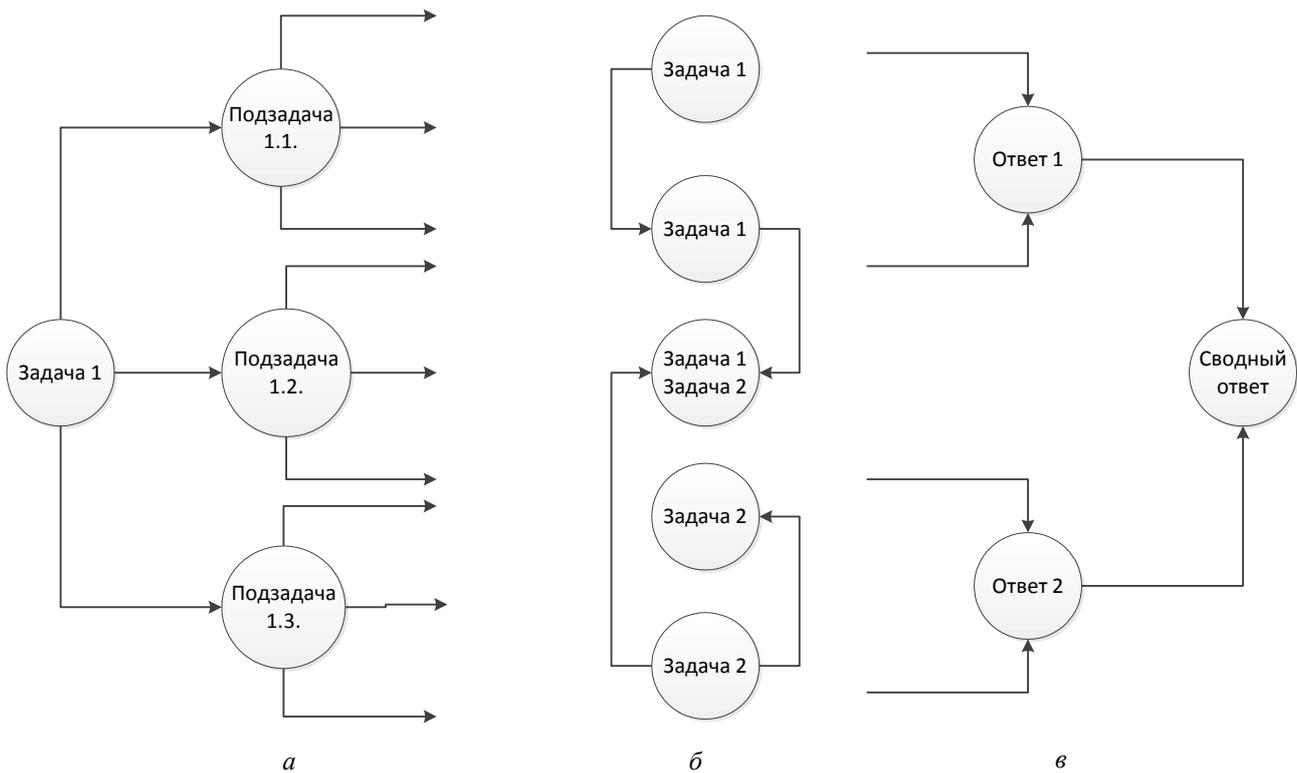


Рис. 1. Декомпозиция задач в группе роботов для распределения в приложениях облака

принципов функционирования программных агентов, а также разработка архитектуры и инфраструктуры распределенной облачной системы, учитывающих специфику агентов и области применения. На первом этапе работы анализировались основные методы организации управления группой мобильных роботов, использующие базовые свойства облачной архитектуры. Затем был определен порядок взаимодействия интеллектуальных агентов при решении вычислительных задач, рассмотрены варианты декомпозиции задач внутри группы, синтезированы алгоритмы совместного решения задач и достижения цели.

#### ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧ В ГРУППЕ РОБОТОВ

Важную роль в повышении производительности распределенной вычислительной системы имеет декомпозиция общей задачи, поставленной перед группой роботов. В процессе декомпозиции решение одной большой задачи разбивается на решение серии меньших, более простых, задач. Предлагается три способа синтеза алгоритмов, которые позволяют провести декомпозицию задач, получаемых из системы управления, для их последующего распределения в приложениях виртуальной машины (рис. 1).

*Линейное распределение* (рис. 1, а). Этот способ предполагает разделение задачи на более мелкие в виде иерархического дерева, при этом

распределение осуществляется до тех пор, пока отдельные подзадачи не будут иметь степень детализации, достаточной для исполнения найденного решения одним роботом из группы. Данный алгоритм предполагает существование предшествующего опыта корректной декомпозиции похожих задач и наличие знаний об их структуре. Поэтому для более эффективного распределения в облаке отдельные роботы группы могут иметь жесткую специализацию по определенным типам задач и специфике систем управления (нейросетевые, логические, эвристические алгоритмы управления и т.д.)

*Роевое взаимодействие* (рис. 1, б). Наиболее крупные задачи решаются индивидуально отдельными роботами из группы (планирование оптимальных траекторий, расчет оптимального плана технологической сборки и т.д.). При этом также возможен обмен информацией между роботами: один из агентов коллектива может стать инициатором действия и работать согласованно с другим агентом, если у него есть информация, которая может повысить результативность выполняемой операции.

*Синтез решений* (рис. 1, в). Решения отдельных подзадач интегрируются в общее решение. Этот вариант декомпозиции также может иметь иерархическую структуру с частными ответами, полученными на разных уровнях абстракции. Для рассматриваемой задачи в качестве примера декомпозиции та-



Рис. 2. Схема доступа к виртуальным информационным ресурсам через облачные технологии

кого типа можно привести планирование траекторий в группе мобильных роботов: частными ответами будут являться решения, полученные различными методами приближенного или интеллектуального планирования, сводным ответом – оптимальная траектория движения [1].

В зависимости от поставленной перед группой роботов общей задачи и функциональных возможностей отдельных роботов производится выбор одного из способов декомпозиции. На следующем уровне системы управления необходимы эффективные методы распределения ресурсов вычислительной системы для их оптимального использования с учетом выбранной модели декомпозиции.

### УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ ПОСРЕДСТВОМ ОБЛАЧНОЙ СИСТЕМЫ

К числу перспективных направлений развития прикладных информационно-управляющих систем, менее затратно обеспечивающих увеличение быстродействия бортовых вычислительных комплексов, относится применение технологий распределенных облачных вычислений, которые могут использоваться как базовая платформа для управления коллективом роботов, и, одновременно, в качестве среды поддержки инфраструктуры.

Алгоритм управления, предоставляющий каждому отдельному роботу группы доступ к виртуальным информационным ресурсам, работает в двух, связанных через оборудование физического хоста, подпроцессах (рис. 2) и в ходе взаимодействия с ресурсами информационной системы (ИС) осуществляет:

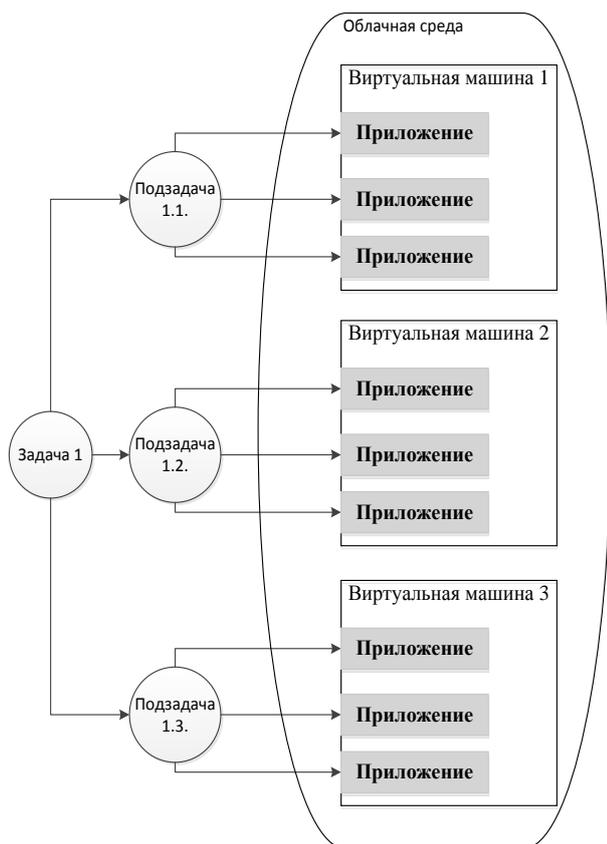
- сбор и обработку данных по запросам, поступающим в ИС;
- анализ поступивших запросов для наиболее эффективного распределения задач.

Механизм распределения ресурсов облачной вычислительной системы определяется способом декомпозиции поставленной задачи: линейное распределение, роевое взаимодействие или синтез решений. При линейном распределении разделение задачи на более мелкие производится до тех пор, пока отдельные подзадачи не будут решены в приложении виртуальной машины (рис. 3).

В целях оптимального использования вычислительных ресурсов в условиях физических ограничений аппаратного обеспечения формируется три варианта конфигурации.

*Вариант 1* – обеспечение запаса производительности в случае скачкообразного роста количества роботов и поступающих от них запросов. Масштабирование производится в полном объеме ресурсов вычислительной системы.

*Вариант 2* – поддержание меньшей производительности в сравнении с исходным количеством роботов в группе. Данный подход эффективен в случае использования сервисов для обособленной группы роботов. По аналогии с вариантом 1 формируется список из доступных на текущий момент времени единиц виртуальных ресурсов. Это делает возможным при увеличении нагрузки параллельный запуск программ и приложений не на одном вычислительном узле, а сразу на нескольких. Таким образом, система разделяет на независимые узлы общую вычислительную задачу, что дает возможность обеспечить соответствующее качество обслуживания для всех роботов группы.



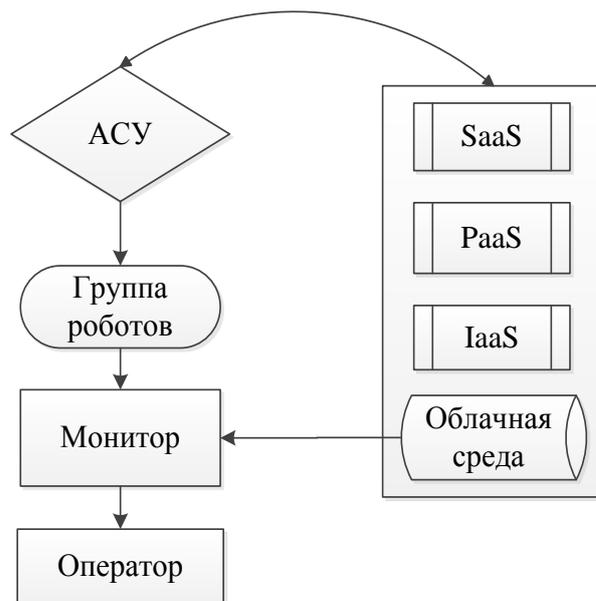
**Рис. 3.** Распределение ресурсов облачной вычислительной системы при линейной декомпозиции задач

*Вариант 3* – создание облака с использованием заданных в конфигурации характеристик, в которых прописаны фиксированные коэффициент масштабирования и количество экземпляров виртуальных машин. Стоит отметить, что в текущем процессе коэффициент масштабирования используется только для определения предельного числа виртуальных машин, к которым имеется доступ в заданной конфигурации.

Таким образом, используя предложенные варианты построения алгоритма, система производит постоянный анализ физических ограничений вычислительных ресурсов и регулирует автоматически свою работу, учитывая входящий поток запросов и количество запущенных приложений.

В процессе работы оператор столкнется с необходимостью отладки системы управления через облако. Отладка может быть представлена в виде трех моделей обслуживания [5] (рис. 4):

- SaaS (Software as a Service);
- PaaS (Platform as a Service);
- IaaS (Infrastructure as a Service).



**Рис. 4.** Управление через компоненты «как сервис»

В зависимости от решаемых задач для предложенной схемы взаимодействия агентов (роботов коллектива) может быть использована любая из этих моделей. Выбор модели обслуживания определяется уровнем доступа агентов к виртуальным приложениям, средствам обработки и хранения данных, а также периферийному оборудованию, входящему в состав вычислительного узла.

Создаваемая облачная инфраструктура должна обеспечивать решение прикладных вычислительных задач разного уровня сложности. Учитывая, что система управления должна функционировать посредством связи с облаком, требуется разработка единого концептуального подхода, который позволит осуществлять следующие этапы:

- создание вычислительного пула;
- организация работы и настройка сетевого стека;
- устройство хранилища (опорного центра обработки данных);
- обеспечение комплексной безопасности;
- подключение системы (сервер, ПО, пушко-наладка);
- настройка системы управления роботами;
- виртуализация;
- автоматизация;
- обслуживание оператором (управление группой роботов через облако).

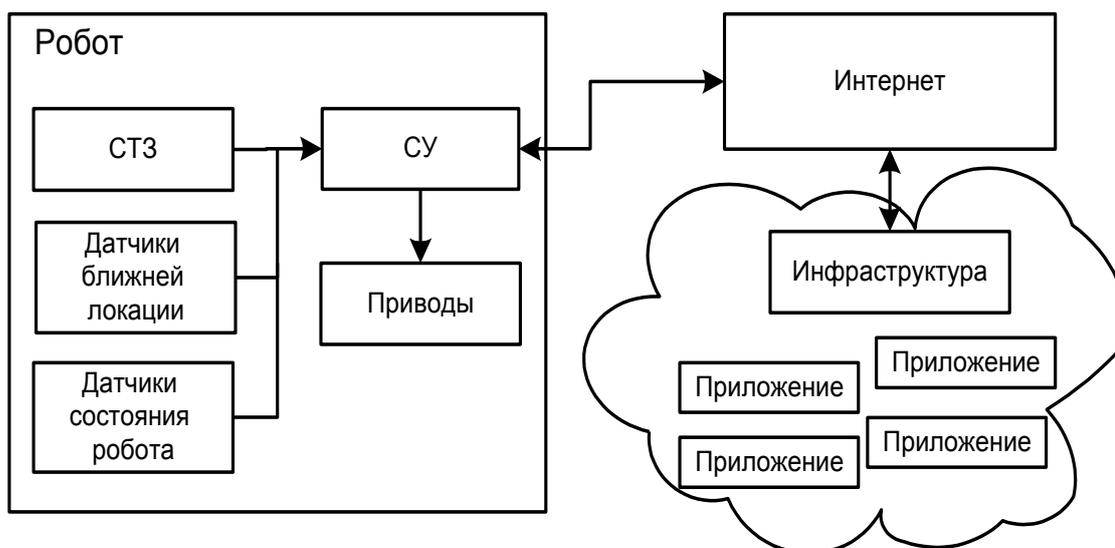


Рис. 5. Взаимодействие отдельного робота с облачной системой

Главной целью выстроенной инфраструктуры является отлаженная работа системы в режиме реального времени. С одной стороны, осуществляется бесперебойное взаимодействие с выбранным облачным решением как с базой данных, сервером и центром обработки данных, а с другой – система управления, которая получает команды через облачную сеть, распределяет вычислительные задачи между отдельными роботами, учитывая степень их загруженности, своевременно перенаправляет информационные потоки по каналам связи и обмена, и вне зависимости от уровня облака выводит получаемый результат непосредственно от виртуальной машины на монитор оператора.

Для работы системы не имеет значения через какой уровень происходит управление. Алгоритмы будут едины, подходы и методология – одинаковы, более важным будет то, как через систему идут команды, каким образом система управления агента их просчитывает и распределяет между отдельными бортовыми компьютерами и, соответственно, от этого зависит пересылка команд и эффективность системы управления в целом. Таким образом, при выстраивании облачной вычислительной системы разработка будет сведена к налаживанию и упорядочиванию алгоритмов решения поступающих в облако задач. Реализуемая технология должна в дальнейшем развиваться по принципу открытого программного обеспечения с возможностью постоянной его доработки.

Наиболее важными моментами при построении архитектуры системы будут являться:

- настройка системы управления на анализ данных при выполнении задач, требующих принятия решений;

- выстраивание работы модулей согласно выбранной концепции через облачный сервер.

С учетом особенностей выбранных методов обработки представляется целесообразным создание архитектуры как открытой системы, построенной на основе модели сервера приложений и сети Интернет (рис. 5), которая будет функционировать в двух возможных вариантах.

Первый вариант основан на отношениях очередности в группе роботов. Роботы в группе генерируют варианты решений и целевые списки. Полученные результаты из списка сравниваются на соответствие областям знаний, размещенным в облаке, исключаются из списков и передаются на выполнение. Среди оставшихся элементов проводится ранжирование и расстановка в очереди по порядку следования.

Второй вариант действует согласно принципам коллективного управления. Каждый робот настроен на автоматическое и самостоятельное функционирование, также он согласовывает работу с остальными роботами из своей группы посредством удаленного облачного сервиса (единое пространство). Целевая задача разбивается на множество мелких подзадач, которые распределяются исходя из отношений очередности. Каждый из агентов выполняет поставленную задачу как самостоятельный элемент.

При работе предлагаемой системы будут проявляться такие достоинства облачных технологий, как:

Таблица

**Результаты экспериментов при размерности дискретного рабочего пространства  
20×20 для группы из пяти мобильных роботов**

Система планирования	Динамическое программирование	Генетические алгоритмы	Нейронные сети	Нечеткая логика
Затраты машинного времени на поиск траектории	150 мс	16 мс	100 мс (3–5 мс при мультисканальной обработке)	<1 мс
Затраты машинного времени на инициализацию алгоритма	280 мс (заполнение начальной матрицы)	2 мс (генерация начальной популяции)	2500 мс (обучение нейронной сети)	<1 мс (инициализация базы знаний)
Сенсорная информация	модель полной конфигурации рабочей области	модель полной конфигурации рабочей области	модель полной конфигурации рабочей области	модель ближней окрестности робота
Критерии оптимальности траектории	– по длине; – по времени;	– по длине; – по времени; – по гладкости; – по «безопасности»	– по длине; – по времени; – по гладкости;	– по гладкости; – по «безопасности»

– надежность, за счет расположения узлов в специально оборудованных центрах обработки данных;

– гибкость и неограниченность вычислительных ресурсов (память, процессор, диски), за счет использования систем виртуализации;

– снижение расходов на обслуживание виртуальной инфраструктуры.

Детальная проработка алгоритмов работы облачной системы позволит генерировать задачи напрямую, используя мультиагентный подход. В этом случае возможно оптимизировать процесс получения решения от виртуальных приложений посредством декомпозиции задач через модули «Task Sharing» (совместное использование задач) и «Result Sharing» (использование результатов обмена) для решения проблем коллективного взаимодействия группы роботов и нацеленности их совместной работы на достижение результата.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Для проверки предлагаемых методик синтеза облачной структуры был использован облачный сервис IaaS, реализованный на базе аппаратуры со следующими характеристиками: 2CPU 3ГГц CISCO B200, 4 Гб ОЗУ, 10 Гб SSD, Windows Server 2008 R2 x64. На облачный сервер произведена установка разработанного ранее программного обеспечения [6] для проведения ряда модельных экспериментов с системами планирования траекторий для группы мобильных роботов на основе динамического программирования, генетических алгоритмов, нейронных сетей и нечеткой логики (табл.).

Полученные в ходе вычислительных экспериментов результаты показали работоспособность программных модулей, ранее разработанных для бортовых систем управления, на базе инфраструктуры облачного сервера. В ходе дальнейших полунатурных и натурных экспериментов планируется проверить ряд перспективных методик для увеличения быстродействия и оптимизации загрузки вычислительных узлов, необходимых для тонкой настройки облачной инфраструктуры и разработки, отладки алгоритмического обеспечения системы распределения задач и группового управления роботами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен один из перспективных подходов к реализации группового управления мобильными роботами, основанный на использовании распределенных облачных систем и характеризующийся междисциплинарным подходом. Отличительной чертой предлагаемых методов и алгоритмов является адекватное отражение специфики области применения и решаемых группой роботов задач в архитектуре информационно-управляющих систем, способах организации информационного обмена и т.д. Предлагаемый подход позволяет повысить надежность и робастность коллективов роботов, снизить требования к бортовым вычислителям при сохранении высокой суммарной производительности в целом.

Использование предложенных подходов при создании распределенной информационной

среды позволит строить на ее базе системы, ориентированные на решение не только тактических, но и стратегических (поведенческих) задач, стоящих перед коллективом роботов. В дальнейшем планируется продолжить разработку алгоритмов информационного обмена, а также провести синтез специфических программных модулей и аппаратно-программного интерфейса между облаком и реальным оборудованием прототипа робототехнического комплекса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Даринцев О. В., Мигранов А. Б.** Области применения приближенных и интеллектуальных методов планирования траекторий для групп мобильных роботов // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. URL: [www.science-education.ru/120-16542](http://www.science-education.ru/120-16542), (дата обращения: 20.01.2017). [ О. V Darintsev, A. B. Migranov, *Applications fields of some approximations and intelligent method of trajectory planning for mobile robots group, in Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, no. 6, 2014. [Online], (in Russian). Available: [www.science-education.ru/120-16542](http://www.science-education.ru/120-16542). ]
2. **Tuncer A., Yildirim M.** Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm // *Computer & Electrical Engineering*. 2012. Vol. 38(6). P. 1564–1572. [ A. Tuncer, M. Yildirim, “Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm”, in *Computer & Electrical Engineering*, vol. 38, pp. 1564-1572, 2012. ]
3. **Xiao J., Huang Y., Cheng Z., He J., Niu Y.** A hybrid membrane evolutionary algorithm for solving constrained optimization problems // *Optik*. 2014. Vol. 125(2). P. 897–902. [ J. Xiao, Y. Huang, Z. Cheng, J. He, Y. Niu. *A hybrid membrane evolutionary algorithm for solving constrained optimization problems in Optik*, vol. 125(2), pp. 897-902, 2014. ]
4. **Даринцев О. В., Мигранов А. Б.** Разработка архитектуры облачной вычислительной системы для управления группами мобильных роботов // *Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН*. 2016. Т. 11, № 1. С. 72–80. [О. V. Darintsev, A. B. Migranov, “Synthesis the structure of cloud computing system to control of mobile robots group”, in *Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavljutova Ufimskogo nauchnogo centra RAN*, vol. 11, no. 1, pp. 72-80, 2016. ]
5. **Mell P., Grance T.** The NIST Definition of Cloud Computing. National Institute of Standards and Technology. 2011. P. 2–3. [ P. Mell, T. Grance. *The NIST Definition of Cloud Computing in National Institute of Standards and Technology*, pp. 2-3, 2011. ]
6. **Даринцев О. В. Мигранов А. Б.** Сравнительный анализ интеллектуальных методов планирования // *Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН*. Т. 9. №2. Уфа, 2012. С. 53–58. [ О. V. Darintsev, A. B. Migranov, “Comparative analysis of intelligent planning methods”, in *Trudy Instituta mehaniki im. R. R. Mavljutova Ufimskogo nauchnogo centra RAN*, vol. 2, no. 2, pp. 53-58, 2012. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ДАРИНЦЕВ Олег Владимирович**, проф. каф. автоматизац. технологич. процессов, зав. лаб. «Робототехника и управление в техн. системах» ИМех УНЦ РАН. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1992). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. робототехн.

**МИГРАНОВ Айрат Барисович**, с.н.с. лаб. робототехники и УТС. Дипл. инж. (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. робототехники.

#### METADATA

**Title:** Distributed control system for group of mobile robots

**Authors:** O. V. Darintsev<sup>1</sup>, A. B. Migranov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2</sup> Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>ovd.imech@gmail.com, <sup>2</sup>abm.imech.anrb@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 2 (76), pp. 88-94, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article shows the results of research on the application of distributed cloud technologies in control systems for mobile robot groups. A scheme for accessing virtual information resources and a mechanism for distributing nodes of the cloud computing system with a linear decomposition of the problem are developed. As an information platform, the architecture of the open system is based on the application server model and the Internet. In conditions of increased requirements for the speed of on-board control systems, the approaches proposed in the article allow to effectively separate high-performance computational resources distributed among the individual members of the group in the cloud.

**Key words:** distributed systems; cloud systems; cloud computing; a group of mobile robots.

**About authors:**

**DARINTSEV, Oleg Vladimirovich**, Prof.. Dept. of Automation of Technological Processes, UGATU; Head of Dept. “Robototechnics” Mavlyutov Institute of Mechanics, Dipl. Eng.-Electromech. (UAI, 1992).Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2008), Researcher in the area of robotics.

**МИГРАНОВ, Airat Barisovich**, Senior researcher Dept. “Robototechnics” Mavlyutov Institute of Mechanics, Dipl. Eng. (UGATU, 2002). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2010). Researcher in the area of robotics.